

NGHIÊN CỨU ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỲ ĐẠO CHO CÁNH TAY ROBOT CHỊU TÁC ĐỘNG CỦA TRỄ BIẾN ĐỔI

RESEARCH ON TRACKING CONTROL FOR ROBOT MANIPULATOR SUBJECT
TO KNOWN TIME-VARYING INPUT DELAY

Đinh Thị Thanh Huyền

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho cánh tay robot khi xét tới trễ biến thiên của tín hiệu đầu vào và chịu tác động không xác định của nhiễu. Để điều khiển bù trễ và bù nhiễu cho hệ phi tuyến không xác định này, một tín hiệu bù trễ được định nghĩa, trong đó sử dụng tích phân của tín hiệu điều khiển đo được trong quá khứ. Tín hiệu điều khiển được thiết kế bao gồm tín hiệu bù trễ kết hợp với tín hiệu điều khiển dạng PI. Bước phân tích ổn định theo định luật Lyapunov được đưa ra để chứng minh cho cơ sở toán học của thiết kế. Chương trình mô phỏng Matlab đã kiểm chứng hiệu quả của phương pháp điều khiển này trên mô hình robot 2 bậc tự do.

Từ khóa: Trễ của tín hiệu điều khiển, điều khiển bền vững, điều khiển phi tuyến.

ABSTRACT

The paper studies on a tracking control method for robot manipulator subject to a known time-varying input delay and an unknown additive disturbance. An auxiliary time-delayed signal is defined using the integral of the measured past control input to compensate for delay. The proposed controller includes the compensate signal and a PI term. Lyapunov theorems are used to prove the mathematic basis of the controller design. The Matlab simulations are performed to show the effectiveness of the proposed method in a 2-degree of freedom robot manipulator.

Keywords: Input delay, robust control, nonlinear control.

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: huyentinh@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/6/2019

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/7/2019

Ngày chấp nhận đăng: 15/8/2018

1. TỔNG QUAN

Trong các hệ thống thực tế, đôi khi trễ của tín hiệu điều khiển là điều không thể tránh khỏi, ví dụ lực sinh ra bởi động cơ đốt trong có thể bị trễ do trễ trong quá trình hòa trộn nhiên liệu cháy, hay quá trình đánh lửa. Hay trễ truyền thông tồn tại trong các ứng dụng điều khiển từ xa. Thời gian trễ có thể gây ra sự mất ổn định hoặc giảm chất lượng điều khiển của hệ thống.

Có nhiều phương pháp ổn định và điều khiển đã phát triển cho các hệ thống có xét tới trễ của tín hiệu đầu vào. Trong đó, cơ sở để phân tích ổn định đối với các hệ phi

tuyến được sử dụng phổ biến nhất là dựa trên hàm Lyapunov-Krasovskii (LK) (ví dụ như [1, 2]) hay phương pháp Lyapunov-Razumikhin (ví dụ [3, 4]). Ưu điểm của hai phương pháp phân tích ổn định này là có thể áp dụng cho các hệ phi tuyến không xác định có chịu tác động của trễ. Thực ra, phương pháp của Razumikhin cũng có thể được coi là một biến thể của phương pháp Krasovskii, trong đó có thể áp dụng cho trường hợp trễ biến thiên có độ lớn bất kỳ, nhưng yêu cầu rằng hệ thống không có trễ tương ứng phải ổn định dạng ISS (input-to-state stability). Phương pháp Krasovskii không đòi hỏi điều kiện ổn định ISS với hệ thống nhưng chỉ áp dụng cho trường hợp thời gian trễ thay đổi chậm.

Một số phương pháp điều khiển đã được xây dựng cho các hệ phi tuyến không xác định có xét tới trễ trong tín hiệu điều khiển, ví dụ phương pháp trong [5-8], tuy nhiên các phương pháp này coi thời gian trễ là hằng số. Trường hợp xét tới trễ biến thiên vẫn là một bài toán khó.

Đối tượng điều khiển trong bài báo này là cánh tay robot. Vấn đề điều khiển tay kẹp robot đi theo những quỹ đạo xác định thông qua giải bài toán động học ngược trở thành yêu cầu điều khiển các biến khớp của robot bám theo những quỹ đạo mong muốn. Việc xác định được chính xác phương trình động lực học của robot là nhiệm vụ rất khó thực hiện, do vậy các phương pháp điều khiển cần phải xét tới cả tính không xác định và ảnh hưởng của nhiễu tới mô hình robot.

Nội dung của bài báo này tập trung vào việc thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo cho robot chuỗi khi xét tới bản chất phi tuyến và tính không xác định trong phương trình động lực học robot, đồng thời xét tới cả vấn đề trễ biến thiên của tín hiệu điều khiển và tác động ngoài của nhiễu. Phương pháp điều khiển đưa ra bao gồm tín hiệu bù trễ kết hợp với tín hiệu điều khiển dạng PI, trong đó tín hiệu bù trễ được xây dựng dựa trên tích phân của tín hiệu điều khiển đo được trong quá khứ. Phương pháp điều khiển được chứng minh nhờ bước phân tích ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov rằng sai số bám quỹ đạo được đảm bảo bị chặn trong giới hạn có thể thu nhỏ được. Chương trình mô phỏng Matlab đã kiểm chứng hiệu quả của phương pháp điều khiển khi áp dụng cho robot 2 bậc tự do.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA CÁNH TAY ROBOT

Phương trình động lực học của robot chuỗi được mô tả dưới dạng phương trình Euler-Lagrange (EL) như sau:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + d(t) = u(t - \tau) \tag{1}$$

Trong đó: $M(q) \in R^{n \times n}$ là ma trận quán tính, $V_m(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ là ma trận Coriolis, $G(q) \in R^n$ là vectơ lực trọng trường, $d(t) \in R^n$ là nhiễu tác động bên ngoài hoặc các thành phần động lực học chưa được xét đến khi lập mô hình robot, $u(t) \in R^n$ là lực chủ động đặt tại các khớp và $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in R^n$ lần lượt là vectơ vị trí, vận tốc và gia tốc của các khớp robot. Giả sử đo được vị trí $q(t)$ và vận tốc $\dot{q}(t)$. Xuyên suốt bài báo, kí hiệu sau sẽ được sử dụng để biểu diễn các hàm có trễ:

$$h_\tau \triangleq \begin{cases} h(t-t) & t \geq \tau, \\ 0 & t < \tau, \end{cases}$$

với thời gian trễ $\tau(t): [0, \infty) \rightarrow R$ là đại lượng xác định nhưng biến thiên. Các ma trận và vectơ V_m, G, d là các hàm phi tuyến không xác định, những giả thiết sau đây sẽ được sử dụng để thiết kế tín hiệu điều khiển:

Giả thiết 1: Ma trận $M(q)$ đối xứng, xác định hoàn toàn và bị chặn, tức là tồn tại các hằng số dương đã biết m_1, m_2, ϵ_1 sao cho:

$$m_1 \|y\|^2 \leq y^T M(q)y \leq m_2 \|y\|^2 \text{ với } \forall y \in R^n,$$

$$\text{và } \|M(q)^{-1}\| \leq \epsilon_1$$

với kí hiệu $\|\cdot\|$ là chuẩn Euler của vectơ hoặc ma trận.

Giả thiết 2: Các hàm phi tuyến V_m, G tác động ngoài d liên tục và bị chặn, tức $V_m, G, d \in L_\infty$, ngoài ra, các đạo hàm và đạo hàm riêng sau tồn tại và bị chặn:

$$\frac{\partial M}{\partial q_i}, \frac{\partial V_m}{\partial q_i}, \frac{\partial V_m}{\partial \dot{q}_i}, \frac{\partial G}{\partial q_i} \in L_\infty \text{ nếu } q(t), \dot{q}(t) \in L_\infty$$

với $\forall i = 1, 2, \dots, n$, và $\dot{d}(t), \ddot{d}(t) \in L_\infty$.

Giả thiết 3: Thời gian trễ $\tau(t)$ biến thiên nhưng độ lớn và tốc độ biến thiên bị chặn bởi hằng số xác định T, φ như sau: $0 \leq \tau(t) \leq T$, và $|\dot{\tau}| < \varphi < 1/2$.

3. MỤC TIÊU ĐIỀU KHIỂN VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHO CÁNH TAY ROBOT

Mục tiêu của bài toán điều khiển robot là thiết kế tín hiệu $u(t)$ liên tục để điều khiển các biến khớp $q(t)$ của robot bám theo một quỹ đạo cho trước $q_d(t)$, giả sử quỹ đạo $q_d(t)$ thỏa mãn $q_d(t), \dot{q}_d^{(i)}(t) \in L_\infty$, với $i = 1, 2, 3$. Từ mục tiêu điều khiển, các sai số điều khiển và sai số điều khiển phụ trợ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} e_1 &\triangleq q_d - q, e_2 \triangleq \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1, \\ r &\triangleq \dot{e}_2 + \alpha_2 e_2 + M(q)^{-1} e_u. \end{aligned} \tag{2}$$

Với $\alpha_1, \alpha_2 \in R^+$ là các hằng số điều khiển dương và tín hiệu $e_u(t) \in R^n$ là tín hiệu phụ trợ bù trễ, được định nghĩa như sau:

$$e_u \triangleq - \int_{t-\tau(t)}^t \dot{u}(\theta) d\theta \tag{3}$$

Tín hiệu $e_u(t)$ là đại lượng trung gian có ý nghĩa dự đoán tín hiệu điều khiển $u(t)$, điều này sẽ được thể hiện ở bước phân tích ổn định tiếp theo, nhưng theo luật tích phân Leibniz, dễ nhận thấy đạo hàm theo thời gian của $e_u(t)$ là $\dot{e}_u = -\dot{u} + (1-\dot{\tau})\dot{u}_\tau$, như vậy $e_u(t)$ có tác dụng bổ sung tín hiệu điều khiển không có trễ vào bước phân tích ổn định cho hệ thống.

Dựa vào bước phân tích ổn định ở phần sau, tín hiệu điều khiển $u(t)$ được thiết kế như sau:

$$u \triangleq k(e_2 - e_{20}) + v \tag{4}$$

Trong đó, $e_{20} = e_2(0)$ và $v(t) \in R^n$ là nghiệm của phương trình vi phân sau đây:

$$\dot{v} = k(\alpha_2 e_2 + M(q)^{-1} e_u) \tag{5}$$

trong đó, $k \in R^+$ là hằng số điều khiển dương. Thành phần của tín hiệu điều khiển $u(t)$ bao gồm thành phần PI của luật điều khiển PID kết hợp với thành phần bù trễ. Do giả thiết rằng đo được hoàn toàn các biến trạng thái vị trí và vận tốc $q(t), \dot{q}(t)$, căn cứ vào định nghĩa (2)-(3), các sai số điều khiển e_1, e_2 là các tín hiệu đo được, nên có thể sử dụng để thiết kế điều khiển; còn tín hiệu r là tín hiệu không đo lường được, chỉ sử dụng trong quá trình phát triển luật điều khiển. Để nhận thấy đạo hàm theo thời gian của tín hiệu điều khiển $u(t)$ là $\dot{u}(t) = kr$.

Phương trình (1) của hệ hở được viết lại dựa trên phương trình (1)-(2) như sau:

$$M(q)r = M(q)\ddot{q}_d + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + d - u_\tau + e_u + \alpha_1 M(q)(e_2 - \alpha_1 e_1) + \alpha_2 M(q)e_2 \tag{6}$$

Lấy đạo hàm theo thời gian hai vế của phương trình (6) thu được phương trình sau:

$$M(q)\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{M}(q)r + N_d + \tilde{N} - e_2 - \dot{u}_\tau + (1-\dot{\tau})\dot{u}_\tau - \dot{u} \tag{7}$$

Tiếp tục thay đạo hàm của luật điều khiển ở (4)-(5) thu được phương trình của hệ đóng như sau:

$$M(q)\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{M}(q)r + N_d + \tilde{N} - e_2 - kr - \dot{u}_\tau \tag{8}$$

Trong đó, các hàm trung gian $N_d(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d, \ddot{q}_d, t) \in R^n$, $\tilde{N}(e_1, e_2, r, t) \in R^n$ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} N_d &= \dot{M}(q_d)\ddot{q}_d + M(q_d)\ddot{q}_d + \dot{V}_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d \\ &+ V_m(q_d, \dot{q}_d)\ddot{q}_d + \dot{G}(q_d) + \dot{d}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{N} = & \dot{M}(q)\ddot{q}_d - \dot{M}(q_d)\ddot{q}_d + M(q)\ddot{q}_d - M(q_d)\ddot{q}_d \\ & + \dot{V}_m(q, \dot{q})\dot{q} - \dot{V}_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + V_m(q, \dot{q})\ddot{q} + \dot{G}(q) \\ & - V_m(q_d, \dot{q}_d)\ddot{q}_d + \alpha_1 \dot{M}(q)(e_2 - \alpha_1 e_1) - \dot{G}(q_d) \\ & + \alpha_1 M(q)(\dot{e}_2 - \alpha_1 \dot{e}_1) + \alpha_2 \dot{M}(q)e_2 + \alpha_2 M(q)\dot{e}_2 \\ & - \frac{1}{2} \dot{M}(q)r + e_2. \end{aligned}$$

Việc phân chia các thừa số vào các cụm N_d và \tilde{N} là theo phương pháp thiết kế của bộ điều khiển RISE [9, 10]. Dựa vào các giả thiết 1-3, các hàm số N_d và \tilde{N} được đánh giá bị chặn như sau [9, 10]:

$$\|\tilde{N}\| \leq \rho(\|z\|)\|z\|, \quad \|N_d\| \leq \varepsilon_2 \tag{9}$$

trong đó, $z \triangleq [e_1^T \ e_2^T \ r^T \ e_u^T]^T \in R^{4n}$, $\varepsilon_2 \in R^+$ là hằng số dương xác định, $\rho(\|z\|) \in R^+$ là hàm số xác định dương, khả nghịch, không giảm.

Để thuận lợi cho bước phân tích ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov, các hàm số Lyapunov-Krasovskii xác định dương trung gian $P, Q \in R$ sau được định nghĩa như sau:

$$P \triangleq \omega_1 \int_{t-\tau}^t \left(\int_s^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \right) ds \tag{10}$$

$$Q \triangleq \frac{k}{2} \left(1 + \frac{\omega_2}{2\xi} \right) \int_{t-\tau}^t \|r(\theta)\|^2 d\theta \tag{11}$$

trong đó, $\omega_1, \omega_2, \xi \in R^+$ là các hằng số dương thay đổi được. Chọn miền $D \subset R^{4n+2}$ là miền bao gồm điểm $y(t) = 0$, trong đó $y(t) \in R^{4n+2}$ là tập hợp các biến sai số được định nghĩa như sau: $y \triangleq [z^T \ P \ Q]^T$.

4. PHÂN TÍCH ỔN ĐỊNH THEO TIÊU CHUẨN LYAPUNOV

Chọn hàm ứng viên Lyapunov $V_L(y, t) : D \times [0, \infty) \rightarrow R$ liên tục, xác định dương có dạng như sau:

$$V_L \triangleq \frac{1}{2} e_1^T e_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 + \frac{1}{2} r^T M(q)r + \frac{\omega_2}{2} e_u^T e_u + P + Q \tag{12}$$

Hàm ứng viên Lyapunov thỏa mãn điều kiện: $\lambda_1 \|y\|^2 \leq V_L \leq \lambda_2 \|y\|^2$, với $\lambda_1 \triangleq \min(\frac{1}{2}, \frac{m_1}{2}, \frac{\omega_2}{2})$, $\lambda_2 \triangleq \max(1, \frac{m_2}{2}, \frac{\omega_2}{2})$. Lấy đạo hàm theo thời gian hai vế của phương trình (12), thay (2), (3) và (8) vào ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L = & e_1^T (e_2 - \alpha_1 e_1) + e_2^T (r - \alpha_2 e_2 - M(q)^{-1} e_u) \\ & + \frac{1}{2} r^T \dot{M}(q)r + \omega_2 e_u^T (-\dot{u} + (1-\dot{\tau})\dot{u}_\tau) + \dot{P} + \dot{Q} \\ & + r^T \left(-\frac{1}{2} \dot{M}(q)r + N_d + \tilde{N} - e_2 - kr - \dot{\tau}r_\tau \right) \end{aligned} \tag{13}$$

Đạo hàm bậc nhất theo thời gian của (10)-(11) theo luật tích phân Leibniz được xác định như sau [11]:

$$\dot{Q} \triangleq \frac{k}{2} \left(1 + \frac{\omega_2}{2\xi} \right) \left(\|r\|^2 - (1-\dot{\tau})\|r_\tau\|^2 \right) \tag{14}$$

$$\begin{aligned} \dot{P} = & -\omega_1(1-\dot{\tau}) \int_{t-\tau}^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \\ & \leq -\frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2} \int_{t-\tau}^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta - \frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2T} \|e_u\|^2 \end{aligned} \tag{15}$$

Giản ước các thừa số chung, sử dụng bất đẳng thức: $e_1^T e_2 \leq \frac{1}{2} (\|e_1\|^2 + \|e_2\|^2)$, thay giả thiết 1, liên hệ $\dot{u} = kr$, và (9), (14)-(15) vào (13), ta được bất đẳng thức sau:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L \leq & -\left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \right) \|e_1\|^2 - \left(\alpha_2 - \frac{1}{2} \right) \|e_2\|^2 + \varepsilon_1 |e_2^T e_u| \\ & + k\omega_2 |e_u^T r| + k\omega_2(1-\dot{\tau}) |e_u^T r_\tau| + \varepsilon_2 \|r\| + |\dot{\tau}| k |r^T r_\tau| \\ & - k \|r\|^2 + \rho(\|z\|)\|z\|\|r\| - \frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2} \int_{t-\tau}^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \\ & - \frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2T} \|e_u\|^2 + \frac{k}{2} \left(1 + \frac{\omega_2}{2\xi} \right) \left(\|r\|^2 - (1-\dot{\tau})\|r_\tau\|^2 \right). \end{aligned}$$

Áp dụng giả thiết 3 và sử dụng bất đẳng thức Cauchy ta thu được:

$$\begin{aligned} |e_u^T r| \leq & \xi \|e_u\|^2 + \frac{1}{4\xi} \|r\|^2, \quad |e_u^T r_\tau| \leq \xi \|e_u\|^2 + \frac{1}{4\xi} \|r_\tau\|^2 \\ |r^T r_\tau| \leq & \frac{1}{2} \|r\|^2 + \frac{1}{2} \|r_\tau\|^2, \quad |\dot{\tau}| < 1 - \dot{\tau} \end{aligned} \tag{16}$$

Phân tích hằng số điều khiển k thành $k = k_1 + k_2 + k_3$ áp dụng (16) ta thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L \leq & -\left(\alpha_1 - \frac{1}{2} \right) \|e_1\|^2 - \left(k_1 - \frac{k}{2} \left(1 + |\dot{\tau}| + \frac{\omega_2}{\xi} \right) \right) \|r\|^2 \\ & - \left(\alpha_2 - \frac{1}{2} - \frac{\varepsilon_1^2 \gamma^2}{4} \right) \|e_2\|^2 - \frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2} \int_{t-\tau}^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \\ & - \left(\frac{\omega_1(1-\dot{\tau})}{2T} - k\omega_2 \xi (2-\dot{\tau}) \right) \|e_u\|^2 \\ & + \frac{\varepsilon_2^2}{4k_2} + \frac{\rho(\|z\|)^2 \|z\|^2}{4k_3} \end{aligned} \tag{17}$$

Các tham số điều khiển được lựa chọn thỏa mãn:

$$\begin{aligned} \alpha_2 > \frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1^2 \gamma^2}{4}, \quad \omega_1 > \frac{2Tk\omega_2 \xi (2-\dot{\tau})}{(1-\dot{\tau})}, \\ \alpha_1 > \frac{1}{2}, \quad k_1 > \frac{k}{2} \left(1 + |\dot{\tau}| + \frac{\omega_2}{\xi} \right) \end{aligned} \tag{18}$$

Ngoài ra sử dụng bất đẳng thức Cauchy-Schwartz, ta có bất đẳng thức:

$$\begin{aligned} \int_{t-\tau}^t \left(\int_s^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \right) ds \leq & \tau \sup_{s \in [t-\tau, t]} \left[\int_s^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \right] \\ = & \tau \int_{t-\tau}^t \|\dot{u}(\theta)\|^2 d\theta \end{aligned}$$

và sử dụng định nghĩa (10)-(11), thu được:

$$\dot{V}_L \leq -\left(\lambda - \frac{\rho(\|z\|)^2}{4k_3}\right)\|z\|^2 - \frac{(1-\tilde{\tau})}{4\tau}P + \frac{\epsilon_2^2}{4k_2} - \frac{\omega_1(1-\tilde{\tau})}{2 + \frac{\omega_2}{\xi}}Q \leq -\chi V_L + \frac{\epsilon_2^2}{4k_2} \tag{19}$$

Trong đó:

$$\lambda \triangleq \min \left(\alpha_2 - \frac{1}{2} - \frac{\epsilon_1^2 \gamma^2}{4}, k_1 - \frac{k}{2} \left(1 + |\tilde{\tau}| + \frac{\omega_2}{\xi} \right), \alpha_1 - \frac{1}{2}, \left(\frac{\omega_1(1-\tilde{\tau})}{2T} - k\omega_2\xi(2-\tilde{\tau}) \right) \right)$$

$$\text{và } \chi \triangleq \min \left(\lambda - \frac{\rho(\|z\|)^2}{4k_3}, \frac{(1-\tilde{\tau})}{4\tau}, k_1, \frac{\omega_1(1-\tilde{\tau})}{2 + \frac{\omega_2}{\xi}} \right)$$

Theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov, từ bất đẳng thức (19), điều này chứng tỏ tất cả các sai số điều khiển e_1, e_2, r, e_u đều bị chặn. Điều này có nghĩa nếu sử dụng bộ điều khiển được thiết kế trong (4) với các tham số điều khiển được lựa chọn thỏa mãn yêu cầu (18) thì có thể đảm bảo sai số bám quỹ đạo của hệ phi tuyến bất định chịu tác động của nhiễu và trễ biến thiên (1) nằm trong khoảng bị chặn, trong đó có thể giảm khoảng bị chặn của sai số điều khiển bằng cách tăng dần các tham số điều khiển. Kết quả ổn định dạng UUB.

5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Hiệu quả của bộ điều khiển đưa ra được kiểm chứng qua chương trình mô phỏng được xây dựng trên phần mềm Matlab cho robot 2 bậc tự do có phương trình động lực học như (1) với:

$$M = \begin{bmatrix} p_1 + 2p_3c_2 & p_1 + p_3c_2 \\ p_1 + p_3c_2 & p_2 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} f_{d1}\dot{q}_1 \\ f_{d2}\dot{q}_2 \end{bmatrix}, V_m = \begin{bmatrix} -p_3s_2\dot{q}_2 & -p_3s_2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ p_3s_2\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}, \text{ và } d = \begin{bmatrix} 0,2\sin(t/2) \\ 0,1\sin(t/4) \end{bmatrix}$$

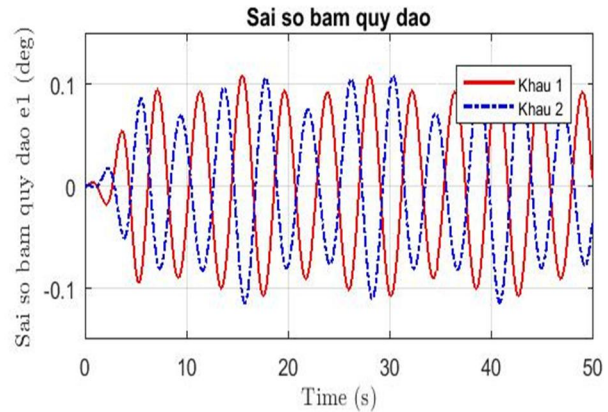
với $c_2 \triangleq \cos(q_2), s_2 \triangleq \sin(q_2)$ và các tham số của hệ thống là $p_1 = 3,473\text{kgm}^2, p_2 = 0,196\text{kgm}^2, p_3 = 0,242\text{kgm}^2, f_{d1} = 5,3\text{Nm.sec}, f_{d2} = 1,1\text{Nm.sec}$ và điều kiện đầu của hệ là $q(0) = [0, 0]^T, \dot{q}(0) = [0, 0]^T$.

Quỹ đạo mong muốn có dạng sau:

Các tham số điều khiển được lựa chọn như sau: $k = \text{diag}([100,65]), \alpha_1 = \text{diag}([4,8]), \alpha_2 = \text{diag}([14,10])$.

Để minh họa cho hiệu quả của phương pháp điều khiển được giới thiệu, thực hiện mô phỏng với thời gian trễ dạng hàm sin với nhiều biên độ và tần số khác nhau. Hình 1 biểu diễn sai số bám quỹ đạo $e_1(t)$ của robot trong trường hợp thời gian trễ là: $\tau(t) = 5\sin(t/2) + 20(\text{ms})$. Với từng trường hợp mô phỏng, giá trị bình phương trung bình (RMS) của sai số bám quỹ đạo được xác định trong bảng 1. Kết quả

mô phỏng chỉ ra rõ ràng sai số bám quỹ đạo sẽ càng nhỏ với trường hợp thời gian trễ càng nhỏ và càng chậm.



Hình 1. Sai số bám quỹ đạo trong trường hợp trễ: $\tau(t) = 5\sin(t/2) + 20(\text{ms})$

Bảng 1. Sai số bình phương trung bình (RMS) của các khâu robot với các trường hợp khác nhau của trễ

Thời gian trễ $\tau(t)$ (ms)	RMS sai số bám quỹ đạo khâu 1 (deg)	RMS sai số bám quỹ đạo khâu 2 (deg)
$2\sin(t/10) + 5$	0,0528	0,0266
$2\sin(t/10) + 10$	0,0571	0,0356
$5\sin(t/2) + 10$	0,0566	0,0358
$5\sin(t/2) + 20$	0,0705	0,0655

Phương pháp điều khiển trong bài báo này được phát triển với giả thiết rằng thời gian trễ xác định hoàn toàn. Tuy nhiên, để kiểm tra tính bền vững của thuật toán điều khiển, ta thực hiện các mô phỏng với sự thay đổi của tham số thời gian trễ. Thời gian trễ đưa vào bộ điều khiển sẽ khác với thời gian trễ thực của hệ thống. Lựa chọn thời gian trễ đưa vào bộ điều khiển là $\tau(t) = A\sin(t/B) + C$ (ms) với $A = 5, B = 2, C = 10$. Bảng 2 đưa ra kết quả mô phỏng với các trường hợp khác nhau của trễ thực $\tau'(t) = A'\sin(t/B) + C'$ (ms) với sự thay đổi của biên độ A và độ dịch C . Nhận thấy kết quả sai số bám quỹ đạo không thay đổi nhiều. Như vậy, phương pháp điều khiển này về mặt lý thuyết đòi hỏi thời gian trễ xác định hoàn toàn, nhưng mô phỏng chỉ ra kết quả mô phỏng bền vững với sự thay đổi trong khoảng 30% của biên độ và độ dịch của thời gian trễ. Tuy nhiên, sự khác biệt trong tần số B có thể dẫn tới sự mất ổn định của hệ thống.

Bảng 2. Sai số bình phương trung bình (RMS) của các khâu trong trường hợp trễ không xác định

Thay đổi trong thời gian trễ $\tau'(t)$ (ms)	RMS sai số bám quỹ đạo khâu 1 (deg)	RMS sai số bám quỹ đạo khâu 2 (deg)
$A' = 70\%A$	0,0549	0,0339
$A' = 90\%A$	0,0551	0,0342
$A' = 110\%A$	0,0551	0,0341
$A' = 130\%A$	0,0550	0,0340
$C' = 130\%C$	0,0547	0,0339
$A' = 110\%A$ $C' = 130\%C$	0,0548	0,0339

6. KẾT LUẬN

Một phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho cánh tay robot xét tới trễ biến thiên của tín hiệu đầu vào đã được giới thiệu trong bài báo. Phương trình động lực học của robot mang bản chất phi tuyến, không xác định và có tác động của nhiễu ngoài. Tín hiệu điều khiển được thiết kế bao gồm thành phần PI của luật điều khiển PID kết hợp với thành phần bù trễ. Tín hiệu điều khiển này là liên tục và được chứng minh rằng có sai số điều khiển nằm trong giới hạn bị chặn. Bước phân tích ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov được sử dụng để chứng minh cho cơ sở toán học của thiết kế bộ điều khiển và kết quả mô phỏng trên Matlab đã minh họa cho hiệu quả của phương pháp. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là thời gian trễ đòi hỏi xác định.

[9]. H. T. Dinh, R. Kamalapurkar, S. Bhasin và W. E. Dixon, 2014. *Dynamic Neural Network-based Robust Observers for Uncertain Nonlinear Systems*. Neural Networks, pp. 44-52.

[10]. Đinh Thị Thanh Huyền, 2013. *Thiết kế và mô phỏng thuật toán điều khiển RISE kết hợp mạng Neuron Network cho mô hình Robot*. Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, Số đặc biệt - 10/2013, trang 321-324.

[11]. H. T. Dinh, N. Fischer, R. Kamalapurkar, and W. E. Dixon, 2013. *Output Feedback Control for Uncertain Nonlinear Systems with Slowly Varying Input Delay*. 2013 American Control Conference, Washington DC, USA, pp. 1748-1753.

AUTHOR INFORMATION

Đinh Thị Thanh Huyền

Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. X. Li và C. de Souza, 1997. *Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: a linear matrix inequality approach*. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 42, no. 8, pp. 1144-1148.

[2]. V. B. Kolmanovskii, S.-I. Niculescu, và J.-P. Richard, 1999. *On the liapunov-krasovskii functionals for stability analysis of linear delay systems*. Int. J. Control, vol. 72, pp. 374 - 384.

[3]. B. S. Razumikhin, 1960. *Application of liapunov's method to problems in the stability of systems with a delay*. Automat. i Telemekh, vol. 21, pp. 740-749.

[4]. M. Jankovic, 2001. *Control Lyapunov-Razumikhin functions and robust stabilization of time delay systems*. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 46, no. 7, pp. 1048-1060.

[5]. F. Mazenc, S. Mondie, R. Francisco, P. Conge, I. Lorraine, và F. Metz, 2004. *Global asymptotic stabilization of feedforward systems with delay in the input*. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 49, (5), pp. 844-850.

[6]. B. Chen, X. Liu, và S. Tong, 2008. *Robust fuzzy control of nonlinear systems with input delay*. Chaos, Solitons & Fractals, vol. 37, no. 3, pp. 894-901.

[7]. M. Krstic, 2010. *Input delay compensation for forward complete and strictfeedforward nonlinear systems*. IEEE Trans. Autom. Control, vol. 55, pp. 287-303.

[8]. N. Sharma, S. Bhasin, Q. Wang, và W. E. Dixon, 2011. *Predictor-based control for an uncertain Euler-Lagrange system with input delay*. Automatica, vol. 47, no. 11, pp. 2332-2342.