

ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT GIẢM ĐỘ RUNG CHO ROBOT CÔNG NGHIỆP IRB 120

CHATTERING-ATTENUATED SLIDING MODE CONTROL FOR THE IRB 120 INDUSTRIAL ROBOT

Lê Ngọc Trúc

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên; lengoctruc@gmail.com

Tóm tắt - Kỹ thuật điều khiển trượt đã được phát triển và áp dụng thành công cho nhiều dạng robot. Hạn chế của điều khiển trượt là xuất hiện hiện tượng rung trong hệ thống. Nên người thiết kế phải cân bằng giữa hai tiêu chí là thời gian quá độ và mức độ rung. Bài báo sử dụng hệ số khuếch đại biến thiên theo hàm mũ trong luật điều khiển trượt để có thể hạn chế độ rung và giảm thời gian quá độ của toàn hệ một cách tốt hơn so với bộ điều khiển trượt cơ bản sử dụng hệ số khuếch đại là hằng số. Bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ sẽ tạo ra tín hiệu điều khiển lớn trong giai đoạn tiến tới mặt trượt làm tăng tốc độ đạt tới mặt trượt, và duy trì tín hiệu điều khiển nhỏ trong giai đoạn trượt để giảm độ rung. Các phân tích lý thuyết và các kết quả mô phỏng khi áp dụng cho robot công nghiệp IRB 120 đã phản ánh tính hiệu quả của hệ số khuếch đại dạng hàm mũ trong bộ điều khiển trượt.

Từ khóa - Điều khiển trượt; robot công nghiệp; hàm mũ; giảm độ rung

1. Phần mở đầu

Điều khiển trượt (SMC) là một bộ điều khiển phi tuyến thuộc nhóm các bộ điều khiển không liên tục VSC (Variable Structure Controller). Lý thuyết điều khiển trượt cơ bản cho hệ thống phi tuyến đã được trình bày trong nhiều tài liệu điển hình như [1]–[3]. Một nghiên cứu tổng hợp về ứng dụng kỹ thuật điều khiển trượt vào lĩnh vực tay máy robot đã được giới thiệu trong bài báo [4]. Từ đó đến nay, cách tiếp cận điều khiển trượt cho hệ thống phi tuyến (trong đó bao gồm cả robot) ngày càng được phát triển và mở rộng kết hợp với các kỹ thuật khác như: điều khiển mờ [5], [6], mạng nơron [7], [8], thích nghi [9], [10], mờ-thích nghi [11], nơron-thích nghi [12]. Trong điều khiển trượt thì việc chọn mặt trượt và điều kiện trượt để đưa hệ thống tiến tới mặt trượt và ổn định ở đó là rất quan trọng. Cách chọn mặt trượt, điều kiện trượt truyền thống đã được trình bày ở [1], [13] cũng như nhiều tài liệu khác. Dựa vào đó, đã có những nghiên cứu tìm cách đề xuất đơn giản hóa mặt trượt như [14], hay sử dụng mặt trượt có dạng mũ phân thức [15]. Hiện tượng rung trong hệ thống điều khiển trượt được mô tả là hiện tượng xuất hiện các dao động có tần số và biên độ hữu hạn trong hệ thống điều khiển. Nguyên nhân chính là do tín hiệu điều khiển của bộ điều khiển trượt biến đổi đột ngột một cách không liên tục với tần số cao vì có chứa hàm xác định dấu. Nhằm hạn chế hiện tượng rung xuất hiện trong hệ thống điều khiển trượt, cách thường dùng là thay thế hàm xác định dấu bằng hàm tỉ lệ bão hòa sat hoặc hàm atan cho biến mặt trượt. Tuy nhiên, việc sử dụng các hàm này có nhược điểm là chỉ đảm bảo biến trượt tiến về một vùng lân cận mặt trượt chứ không hội tụ trên mặt trượt trong khoảng thời gian hữu hạn [1]–[3]. Bên cạnh đó, cũng có một số đề xuất khác như: Dùng cấu trúc điều khiển trượt bậc cao nhằm hạn chế rung [16], hay mô hình

Abstract - Sliding mode control techniques have been developed and successfully applied to numerous kinds of robots. The disadvantage of the sliding mode control (SMC) is the chattering phenomenon occurring in the system. Accordingly, designers have to balance between the two objectives of the system namely are the transient time and the chattering level. This article adopts an exponential time-varying gain used in a SMC in order to better reduce the chattering degree and to decrease the transient time compared to a basic SMC using a constant gain. The SMC with the exponential time-varying gain will generate large control signals during the reaching stage, and maintain small control signals throughout the sliding stage to attenuate the chattering level. Theoretical analyses and numerical simulation results applied to the IRB 120 industrial robot reflect the advantage and the efficiency of using the exponential time-varying gain in the sliding mode controller.

Key words - Sliding Mode Control (SMC); industrial robot; exponential function; chattering attenuation

bậc hai để loại bỏ thành phần không liên tục trong tín hiệu điều khiển [17], [18], hoặc xem xét hệ số khuếch đại trong điều kiện trượt là một hàm của biến mặt trượt [19].

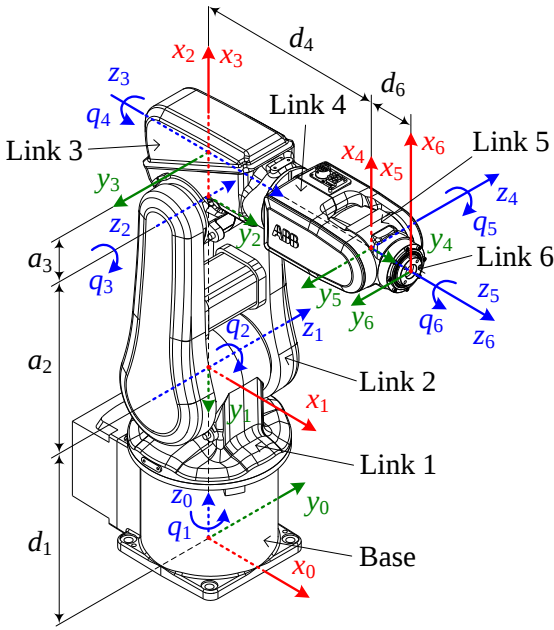
Mục tiêu của nghiên cứu được trình bày trong bài báo này là cố gắng làm giảm độ rung xuống mức mong muốn đồng thời vẫn đảm bảo thời gian quá độ theo yêu cầu, thậm chí có thể làm tăng tốc độ hội tụ của hệ thống. Do đó, bài báo đề xuất sử dụng một điều kiện trượt có hệ số khuếch đại biến thiên theo dạng hàm mũ. Hệ số khuếch đại của bộ điều khiển trượt sẽ tăng-giảm theo độ lớn của biến mặt trượt. Trong giai đoạn tiến tới mặt trượt thì hệ số khuếch đại sẽ có giá trị lớn để tăng cường tín hiệu điều khiển nhằm đưa hệ thống nhanh chóng đạt tới mặt trượt. Trong giai đoạn trên mặt trượt thì hệ số khuếch đại sẽ được giảm xuống một cách phù hợp chỉ để duy trì hệ thống ở trên mặt trượt với mức độ rung đủ nhỏ. Chất lượng của bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ được kiểm chứng thông qua việc áp dụng cho robot ABB IRB 120.

2. Mô hình động lực học của robot IRB 120

Robot IRB 120 có 6 khớp quay được dẫn động bằng các động cơ điện servo (số bậc tự do $n = 6$). Cấu trúc của robot [20] và các hệ tọa độ gắn trên các khâu được mô tả ở Hình 1, và Bảng 1 thể hiện các tham số D-H của robot.

Bảng 1. Các tham số D-H của robot IRB 120

Joint i	θ_i (rad)	d_i (m)	a_i (m)	α_i (rad)
1	q_1	$d_1 = 0,29$	$a_1 = 0$	$\alpha_1 = -\pi/2$
2	$q_2 - \pi/2$	$d_2 = 0$	$a_2 = 0,27$	$\alpha_2 = 0$
3	q_3	$d_3 = 0$	$a_3 = 0,07$	$\alpha_3 = -\pi/2$
4	q_4	$d_4 = 0,302$	$a_4 = 0$	$\alpha_4 = \pi/2$
5	q_5	$d_5 = 0$	$a_5 = 0$	$\alpha_5 = -\pi/2$
6	q_6	$d_6 = 0,072$	$a_6 = 0$	$\alpha_6 = 0$



Hình 1. Cấu trúc và các hệ tọa độ khớp của robot IRB 120

Trong Hình 1, các hệ tọa độ $O_i x_i y_i z_i$ được gắn trên khâu i tại vị trí trục khớp thứ $i + 1$ theo quy tắc Denavit-Hartenberg: Trục z_i được đặt dọc theo trục khớp $i + 1$, trục x_i là pháp tuyến chung giữa trục khớp z_i và z_{i-1} , có chiều từ z_{i-1} đến z_i , và trục y_i được xác định theo quy tắc bàn tay phải. Trường hợp các trục khớp cắt nhau thì trục x_i được chọn theo tích $z_i \times z_{i-1}$ hoặc $z_{i-1} \times z_i$. Trường hợp các trục khớp song song (hoặc trùng nhau) thì trục x_i được chọn là một đường vuông góc chung giữa z_i và z_{i-1} , có hướng từ trục z_{i-1} đến z_i . Trong Bảng 1, q_i là biến góc khớp, d_i là khoảng cách được đo dọc theo trục khớp i giữa hai pháp tuyến (pháp tuyến giữa trục khớp $i - 1$ và trục khớp i ; pháp tuyến giữa trục khớp i và trục khớp $i + 1$), a_i là độ dài của pháp tuyến chung giữa trục khớp i và trục khớp $i + 1$, α_i là góc xoắn giữa trục khớp i và trục khớp $i + 1$ xét trong mặt phẳng vuông góc với pháp tuyến chung của chúng (chính là góc tạo bởi trục z_{i-1} và trục z_i với chiều dương tính theo trục x_i). Dựa trên các bản vẽ kỹ thuật CAD 3D của robot IRB 120 được cung cấp bởi hãng ABB [21], dùng phần mềm thiết kế cơ khí chuyên nghiệp Autodesk Inventor để tạo ràng buộc giữa các khâu và hoàn thiện mô hình CAD 3D của robot IRB 120. Từ đó có thể thu được các thông số như khối lượng m_i , vị trí điểm trọng tâm r_{Ci} biểu diễn trong hệ tọa độ thứ i , và ma trận inertia tensor I_i của các khâu xấp xỉ với robot thật.

$$m_0 = 8.659$$

$$m_1 = 4.248, r_{C_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.054 \\ 0 \end{bmatrix}, I_1 = \begin{bmatrix} 19.699 & 0 & 0 \\ 0 & 14.484 & 0 \\ 0 & 0 & 19.952 \end{bmatrix} 10^{-3}$$

$$m_2 = 5.412, r_{C_2} = \begin{bmatrix} -0.169 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, I_2 = \begin{bmatrix} 35.942 & 0 & 0 \\ 0 & 83.522 & 0 \\ 0 & 0 & 57.569 \end{bmatrix} 10^{-3}$$

$$m_3 = 4.077, r_{C_3} = \begin{bmatrix} -0.012 \\ 0 \\ 0.023 \end{bmatrix}, I_3 = \begin{bmatrix} 17.562 & 0 & -1.993 \\ 0 & 23.140 & 0 \\ -1.993 & 0 & 11.589 \end{bmatrix} 10^{-3}$$

$$m_4 = 1.832, r_{C_4} = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.007 \\ 0 \end{bmatrix}, I_4 = \begin{bmatrix} 7.247 & 0 & 0 \\ 0 & 3.919 & 0 \\ 0 & 0 & 5.551 \end{bmatrix} 10^{-3}$$

$$m_5 = 0.755, r_{C_5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, I_5 = \begin{bmatrix} 1.120 & 0 & 0 \\ 0 & 1.227 & 0 \\ 0 & 0 & 0.559 \end{bmatrix} 10^{-3}$$

$$m_6 = 0.019, r_{C_6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.007 \end{bmatrix}, I_6 = \begin{bmatrix} 2.347 & 0 & 0 \\ 0 & 2.347 & 0 \\ 0 & 0 & 4.123 \end{bmatrix} 10^{-6}$$

Trong đó, các đơn vị của khối lượng, chiều dài, tensor quán tính lần lượt là kg, m và kgm^2 . Bỏ qua ma sát và các thành phần động lực học của cơ cấu chấp hành, phương trình động lực học cho robot có dạng:

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

Trong đó, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_6]^T$ là vector biến khớp, $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ là ma trận quán tính tổng quát hóa, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ là ma trận các thành phần ly tâm và Coriolis, $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^6$ là vector thành phần lực trọng trường, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^6$ là vector mô men đặt vào khớp.

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^6 \left(m_i (\mathbf{J}_{T_i}^0)^T \mathbf{J}_{T_i}^0 + \mathbf{J}_{R_i}^T \mathbf{I}_{R_i} \mathbf{J}_{R_i} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{q}} (\mathbf{1}_6 \otimes \dot{\mathbf{q}}) + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{1}_6) - \left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{q}} (\dot{\mathbf{q}} \otimes \mathbf{1}_6) \right)^T \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{g} = \left(\frac{\partial P}{\partial \mathbf{q}} \right)^T \quad (4)$$

Trong đó, $\mathbf{J}_{T_i}^0$ và $\mathbf{J}_{R_i} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ lần lượt là ma trận Jacobi tịnh tiến và Jacobi quay của khâu i , $\mathbf{1}_6$ là ma trận đơn vị 6×6 , P là tổng thế năng của robot, $\otimes$ là toán tử phép nhân Kronecker giữa hai ma trận. Theo cách xây dựng mô hình cho robot trình bày trong bài báo [22], mô hình động lực học (1) và các ma trận/vector tham số (2)-(4) có thể được tính toán ra.

3. Bộ điều khiển trượt cơ bản cho robot IRB 120

Từ phương trình (1), do tính chất khả đảo của ma trận quán tính tổng quát hóa $\mathbf{M}$, ta có thể chuyển thành phương trình:

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

Mặt trượt $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^n$ được chọn theo [1] có dạng:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \boldsymbol{\alpha} \mathbf{e} \quad (6)$$

Trong đó, $\boldsymbol{\alpha} = \text{diag}(\alpha_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận đường chéo với $\alpha_i > 0$ ($i = 1, \dots, n$), $\mathbf{e} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$ là vector sai lệch giữa quỹ đạo mong muốn $\mathbf{q}_d$ và đáp ứng $\mathbf{q}$. Hệ số dương α_i ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ trượt về điểm cân bằng của hệ, nên được chọn sao cho phù hợp với yêu cầu thiết kế. Xét điều kiện trượt $\mathbf{S} \cdot \dot{\mathbf{s}} < 0$ ($\forall t > 0$) trong đó ma trận $\mathbf{S} = \text{diag}(s_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ với s_i là phần tử thứ i của vector $\mathbf{s}$. Cách chọn cơ bản cho $\dot{\mathbf{s}}$ để thỏa mãn điều kiện trượt là sử dụng hàm xác định dấu sgn như sau:

$$\dot{\mathbf{s}} = -\mathbf{K} \text{sgn}(\mathbf{s}), \forall t > 0 \quad (7)$$

Trong đó, vector $\text{sgn}(\mathbf{s}) \in \mathbb{R}^n$ được định nghĩa là $\text{sgn}(\mathbf{s}) = [\text{sgn}(s_1), \text{sgn}(s_2), \dots, \text{sgn}(s_n)]^T$, ma trận hệ số khuếch đại $\mathbf{K} = \text{diag}(k_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $k_i > 0$, $i = 1, \dots, n$.

Đạo hàm hai vế của phương trình (6):

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \alpha\dot{e} + \ddot{e} = \alpha\dot{e} + (\ddot{q}_d - \ddot{q}) \\ &= \alpha\dot{e} + \ddot{q}_d - M^{-1}(-C\dot{q} - g + \tau)\end{aligned}\quad (8)$$

Cân bằng hai phương trình (7) và (8) thu được

$$\alpha\dot{e} + \ddot{q}_d - M^{-1}(-C\dot{q} - g + \tau) = -K\text{sgn}(s) \quad (9)$$

Suy ra bộ điều khiển trượt cơ bản:

$$\tau = M(\alpha\dot{e} + \ddot{q}_d + K\text{sgn}(s)) + C\dot{q} + g \quad (10)$$

Luật điều khiển (10) có chứa thành phần không liên tục $\text{sgn}(s)$ với ma trận K chứa các hệ số k_i là hằng số, nên khi hệ thống đang ở trên mặt trượt thì hàm $\text{sgn}(s)$ sẽ làm cho mô men bị thăng giáng một cách đột ngột gây ra hiện tượng rung trong hệ. Trong Mục 4, tác giả sẽ đề xuất sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ trong bộ điều khiển trượt nhằm làm giảm độ rung.

4. Bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ cho robot IRB 120

Trong điều khiển trượt, khi k_i tăng thì tốc độ đạt tới mặt trượt tăng, nhưng đồng thời cũng làm cho mức độ rung của hệ thống tăng. Một nghiên cứu thay thế hệ số khuếch đại hằng k_i bằng hệ số khuếch đại biến thiên theo hàm mũ k'_i đã được trình bày ở [23] có dạng như sau:

$$k'_i(s_i) = \bar{k}_i(1 - a^{-z(s_i)/\sigma_i}) \quad (11)$$

Trong đó, $\bar{k}_i > 0$, $\sigma_i > 0$, $a > 1$, và $z(s_i)$ là hàm liên tục, khả vi, thỏa mãn: $z(s_i) \geq 0 \forall s_i$, $z(0) = 0$, đồng biến trong khoảng $[0, +\infty)$, nghịch biến trong khoảng $(-\infty, 0]$, $\lim_{s_i \rightarrow \infty} z(s_i) = +\infty$. Với hệ số k'_i mô tả bởi (11), trong giai đoạn tiến tới mặt trượt thì $|s_i|$ lớn nên $z(s_i)$ lớn, dẫn đến $a^{-z(s_i)/\sigma_i} \approx 0$. Suy ra $k'_i \approx \bar{k}_i$. Trong giai đoạn trượt $s_i \approx 0$ nên $z(s_i) \approx z(0) = 0$, dẫn đến $a^{-z(s_i)/\sigma_i} \approx 1$. Suy ra $k'_i \approx 0$. Như vậy, bằng cách chọn $\bar{k}_i > k_i$ (hoặc $\bar{k}_i = k_i$), ta sẽ có hệ số $k'_i > k_i$ (hoặc $k'_i \approx k_i$) trong giai đoạn tiến tới mặt trượt nhằm tăng tốc độ hội tụ của hệ (hoặc giữ tương đương), và trong giai đoạn trượt sẽ có hệ số khuếch đại $k'_i \approx 0$ nhằm làm giảm hiện tượng rung.

Để vẫn đảm bảo khả năng tương tự như khi dùng hệ số khuếch đại k'_i ở (11) và mở rộng thêm khả năng trong trường hợp ta chỉ muốn tăng tốc độ tiến tới mặt trượt còn độ rung được giữ tương đương so với bộ điều khiển trượt cơ bản dùng hệ số hằng k_i , ở bài báo này tác giả đề xuất sử dụng hệ số khuếch đại biến thiên dạng hàm mũ $k_i^{(\text{exp})}$:

$$k_i^{(\text{exp})}(s_i) = \frac{\bar{k}_i}{n_i(s_i)} \quad (12)$$

Trong đó, $\bar{k}_i > 0$, $n_i(s_i) = \beta_i + (1 - \beta_i)e^{-\rho_i|s_i|^{r_i}} > 0$. Các tham số được chọn $0 < \beta_i < 1$, $0 < \rho_i$, và $0 < r_i \in \mathbb{N}$ đảm bảo $n_i(s_i) > 0$ và $k_i^{(\text{exp})}(s_i) > 0 \forall s_i$. Luật chuyển mạch khi đó trở thành:

$$\dot{s} = -K^{(\text{exp})}\text{sgn}(s) = -N^{-1}\bar{K}\text{sgn}(s), \forall t > 0 \quad (13)$$

Trong đó, $K^{(\text{exp})} = \text{diag}(k_i^{(\text{exp})}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$,

$\bar{K} = \text{diag}(\bar{k}_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $N = \text{diag}(n_i) \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ thu được có dạng:

$$\tau = M(\alpha\dot{e} + \ddot{q}_d + N^{-1}\bar{K}\text{sgn}(s)) + C\dot{q} + g \quad (14)$$

Sự thay đổi giá trị của n_i theo s_i sẽ làm thay đổi $k_i^{(\text{exp})}$ qua đó làm thay đổi tốc độ tiến tới mặt trượt và mức độ rung. Thật vậy, trong giai đoạn tiến tới mặt trượt thì sai lệch còn lớn, tức là $|s_i|$ có giá trị lớn thì $e^{-\rho_i|s_i|^{r_i}}$ xấp xỉ bằng 0, nên $(1 - \beta_i)e^{-\rho_i|s_i|^{r_i}}$ cũng xấp xỉ bằng 0 và dẫn đến $n_i \approx \beta_i$. Kết quả là $k_i^{(\text{exp})} = \bar{k}_i/n_i \approx \bar{k}_i/\beta_i > \bar{k}_i$. Trong giai đoạn hệ thống đã tiến gần mặt trượt và/hoặc nằm trên mặt trượt, lúc này chỉ còn tồn tại sai lệch nhỏ, tức là $|s_i|$ nhỏ xấp xỉ 0 thì $e^{-\rho_i|s_i|^{r_i}}$ xấp xỉ bằng $e^0 = 1$, nên $(1 - \beta_i)e^{-\rho_i|s_i|^{r_i}} \approx (1 - \beta_i)$ và dẫn đến $n_i \approx 1$. Kéo theo $k_i^{(\text{exp})} = \bar{k}_i/n_i \approx \bar{k}_i$. Xét cùng một đối tượng, giả thiết đã có một bộ điều khiển trượt cơ bản với hệ số k_i được thiết kế trước tùy ý, sau đó tiến hành thiết kế bộ điều khiển trượt với hệ số khuếch đại $k_i^{(\text{exp})}$ cho chất lượng tốt hơn bộ điều khiển trượt cơ bản đó. Dựa theo phân tích ở trên, có thể chọn $\bar{k}_i, \beta_i$ theo một trong ba cách sau:

- Trường hợp 1: Khi chọn $\bar{k}_i = k_i$ và $0 < \beta_i < 1$ thì hai bộ điều khiển có cùng mức độ rung tương đương nhau, do ở giai đoạn trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i = k_i$. Nhưng tốc độ đạt tới mặt trượt của bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ sẽ nhanh hơn góp phần làm giảm thời gian quá độ, do ở giai đoạn tiến tới mặt trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i/\beta_i > \bar{k}_i = k_i$. Đây là khả năng bổ sung hơn so với khi sử dụng hệ số k'_i ở (11).

- Trường hợp 2: Khi chọn $\bar{k}_i = \beta_i k_i$ và $0 < \beta_i < 1$ thì hai bộ điều khiển có cùng tốc độ đạt tới mặt trượt, do ở giai đoạn tiến tới mặt trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i/\beta_i = k_i$. Nhưng độ rung của bộ điều khiển trượt sử dụng hàm mũ sẽ ít hơn, do ở giai đoạn trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i < k_i$.

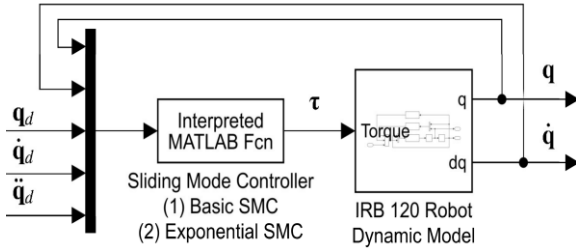
- Trường hợp 3: Khi chọn $\bar{k}_i$ và β_i sao cho: $\bar{k}_i < k_i$ và $\bar{k}_i/\beta_i > k_i$ thì bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ vừa có tốc độ đạt tới mặt trượt nhanh hơn qua đó làm giảm thời gian quá độ (do ở giai đoạn tiến tới mặt trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i/\beta_i > k_i$), vừa đảm bảo mức độ rung nhỏ hơn (do ở giai đoạn trượt: $k_i^{(\text{exp})} \approx \bar{k}_i < k_i$). Hoàn toàn có thể chọn được $\bar{k}_i$ và β_i thỏa mãn yêu cầu của trường hợp này, đó là: $\bar{k}_i = \gamma_i k_i$ và $\beta_i = \gamma_i \bar{\beta}_i$ với $0 < \gamma_i, \bar{\beta}_i < 1$. Khi đó sẽ có $\bar{k}_i < k_i$ và $\bar{k}_i/\beta_i = k_i/\bar{\beta}_i > k_i$.

Như vậy, theo cách chọn các tham số ở trường hợp 3 thì bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ $k_i^{(\text{exp})}$ có khả năng vừa làm giảm độ rung và vừa tăng tốc độ hội tụ của hệ thống khi so với bộ điều khiển trượt cơ bản dùng hệ số khuếch đại k_i tùy ý cho trước.

5. Mô phỏng và các kết quả

Thực hiện mô phỏng hệ thống điều khiển trượt cho robot IRB 120 bằng phần mềm MATLAB/Simulink với sơ đồ Hình 2. Bộ điều khiển trượt cơ bản (10), và bộ điều khiển sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ (14), sẽ lần lượt được áp dụng cho robot IRB 120 để phân tích và so sánh. Quỹ đạo đặt của các góc khớp (theo radian) có dạng hình sin được chọn là

$$\begin{aligned}
q_{1d} &= 0.5 + 2\sin(2\pi t) & q_{4d} &= 0.5 + 2.5\sin(2\pi t) \\
q_{2d} &= 0.5 + 1.5\sin(2\pi t) & q_{5d} &= 0.5 + 2\sin(2\pi t) \\
q_{3d} &= 0.5 + \sin(2\pi t) & q_{6d} &= 0.5 + 3\sin(2\pi t)
\end{aligned} \quad (15)$$



Hình 2. Sơ đồ mô phỏng điều khiển trượt cho robot IRB 120

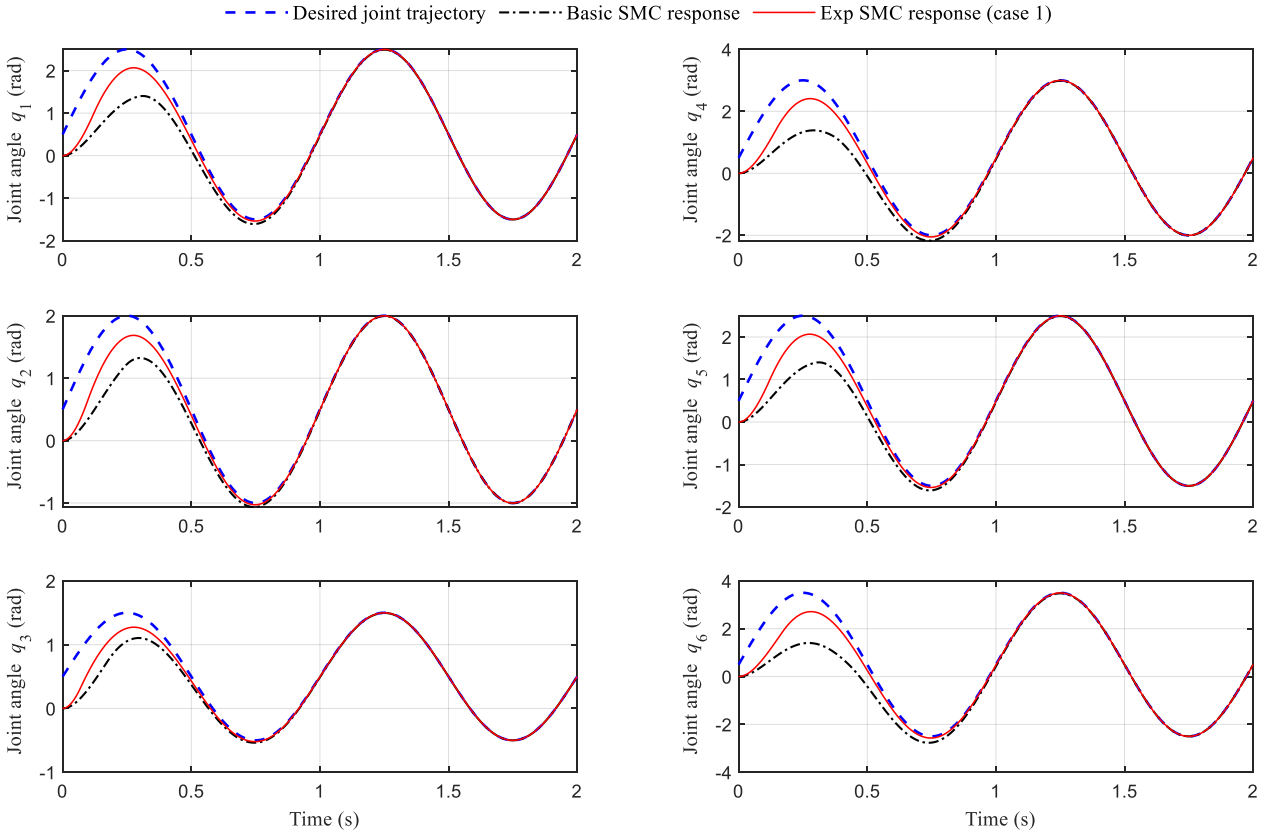
Để thuận lợi cho việc đánh giá chất lượng các bộ điều khiển trượt, cả hai bộ điều khiển trượt đều có chung một mặt trượt (6) với $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = 5$. Bộ điều khiển trượt cơ bản với k_i là $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k_5 = k_6 = 50$. Riêng với bộ điều khiển trượt dùng hệ số $k_i^{(exp)}$ thì sẽ được chọn lần lượt theo ba trường hợp đã nêu ở Mục 4 cụ thể như sau:

- Trường hợp 1: Chọn $\bar{k}_i = k_i$ và $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0.4$.
- Trường hợp 2: Chọn $\bar{k}_i = \beta_i k_i$ và $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0.4$.
- Trường hợp 3: Chọn $\bar{k}_i = \gamma_i k_i$ và $\beta_i = \gamma_i \bar{\beta}_i$ trong đó $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_6 = 0.01$ và $\bar{\beta}_1 = \bar{\beta}_2 = \bar{\beta}_3 = \bar{\beta}_4 = \bar{\beta}_5 = \bar{\beta}_6 = 0.4$. Cách chọn này đảm bảo $\bar{k}_i < k_i$ và $\bar{k}_i/\beta_i > k_i$.

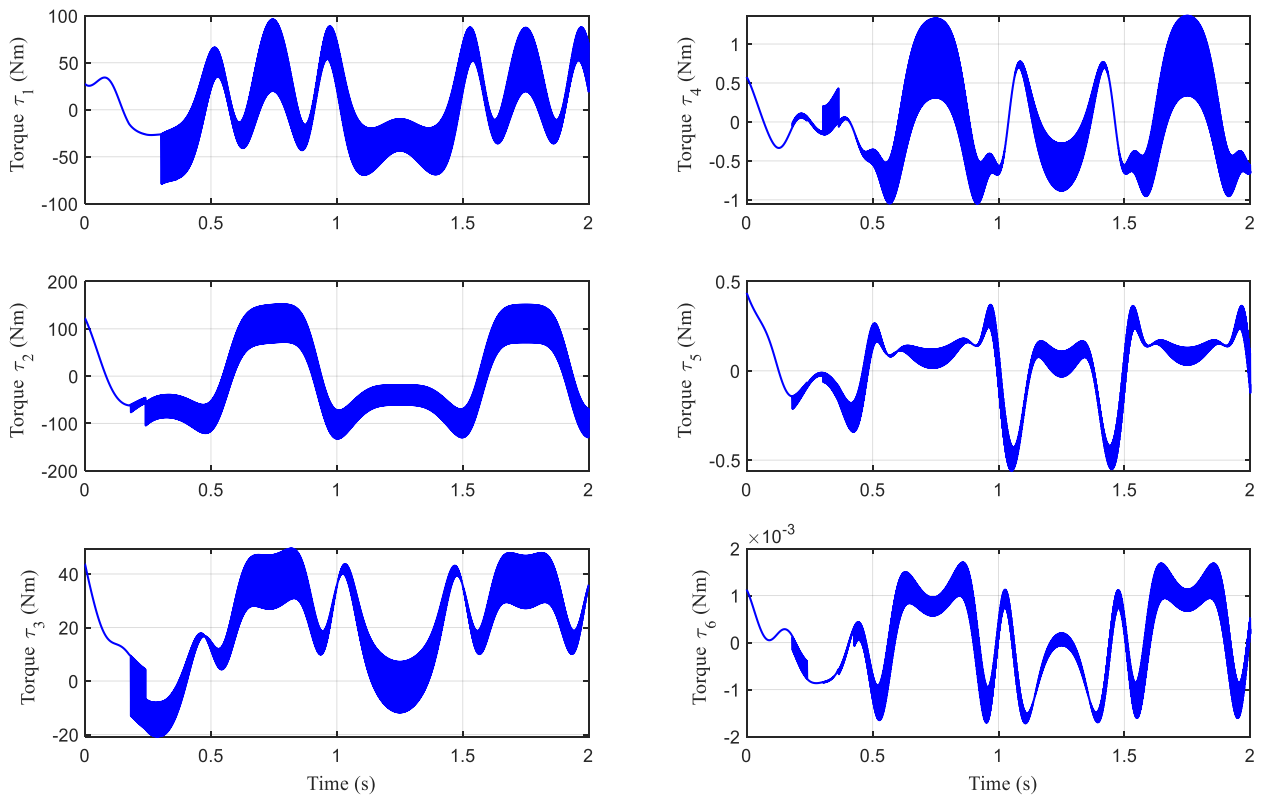
Trong cả ba trường hợp trên ứng với bộ điều khiển trượt dùng hệ số $k_i^{(exp)}$, các tham số ρ_i và r_i đều được chọn là $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = \rho_6 = 30$ và $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 2$. Ở phần phân tích dưới đây, bộ điều khiển trượt cơ bản sẽ được gọi là “basic SMC”, bộ điều khiển dùng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ sẽ được gọi là “Exp SMC case i ” ($i = 1, 2, 3$) lần lượt tương ứng với ba trường hợp chọn tham số. Các kết quả mô phỏng cho đáp ứng góc khớp $\mathbf{q}$ và tín hiệu mô men $\boldsymbol{\tau}$ lần lượt được thể hiện từ Hình 3 đến Hình 7.

Chất lượng đáp ứng của robot IRB 120 khi sử dụng “Exp SMC case 1” đã tốt hơn khi sử dụng “basic SMC” (Hình 3), mặc dù tín hiệu mô men có mức độ rung tương đương nhau (Hình 4 và Hình 5). Điều này là do trong giai đoạn tiến về mặt trượt thì “Exp SMC case 1” có hệ số khuếch đại lớn hơn của “basic SMC”: $k_i^{(exp)} \approx \bar{k}_i/\beta_i > k_i$, trong khi ở giai đoạn trượt thì hệ số khuếch đại được giảm xuống xấp xỉ bằng nhau: $k_i^{(exp)} \approx \bar{k}_i = k_i$.

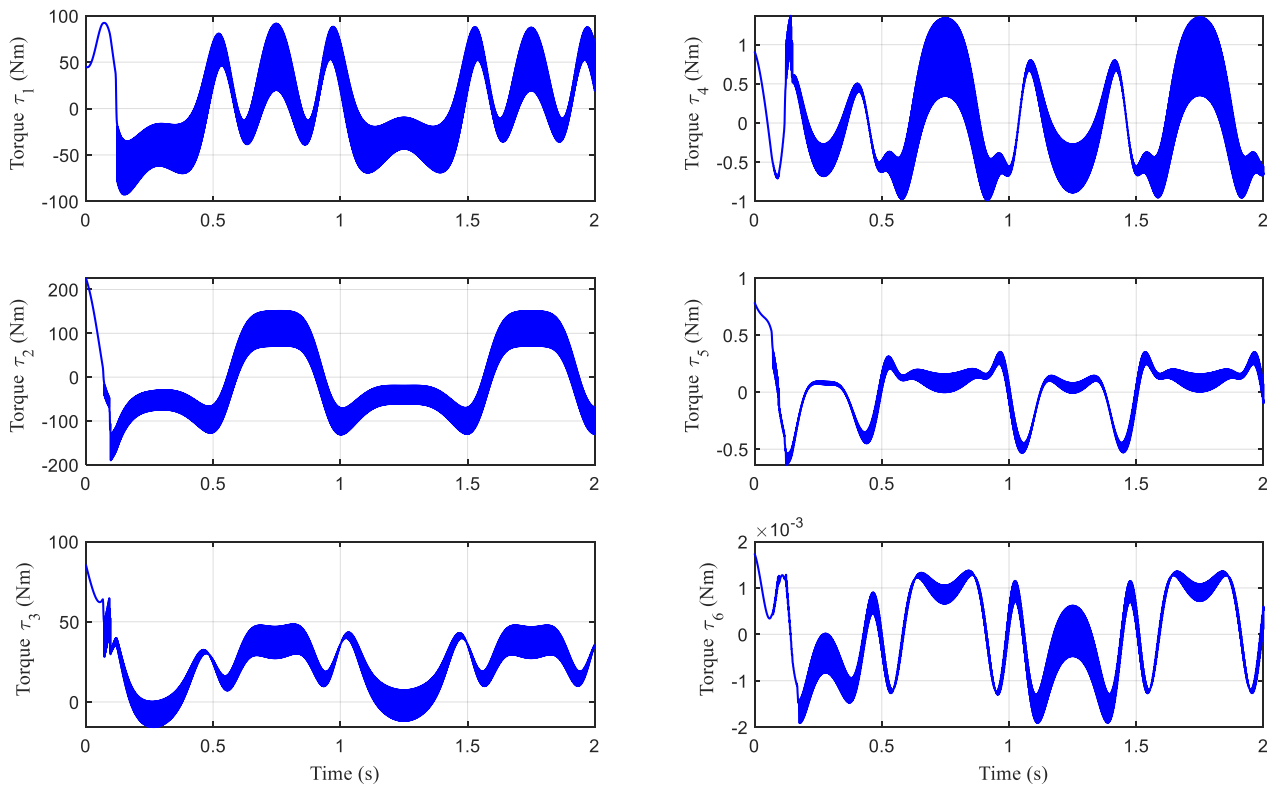
Khi robot lần lượt sử dụng “basic SMC” và “Exp SMC case 2”, thì “Exp SMC case 2” có hệ số khuếch đại trong giai đoạn tiến về mặt trượt xấp xỉ bằng k_i của “basic SMC”: $k_i^{(exp)} \approx \bar{k}_i/\beta_i = (\beta_i k_i)/\beta_i = k_i$, và được giảm xuống bé hơn k_i trong giai đoạn trượt: $k_i^{(exp)} \approx \bar{k}_i = \beta_i k_i < k_i$. Nên ở hai trường hợp này, tuy chúng cho ra chất lượng đáp ứng tương tự nhau (Hình 3 và Hình 6) nhưng “Exp SMC case 2” có mức độ rung nhỏ hơn đáng kể so với “basic SMC” (Hình 4 và Hình 7).



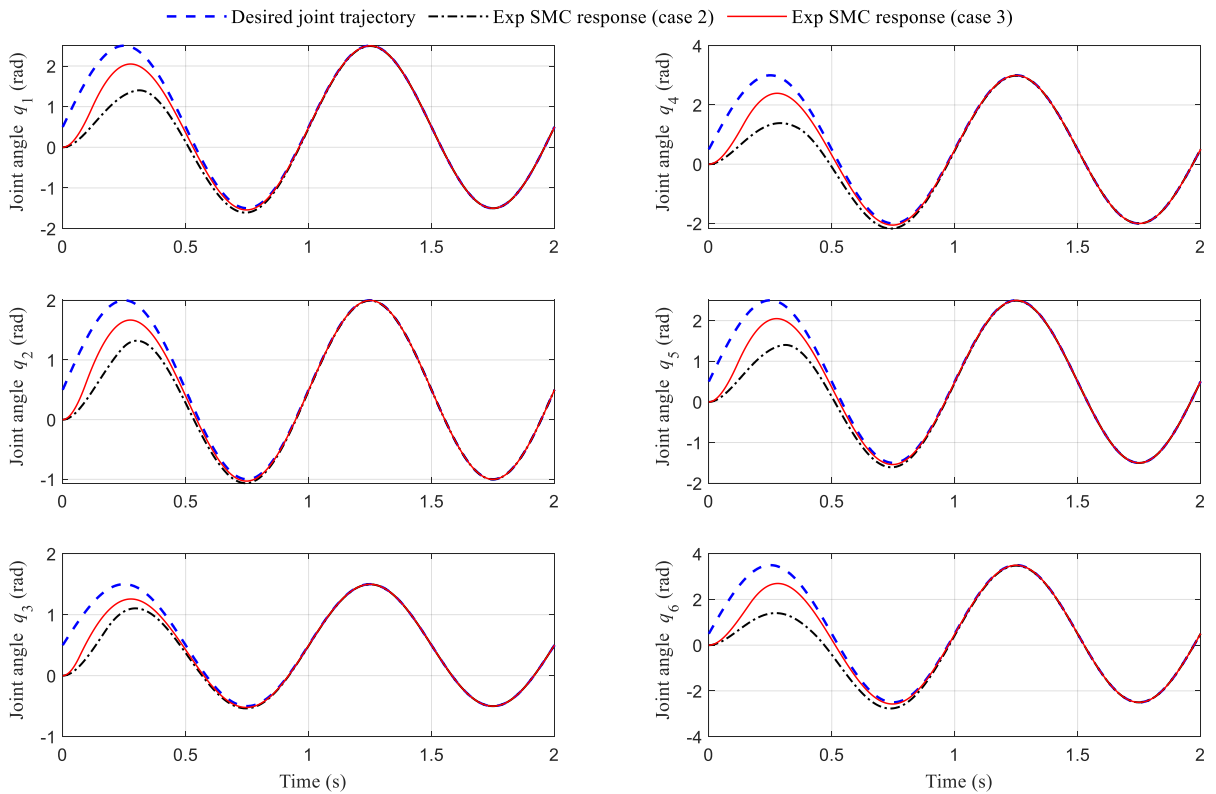
Hình 3. Quỹ đạo đặt $\mathbf{q}_d$ và đáp ứng $\mathbf{q}$ của robot khi dùng SMC cơ bản, SMC với hệ số khuếch đại dạng hàm mũ (trường hợp 1)



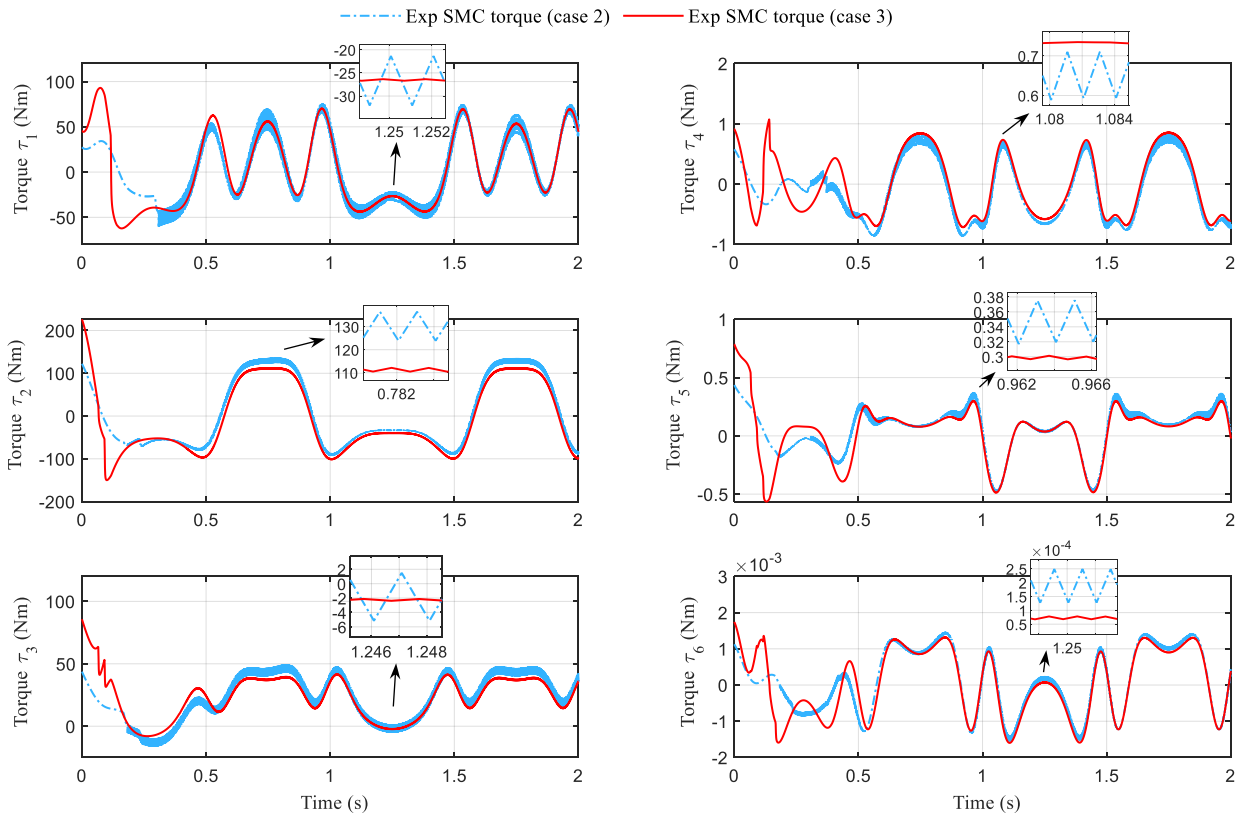
Hình 4. Tín hiệu mô men τ khi sử dụng bộ điều khiển trượt cơ bản



Hình 5. Tín hiệu mô men τ khi sử dụng bộ điều khiển trượt với hệ số khuếch đại dạng hàm mũ (trường hợp 1)



Hình 6. Quỹ đạo đặt q_d và đáp ứng q của robot khi dùng SMC với hệ số khuếch đại dạng hàm mũ (trường hợp 2 và 3)



Hình 7. Tín hiệu mô men τ khi sử dụng bộ điều khiển trượt với hệ số khuếch đại dạng hàm mũ (trường hợp 2 và 3)

Kết hợp các ưu điểm của “Exp SMC case 1” và “Exp SMC case 2” thì “Exp SMC case 3” với cách chọn tham số sao cho thu được $k_i^{(exp)}$ vừa có giá trị lớn như “Exp SMC case 1” trong giai đoạn tiến về mặt trượt vừa có giá trị nhỏ

hơn cả “Exp SMC case 2” trong giai đoạn trượt. Kết quả mô phỏng của “Exp SMC case 3” đã thể hiện rõ hai ưu điểm của bộ điều khiển trượt dùng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ khi so sánh với “basic SMC”, đó là: (1) Khả năng

tăng tốc độ ổn định của hệ thống (Hình 3 và Hình 6), và (2) khả năng giảm thiểu độ rung của hệ thống xuống mức gần như không còn xuất hiện (Hình 4 và Hình 7).

6. Kết luận

Bài báo cung cấp một cách tiếp cận thiết kế bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ theo biến trượt trong điều kiện trượt. Bằng cách này, tốc độ tiến tới mặt trượt đã được cải thiện dẫn đến thời gian ổn định của toàn hệ diễn ra nhanh hơn. Thêm vào đó, tín hiệu điều khiển lại được giảm về duy trì ở giá trị nhỏ trong quá trình trượt trên mặt trượt, nên hiện tượng rung đã được giảm hơn so với dùng bộ điều khiển trượt cơ bản có hệ số khuếch đại hằng. Bộ điều khiển trượt sử dụng hệ số khuếch đại dạng hàm mũ đã cho thấy chất lượng tốt khi áp dụng cho robot IRB 120 thông qua các mô phỏng số. Kết quả này góp phần cải thiện chất lượng của các hệ thống đang sử dụng điều khiển trượt và làm tăng khả năng áp dụng điều khiển trượt cho các đối tượng phi tuyến khác. Trong nghiên cứu này, việc định lượng mức độ rung được giảm theo phần trăm chưa được đề cập. Bên cạnh đó, khi áp dụng vào thực tế cho robot thì cần bổ sung khả năng kháng nhiễu và tính bất định trong tham số của mô hình robot cũng như các khó khăn khác. Đó là những hạn chế của bài báo và cũng là định hướng đề tài phát triển hoàn thiện thuật toán điều khiển trượt trong nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.
- [2] V. Utkin, *Sliding Mode in Control and Optimization*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [3] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*, 3rd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.
- [4] R. Gorez, "Conclusions of 5-year investigations in sliding mode control of manipulators", in *European Control Conference (ECC)*, 1999, pp. 3546–3551.
- [5] Yew-Wen Liang, Sheng-Dong Xu, Der-Cherng Liaw, and Cheng-Chang Chen, "A Study of T-S Model-Based SMC Scheme With Application to Robot Control", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 11, pp. 3964–3971, 2008.
- [6] V. Đ. Đạt, H. X. Dũng, P. V. Kiểm, N. M. Tâm, and N. V. Đ. Hải, "Phương pháp điều khiển mờ-trượt cho hệ Pendubot", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, vol. 11, no. 120, pp. 12–16, 2017.
- [7] Liangyong Wang, Tianyou Chai, and Lianfei Zhai, "Neural-Network-Based Terminal Sliding-Mode Control of Robotic Manipulators Including Actuator Dynamics", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 9, pp. 3296–3304, Sep. 2009.
- [8] D. T. Quốc, N. T. Hòa, and L. T. Dũng, "Ứng dụng mạng ANFIS cho điều khiển trượt đồng bộ tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol. 17, no. 1.1, pp. 68–73, 2019.
- [9] J. Baek, M. Jin, and S. Han, "A New Adaptive Sliding-Mode Control Scheme for Application to Robot Manipulators", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 6, pp. 3628–3637, 2016.
- [10] N. Đ. C. Tâm and Đ. Q. Vinh, "Sử dụng bộ điều khiển trượt thích nghi để lật và điều khiển ổn định con lắc ngược bánh xe quán tính", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol. 7, no. 104, pp. 37–41, 2016.
- [11] F. Baklouti, S. Aloui, and A. Chaari, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Tracking Control of Uncertain Underactuated Nonlinear Systems: A Comparative Study", *J. Control Sci. Eng.*, vol. 2016, pp. 1–12, 2016.
- [12] T. H. Nguyễn, P. X. Minh, and N. C. Khoa, "Điều khiển trượt mờ thích nghi bền vững cho robot 3 bậc tự do", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, vol. 52, no. 5, pp. 541–548, 2014.
- [13] N. D. Phước, *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến*. NXB Bách khoa Hà Nội, 2012.
- [14] Y. Xia, Z. Zhu, and M. Fu, "Back-stepping sliding mode control for missile systems based on an extended state observer", *IET Control Theory Appl.*, vol. 5, no. 1, pp. 93–102, 2011.
- [15] M. B. R. Neila and D. Tarak, "Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Rigid Robotic Manipulators", *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 8, no. 2, pp. 215–220, 2011.
- [16] T. Floquet, J.-P. Barbot, and W. Perruquetti, "Higher-order sliding mode stabilization for a class of nonholonomic perturbed systems", *Automatica*, vol. 39, no. 6, pp. 1077–1083, 2003.
- [17] G. Bartolini, A. Ferrara, and E. Usai, "Chattering avoidance by second-order sliding mode control", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 43, no. 2, pp. 241–246, 1998.
- [18] V. Parra-Vega and G. Hirzinger, "Chattering-free sliding mode control for a class of nonlinear mechanical systems", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 11, no. 12, pp. 1161–1178, 2001.
- [19] Weibing Gao and J. C. Hung, "Variable structure control of nonlinear systems: a new approach", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, pp. 45–55, 1993.
- [20] "Product specification IRB 120 (Document ID: 3HAC035960-001)". ABB Robotics, 2018.
- [21] "IRB 120 CAD Models", *ABB Robotics*. [Online]. Available: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-120/irb-120-cad>.
- [22] L. N. Truc, N. V. Quyen, and N. P. Quang, "Dynamic model with a new formulation of Coriolis/centrifugal matrix for robot manipulators", *J. Comput. Sci. Cybern.*, vol. 36, no. 1, pp. 89–104, 2020.
- [23] P. Gamorski, "Sliding mode control of continuous time systems with reaching law based on exponential function", *J. Phys. Conf. Ser. (12th Eur. Work. Adv. Control Diagnosis)*, vol. 659, p. 012048, 2015.

(BBT nhận bài: 10/4/2020, hoàn tất thủ tục phản biện: 01/6/2020)