

Điều khiển cuộn chiếu dựa trên thuật toán thích nghi Li - Slotine cho robot khớp mềm SEA

Adaptive Li-Slotine based backstepping control for series elastic actuator robot

Dương Minh Đức^{1*}, Trần Thanh Tùng¹

¹Khoa Tự động hóa, Trường Điện - Điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội

*Corresponding author E-mail: duc.duongminh@hust.edu.vn

Abstract

Series elastic actuator (SEA) has been widely seen in various fields, including the industrial and rehabilitation fields. This is due to the need for safety in human-robot interactions. However, a challenge that the SEA robotic arm faces is the robot's vibration due to the flexibility of the joints. This leads to a decrease in accuracy when controlling the robot's position. This article proposes a Li-Slotine based backstepping control algorithm to address this issue. At first, the Li-Slotine based controller is designed for the rigid joint robot. Next, the backstepping technique is used to design the controller for the SEA robot. The designed algorithm guarantees the system stability, and the vibration of the robot joints is suppressed. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Series elastic actuator, backstepping control, Li - Slotine control, adaptive control, flexible system

Tóm tắt

Sự phổ biến cánh tay robot khớp mềm đang được thấy rõ trong nhiều lĩnh vực khác nhau, bao gồm công nghiệp và y tế phục hồi chức năng. Điều này đến từ yêu cầu về an toàn trong việc tương tác giữa con người và robot. Tuy nhiên, một vấn đề gặp phải với cánh tay robot khớp mềm là sự dao động của robot do tính linh hoạt của các khớp. Điều này gây ra suy giảm trong độ chính xác khi điều khiển vị trí của robot. Bài báo này đề xuất một thuật toán điều khiển cuộn chiếu dựa trên thuật toán thích nghi Li-Slotine để giải quyết vấn đề này. Đầu tiên bộ điều khiển thích nghi Li - Slotine được thiết kế cho phần động lực học cánh tay, tiếp đó kỹ thuật Backstepping được sử dụng thiết kế luật điều khiển đưa vào robot khớp mềm SEA. Thuật toán này được thiết kế để cải thiện độ chính xác trong việc điều khiển vị trí của cánh tay robot khớp mềm. Kết quả mô phỏng đã cho thấy rõ hiệu quả của phương pháp đề xuất.

1. Giới thiệu

Hiện nay với xu thế phát triển của xã hội, có rất nhiều loại robot đang ngày càng tiên tiến, robot trở thành công cụ không thể thiếu trong các nhà máy, xí nghiệp hay trong các lĩnh vực khoa học như y tế, sinh học,... có mức độ tự động hóa cao. Trong số đó đặc biệt hơn cả phải kể tới robot khớp mềm SEA (Series Elastic Actuator - SEA) [1], với ưu điểm an toàn trong tương tác vật lý giữa con người và người máy [2]–[4]. Sự khác biệt giữa robot khớp mềm SEA và robot truyền thống là hệ thống robot khớp mềm SEA sử dụng lò xo làm cơ chế truyền lực từ động cơ tới thanh nối robot. Cơ chế hoạt động của robot khớp mềm khá phức tạp vì nó là sự kết hợp của ba yếu tố: tỷ số truyền, độ đàn hồi của lò xo và tốc độ động cơ và mô-men

xoắn. Chính mối quan hệ chặt chẽ của các yếu tố đã làm cho robot khớp mềm SEA dần trở thành robot được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực đòi hỏi độ chính xác cao như y tế, kỹ thuật, robot dạng người,... Cũng chính vì hệ thống lò xo đàn hồi này khiến cho robot khớp mềm SEA bị dao động trong quá trình chuyển động dẫn đến suy giảm độ chính xác trong điều khiển vị trí của robot. Vì vậy đã có rất nhiều đề tài nghiên cứu được đề xuất để giúp robot khớp mềm SEA được vận hành tốt hơn.

Nhiều thuật toán điều khiển khác nhau đã được giới thiệu để kiểm soát và điều khiển các hệ thống robot khớp mềm SEA và đạt được hiệu quả nhất định [5], [6]. Một vài nghiên cứu gần đây tổng hợp bộ điều khiển áp dụng kỹ thuật điều khiển phi tuyến như điều khiển trượt [7], [8], điều khiển cuộn chiếu backstepping [9],... cho hệ thống robot khớp mềm SEA. Nhưng các luật điều khiển này chưa hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu của hệ thống như với bộ điều khiển cuộn chiếu backstepping luôn đòi hỏi tham số mô hình chính xác, bộ điều khiển trượt luôn tồn tại nhược điểm xảy ra hiện tượng “chattering” và cũng phụ thuộc tham số mô hình.

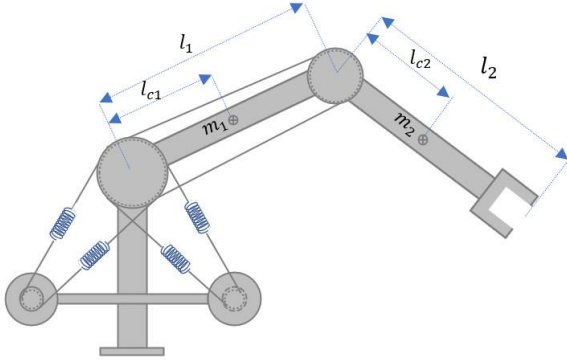
Trong bài báo này để giải quyết các vấn đề trên, chúng tôi đề xuất phương pháp thiết kế điều khiển thích nghi Li-Slotine dựa trên kỹ thuật cuộn chiếu áp dụng với mô hình robot khớp mềm. Luật thích nghi Li-Slotine cho phép hệ thống có thể thích nghi với sự thay đổi thông số mô hình. Kỹ thuật thiết kế cuộn chiếu cho phép dễ dàng thiết kế bộ điều khiển kết hợp với luật thích nghi Li-Slotine. Các kết quả nghiên cứu được kiểm chứng thông qua mô phỏng số.

Phần còn lại của bài báo bao gồm những phần: Mô hình toán học của robot khớp mềm SEA được trình bày trong phần

2. Trong phần 3, quy trình thiết kế bộ điều khiển sẽ được diễn giải chi tiết. Việc chứng minh tính ổn định của hệ thống sử dụng bộ điều khiển đề xuất cũng được trình bày trong phần này. Các kết quả mô phỏng kiểm chứng thuật toán điều khiển đề xuất được mô tả trong phần 4. Kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo được trình bày trong phần 5.

2. Mô hình toán học

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng mô hình cánh tay robot đàn hồi hai khớp, với cơ cấu khớp và lò xo được thiết kế như trong Hình 1. Các kết quả của bài báo hoàn toàn có thể mở rộng ra cho robot N khớp.



Hình 1: Mô hình cánh tay robot khớp mềm hai bậc tự do

Đặt là $q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$ vector góc khớp của cánh tay robot, $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ biểu diễn vector góc của động cơ, khi đó động năng của hệ được tính như sau:

$$W_d = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \theta^T J \theta \quad (1)$$

Trong đó $D(q)$ là ma trận quán tính của liên kết và J là ma trận quán tính của động cơ được xác định lần lượt như sau:

$$D(q) = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos q_2) & a \\ a & m_2 l_{c2}^2 \end{bmatrix}$$

với $a = m_2 (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos q_2)$, và $J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}$

Ý nghĩa của các ký hiệu như sau:

m_1 : khối lượng liên kết thứ nhất (kg)

m_2 : khối lượng liên kết thứ hai (kg)

l_1 : chiều dài liên kết thứ nhất (m)

l_2 : chiều dài liên kết thứ hai (m)

l_{c1} : chiều dài góc tọa độ đến tâm liên kết thứ nhất (m)

l_{c2} : chiều dài góc tọa độ đến tâm liên kết thứ hai (m)

Thế năng của hệ bao gồm thế năng trọng trường và thế năng đàn hồi được xác định:

$$P = p(q) + \frac{1}{2} (q - \theta)^T K_s (q - \theta) \quad (2)$$

Trong đó $K_s = \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2} \end{bmatrix}$ là ma trận độ cứng lò xo, và $p(q)$ là thế năng trọng trường,

$$p(q) = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \sin q_1.$$

Sử dụng phương pháp Lagrange với $L = W_d - P$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = u \quad (3)$$

Sau đó phương trình động lực học của hệ được xác định như sau:

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = K_s (\theta - q) \quad (4)$$

$$J \ddot{\theta} + K_s (\theta - q) = u \quad (5)$$

Trong đó thành phần ma trận trọng trường $G(q)$ được biểu diễn:

$$G(q) = \begin{bmatrix} g \cos(q_1) (m_1 l_{c1} + m_2 l_1 + m_2 g l_{c2} \cos(q_1 + q_2)) \\ m_2 g l_{c2} \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}$$

Và thành phần ma trận Coriolis và hướng tâm có dạng:

$$C = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Thiết kế bộ điều khiển

Xét mô hình toán học của hệ robot khớp mềm N bậc tự do như sau:

$$\begin{cases} D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = K_s (\theta - q) \\ J \ddot{\theta} + K_s (\theta - q) = u \end{cases} \quad (6)$$

Do xuất hiện khâu liên kết mềm (lò xo), góc động cơ θ sẽ không giống với góc khớp q . Mục tiêu điều khiển là làm cho θ hội tụ đến một hàm (giả sử θ_d), đồng thời θ được áp dụng làm đầu vào cho động lực liên kết, sẽ điều khiển q tiến đến q_d . Từ những phân tích trên, ta đưa ra phương án sử dụng kỹ thuật cuốn chiếu để thiết kế điều khiển cho robot khớp mềm SEA. Robot sẽ được xem xét như robot khớp cứng và bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine sẽ được thiết kế cho robot. Sau đó kỹ thuật cuốn chiếu được áp dụng để thiết kế ra bộ điều khiển cuối cùng.

3.1. Thuật toán Li-Slotine

Xét phương trình động lực học của tay máy có các tham số hằng bất định với đầu vào U_R . Phương trình động lực học của robot được viết dưới dạng:

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = U_R \quad (7)$$

Đặt sai lệch vị trí (q_d vị trí đặt) và sai lệch vận tốc trong không gian khớp là:

$$e_q = q_d - q; \quad \dot{e}_q = \dot{q}_d - \dot{q}$$

Sử dụng bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine như sau[10]:

$$\begin{aligned} U_R &= \widehat{D}(q) \dot{v} + \widehat{C}(q, \dot{q}) v + \widehat{G}(q) - \eta_d r \\ &= Y(q, \dot{q}, v, \dot{v}) \hat{p} - \eta_d r \end{aligned} \quad (8)$$

Trong đó:

- $\widehat{D}(q), \widehat{C}(q, \dot{q}), \widehat{G}(q)$ là các thành phần ước lượng của $D(q), C(q, \dot{q}), G(q)$,
- $v = \dot{q}_d + \Lambda(q_d - q) = \dot{q}_d + \Lambda e_q$,
- $r = \dot{e}_q + \Lambda e_q = \dot{q}_d - \dot{q} + \Lambda(q_d - q) = v - \dot{q}$,
- η_d ma trận đối xứng, xác định dương tùy chọn,

- $\Lambda = \text{diag}(\lambda_i)$ ma trận đường chéo xác định dương,
- \hat{p} là ước lượng ma trận tham số mô hình p với p được biểu diễn với robot 2 bậc tự do như sau [11]:

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{c2}^2) \\ m_2 l_1 l_{c2} \\ m_2 l_{c2}^2 \\ m_1 l_{c1} + m_2 l_1 \\ m_2 l_{c2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

- $Y(q, \dot{q}, v, \hat{v})$ viết gọn $Y(\cdot)$ và được mô tả với robot 2 bậc tự do như sau [11]:

$$Y(\cdot) = \begin{bmatrix} \dot{v}_1 & \cos q_2 (2\dot{v}_1 + \dot{v}_2) - \sin q_2 (\dot{q}_2 v_1 + \dot{q}_1 v_2 + \dot{q}_2 v_2) & \dot{v}_2 & g \cos q_1 & g \cos(q_1 + q_2) \\ 0 & \dot{v}_1 \cos q_2 + \dot{q}_1 v_1 \sin q_2 & \dot{v}_1 + \dot{v}_2 & 0 & g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Với luật điều khiển (8) ta có phương trình động lực học kín của hệ thống:

$$D\ddot{q} + C\dot{q} + G = \hat{D}\dot{v} + \hat{C}v + \hat{G} - \eta_d r \quad (11)$$

$$\text{Đặt: } \begin{cases} \ddot{q} = \dot{v} - \dot{r} \\ \dot{q} = v - r \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{r} = \dot{v} - \ddot{q} \\ r = v - \dot{q} \end{cases}$$

và sai lệch giữa các giá trị thật và giá trị ước lượng như sau:
 $\tilde{D} = D - \hat{D}$; $\tilde{C} = C - \hat{C}$; $\tilde{G} = G - \hat{G}$; $\tilde{p} = p - \hat{p}$;

Với việc đặt như vậy phương trình động lực học kín của hệ thống robot trở thành:

$$D\dot{r} + Cr + \eta_d r = \tilde{D}\dot{v} + \tilde{C}v + \tilde{G} = Y(q, \dot{q}, v, \hat{v})\tilde{p} \quad (12)$$

Nhân hai vế phương trình với r^T ta được:

$$r^T D\dot{r} + r^T Cr + r^T \eta_d r = r^T Y(q, \dot{q}, v, \hat{v})\tilde{p} \quad (13)$$

Mặt khác trong robot ma trận $C - \frac{1}{2}\dot{D}$ là ma trận phản đối xứng (skew-symmetric), nghĩa là $r^T (C - \frac{1}{2}\dot{D})r = 0$. Do đó $r^T Cr = \frac{1}{2}r^T \dot{D}r$. Phương trình (12) trở thành:

$$\begin{aligned} & r^T D\dot{r} + \frac{1}{2}r^T \dot{D}r + r^T \eta_d r = r^T Y(q, \dot{q}, v, \hat{v})\tilde{p} \\ \Leftrightarrow & \frac{1}{2}r^T D\dot{r} + \frac{1}{2}r^T \dot{D}r + \frac{1}{2}\dot{r}^T Dr \\ & \quad + (\dot{e}_q + \Lambda e_q)^T \eta_d (\dot{e}_q + \Lambda e_q) \\ & \quad = r^T Y(\cdot)\tilde{p} \\ \Leftrightarrow & \frac{1}{2}r^T D\dot{r} + \frac{1}{2}r^T \dot{D}r + \frac{1}{2}\dot{r}^T Dr + \dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q + \dot{e}_q^T \eta_d \Lambda e_q \\ & \quad + \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \dot{e}_q + \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q \\ & \quad = r^T Y(\cdot)\tilde{p} \\ \Leftrightarrow & \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}r^T Dr + \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d e_q \right) \\ & \quad = -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q \\ & \quad + r^T Y(\cdot)\tilde{p} \end{aligned}$$

Đề xuất hàm Lyapunov như sau:

$$V_R = \frac{1}{2}r^T Dr + \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d e_q + \frac{1}{2}\tilde{p}^T \Gamma^{-1} \tilde{p} \quad (14)$$

Khi đó

$$\dot{V}_R = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}r^T Dr + \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d e_q \right) + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} \quad (15)$$

$$\dot{V}_R = -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + r^T Y(\cdot)\tilde{p} + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}}$$

Để $\dot{V} \leq 0$ ta chọn $r^T Y(\cdot)\tilde{p} + \tilde{p}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{p}} = 0$

Hay, $\tilde{p}^T (Y^T r - \Gamma^{-1}(\dot{\tilde{p}} - \dot{\tilde{p}})) = 0$

Do ma trận tham số mô hình là hằng số $p = \text{const}$ nên $\dot{\tilde{p}} = 0$, từ đó ta có được luật cập nhật tham số mô hình như sau:

$$\dot{\tilde{p}} = -\tilde{p} = \Gamma Y^T r$$

3.2. Thiết kế điều khiển sử dụng kỹ thuật cuộn chiếu

Từ (6) ta viết lại phương trình động lực học robot khớp mềm như sau:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + K_s q = K_s \theta \quad (16a)$$

$$J\ddot{\theta} + K_s(\theta - q) = u \quad (16b)$$

Đặt $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\theta}$.

Bước 1: Giả sử x_1 là tín hiệu đầu vào điều khiển trong phương trình (16a). Chọn tín hiệu điều khiển ảo như sau:

$$x_{1d} = K_s U_R + q \quad (17)$$

Khi đó với luật điều khiển Li-Slotine, $q \rightarrow q_d$.

Bước 2: Để $x_1 \rightarrow x_{1d}$, ta đặt biến sai lệch $e_1 = x_1 - x_{1d}$. Chọn hàm Lyapunov

$$V_1 = V_R + \frac{1}{2}e_1^T e_1 \quad (18)$$

Đạo hàm V_1 thu được:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_R + e_1^T \dot{e}_1 \quad (19)$$

$$\dot{V}_1 = -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (x_2 - \dot{x}_{1d})$$

Để $\dot{V}_1 \leq 0$ ta cần có $x_2 - \dot{x}_{1d} = -K_1 e_1$ với K_1 là ma trận đường chéo xác định dương. Suy ra ta có luật điều khiển ảo như sau:

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} - K_1 e_1 \quad (20)$$

Bước 3: Để $x_2 \rightarrow x_{2d}$, ta đặt biến sai lệch $e_2 = x_2 - x_{2d}$, khi đó:

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2d} = J^{-1}(u - K_s(x_1 - q)) - \dot{x}_{2d} \quad (21)$$

Đạo hàm của V_1 được tính như sau:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (x_2 - \dot{x}_{1d}) \\
&= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (x_{2d} + e_2 - \dot{x}_{1d}) \\
&= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (\dot{x}_{1d} - K_1 e_1 + e_2 - \dot{x}_{1d}) \\
&= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (-K_1 e_1 + e_2)
\end{aligned}$$

Chọn hàm Lyapunov

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^T e_2 \quad (22)$$

Đạo hàm V_2 ta được

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2^T \dot{e}_2 \\
&= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q + e_1^T (-K_1 e_1 + e_2) + e_2^T \dot{e}_2 \\
&= -\dot{e}_q^T \eta_d \dot{e}_q - \dot{e}_q^T \Lambda^T \eta_d \Lambda e_q - e_1^T K_1 e_1 \\
&\quad + e_2^T (e_1 + J^{-1}(u - K_s(x_1 - q)) - \dot{x}_{2d})
\end{aligned}$$

Để $V_2 \leq 0$ cần $J^{-1}(u - K_s(x_1 - q)) - \dot{x}_{2d} + e_1 = -K_2 e_2$ với K_2 là ma trận đường chéo xác định dương.

Từ đó chúng ta đề xuất luật điều khiển như sau:

$$u = J(\dot{x}_{2d} - e_1 - K_2 e_2) + K_s(x_1 - q) \quad (23)$$

4. Kết quả mô phỏng

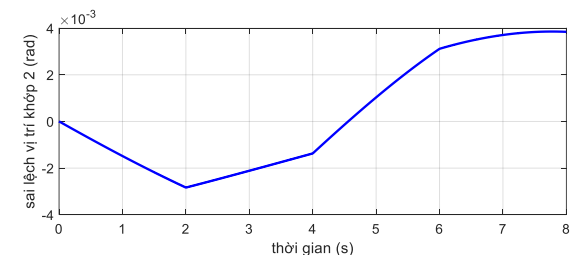
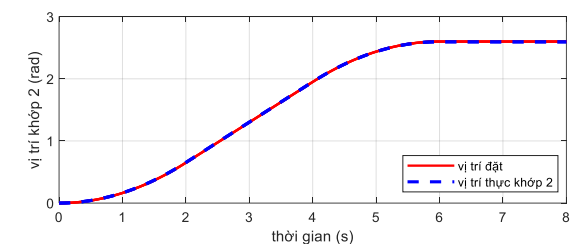
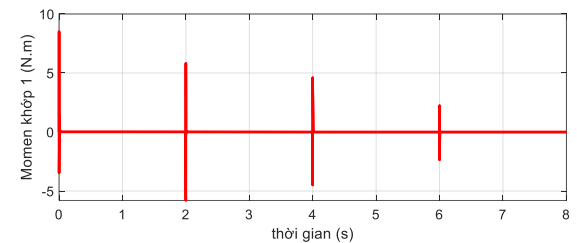
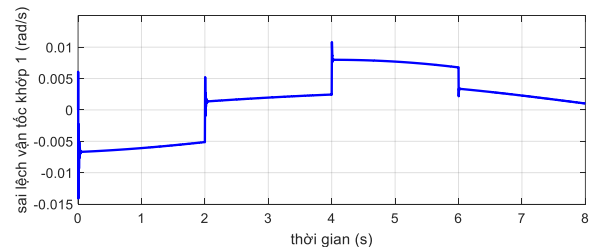
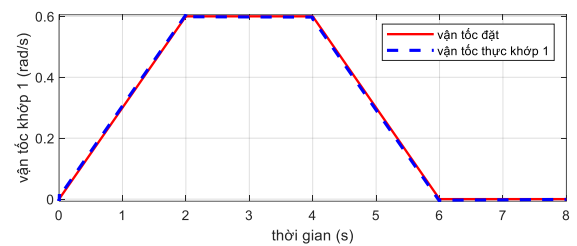
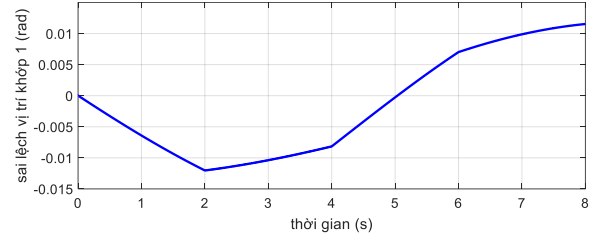
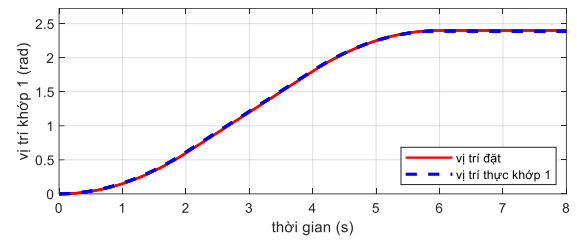
Để kiểm nghiệm hiệu quả của thuật toán điều khiển đề xuất, mô phỏng trên Matlab-Simulink được tiến hành. Trong mô phỏng này, chúng tôi sử dụng mô hình robot khớp mềm hai bậc tự do với các số mô hình được thể hiện ở bảng sau:

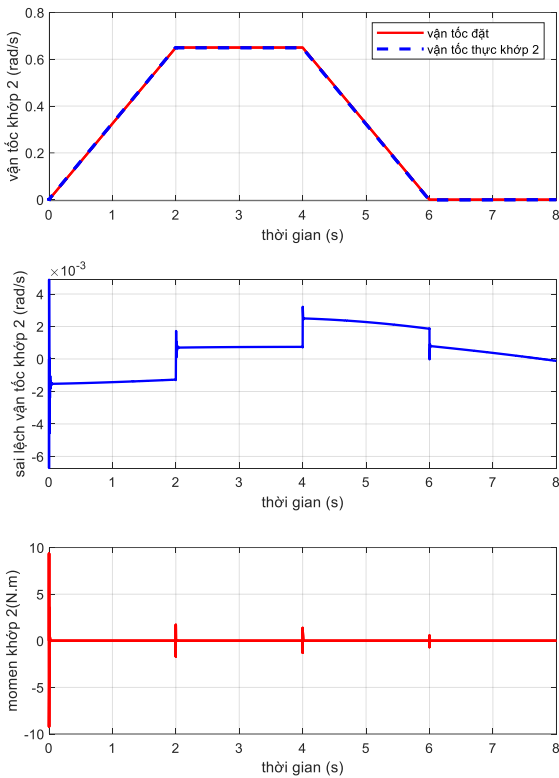
Bảng 1: Thông số mô hình hệ thống robot khớp mềm

Thông số \ Khớp	Khớp 1	Khớp 2
Độ cứng lò xo $K(N/m)$	$K_{s1} = 40$	$K_{s2} = 25$
Độ dài liên kết $l(m)$	$l_1 = 0.25$	$l_2 = 0.25$
Độ dài tâm $l_c(m)$	$l_{c1} = 0.125$	$l_{c2} = 0.125$
Momen quán tính động cơ $J(kg/m^2)$	$J_1 = 0.0185$	$J_2 = 0.0218$

Để đánh giá chất lượng bộ điều khiển, bài báo kiểm chứng tính ổn định, khả năng bám tín hiệu đặt trong trường hợp có tồn tại sai lệch mô hình hệ thống. Giả sử chúng ta điều khiển cánh tay robot từ vị trí đầu tiên $q_0 = [0 \ 0]^T (rad)$ chuyển động dọc theo quỹ đạo 2-1-2 đến vị trí cuối $q_c = [2.4 \ 2.6]^T (rad)$. Mô phỏng được thực hiện với 2 trường hợp là mô hình thông số lý tưởng và mô hình có sai lệch thông số mô hình.

4.1. Với trường hợp mô hình lý tưởng





Hình 2: Kết quả mô phỏng trong trường hợp không có sai lệch mô hình

Trong trường hợp với mô hình lý tưởng, đáp ứng vị trí và tốc độ vẫn ổn định và bám theo tín hiệu đặt cho thấy bộ điều khiển phù hợp với mô hình hệ thống như trong hình 2. Sai lệch vị trí các khớp rất nhỏ (nhỏ hơn 0,015 (rad) với khớp 1 và 0,004 (rad) với khớp 2). Có thể thấy tín hiệu mô men các khớp tăng đột biến tại các điểm gia tốc thay đổi đột ngột. Điều này là do thành phần đạo hàm trong thuật toán điều khiển. Ở đây các thông số điều khiển được chọn sao cho biên độ đầu vào không quá lớn.

4.2. Với trường hợp sai lệch mô hình 10%

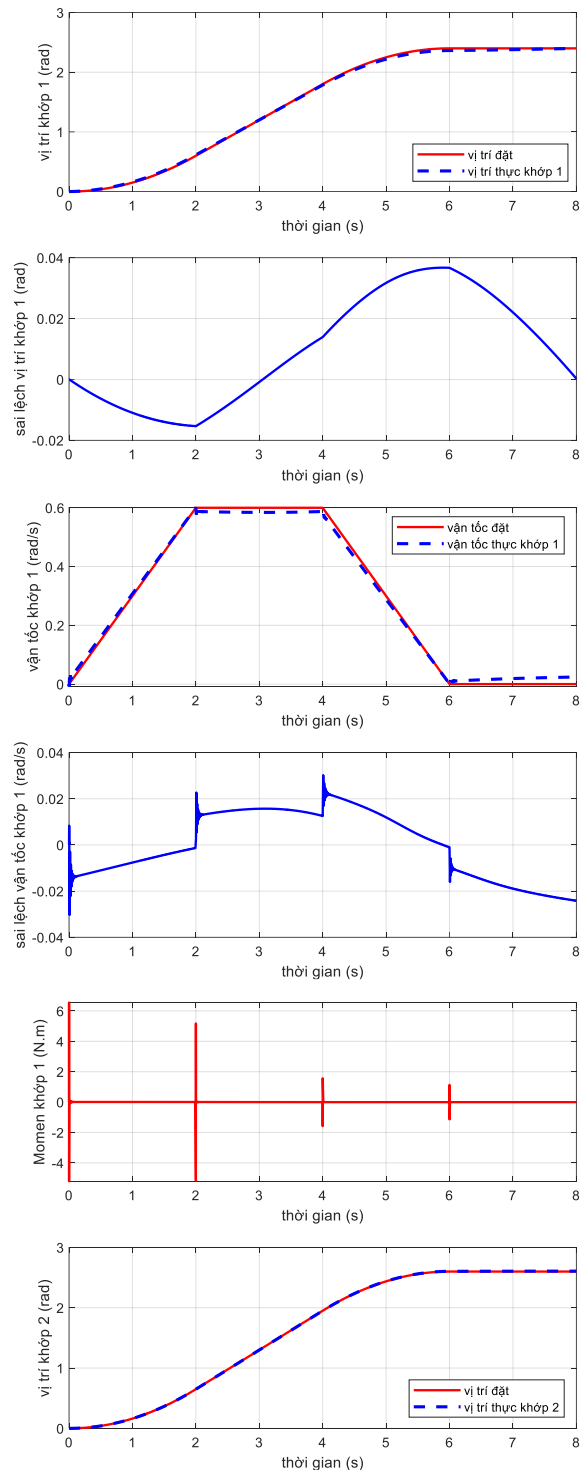
Trong trường hợp với sai lệch tham số mô hình 10%, đáp ứng vị trí và tốc độ vẫn ổn định và bám theo tín hiệu đặt cho thấy chất lượng bộ điều khiển rất tốt, đáp ứng được với sai lệch mô hình như thấy trong hình 3. Sai lệch vị trí tối đa lúc này là khoảng 0,04 (rad) với khớp 1 và 0,007 (rad) với khớp hai. Như vậy thuật toán điều khiển đề xuất đã chứng tỏ khả năng thích nghi với sự thay đổi của mô hình đối tượng. Thuật toán thích nghi Li - Slotine kết hợp điều khiển cuốn chiếu được đề xuất cho robot khớp mềm một lần nữa khẳng định tính chính xác và tính phù hợp trong trường hợp này.

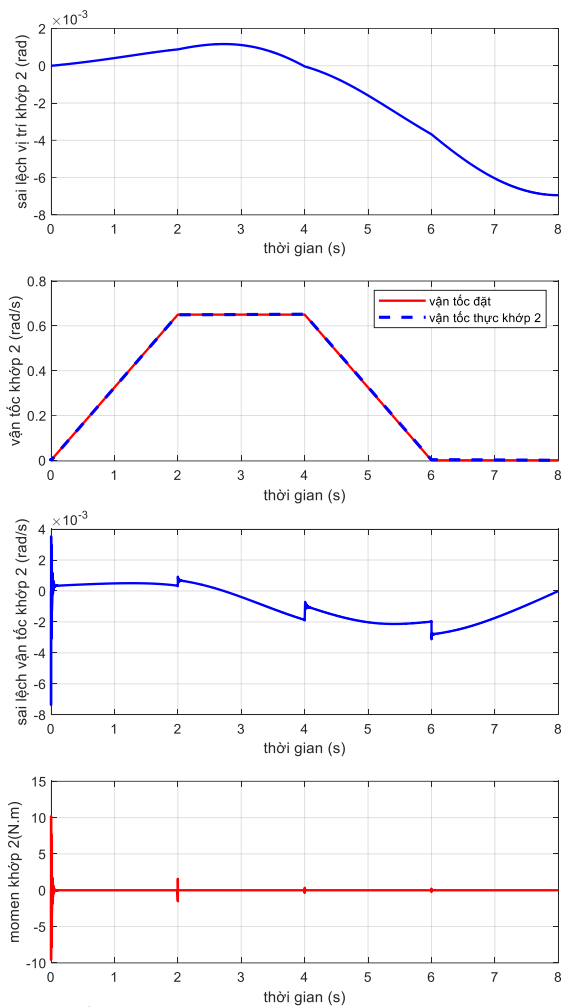
Để kiểm chứng khả năng của thuật toán đề xuất, sai lệch mô hình đến 50% đã được xem xét. Kết quả cho thấy hệ thống vẫn làm việc ổn định khi có sai lệch mô hình. Tuy nhiên khi sai lệch mô hình tăng lên thì sai lệch tối đa giữa vị trí đặt và vị trí thực cũng tăng lên.

5. Kết luận

Bài báo trình bày điều khiển vị trí của robot khớp mềm sử dụng thuật toán điều khiển thích nghi Li - Slotine kết hợp với kỹ thuật thiết kế điều khiển cuốn chiếu. Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển cho chất lượng điều khiển tốt ngay cả

khi mô hình hệ thống tồn tại sai lệch. Trong tương lai, thuật toán điều khiển đề xuất sẽ được so sánh với các thuật toán điều khiển trước đây để có được một cái nhìn chính xác hơn về hiệu quả của thuật toán đề xuất. Hiện tượng xuất hiện thành phần đạo hàm trong thuật toán điều khiển cũng cần phải xem xét, mà một trong những giải pháp là sử dụng bộ lọc thông thấp thay thế. Các thực nghiệm trên robot khớp mềm SEA thực tế cũng sẽ được tiến hành. Thêm vào đó, bài toán kết hợp điều khiển lực và điều khiển vị trí cũng cần được xem xét để tận dụng được ưu điểm của robot khớp mềm SEA trong các ứng dụng liên quan đến tương tác với con người trong lĩnh vực công nghiệp và phục hồi chức năng.





Hình 3: Kết quả mô phỏng trong trường hợp có sai lệch mô hình 10%

- [10] Slotine J-JE, Li W, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators," *The International Journal of Robotics Research*. 1987;6(3):pp. 49-59.
- [11] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot modeling and control*. John Wiley & Sons, 2020.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. M. Williamson, "Series elastic actuators," 1995.
- [2] D. Scaramuzza, R. Siegwart, and A. Martinelli, "The International Journal of Robotics Research," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 2, pp. 149–171, 2009.
- [3] N. Kashiri, N. G. Tsagarakis, M. Laffranchi, and D. G. Caldwell, "On the stiffness design of intrinsic compliant manipulators," in *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2013, pp. 1306–1311.
- [4] C. Lee and S. Oh, "Development, analysis, and control of series elastic actuator-driven robot leg," *Frontiers in neurorobotics*, vol. 13, p. 17, 2019.
- [5] H. Lee, J. Lee, J.-H. Ryu, and S. Oh, "Relaxing the conservatism of passivity condition for impedance controlled series elastic actuators," in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2019, pp. 7610–7615.
- [6] H.-J. Sun, J. Ye, and G. Chen, "Trajectory Tracking of Series Elastic Actuators Using Terminal Sliding Mode Control," in *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, 2021, pp. 189–194.
- [7] E. Sariyildiz, H. Wang, and H. Yu, "A sliding mode controller design for the robust position control problem of series elastic actuators," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2017, pp. 3055–3061.
- [8] E. Sariyildiz, R. Mutlu, and H. Yu, "A sliding mode force and position controller synthesis for series elastic actuators," *Robotica*, vol. 38, no. 1, pp. 15–28, 2020.
- [9] W. Zhao, L. Sun, W. Yin, M. Li, and J. Liu, "Robust Position Control of Series Elastic Actuator with Backstepping Based on Disturbance Observer," in *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2019, pp. 618–623.