

ENHANCED QUALITY OF CONTROL SYSTEM DESIGN ERABLE CONNECTION

Nguyen Thi Thu Hien^{1*}, Tran Xuan Minh²

¹TNU - University of Information and Communication Technology

²TNU - University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 23/3/2022	In previous researches, the author studied, built the mathematical model of the soft-joint robot with 2 degrees of freedom and designed the sliding mode control to compare with the basic linear controller. The control purpose is finding the working point more optimal than the basic sliding mode control and handling the uncertainties coming from the model is also considered. In this paper, the author proposes a controller designed to control the trajectory of the robot. This controller is designed on the basis of SMC sliding mode controller combined with Lyapunov stabilization and fractional derivative method. The simulation results on Matlab once again confirm the success of this method with the performance of fractional order sliding mode controller for very short and stable transient time with all fractional order derivatives when the system has noise and uncertainty.
Revised: 31/5/2022	
Published: 31/5/2022	
KEYWORDS	
Control	
Joint	
Robot	
Fractional order sliding control	
Lack of executive structure	

NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG HỆ HỤT CƠ CẤU CHẤP HÀNH CÓ LIÊN KẾT ĐÀN HỒI

Nguyễn Thị Thu Hiền^{1*}, Trần Xuân Minh²

¹Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Kỹ thuật công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 23/3/2022	Trong các nghiên cứu trước đây, tác giả đã tìm hiểu, xây dựng mô hình toán học của hệ thống robot khớp mềm với hai bậc tự do và thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt để so sánh với bộ điều khiển tuyến tính cơ bản. Mục đích điều khiển để tìm ra điểm làm việc tối ưu hơn bộ điều khiển trượt truyền thống và xử lý được các yếu tố bất định đến từ mô hình cũng được xem xét. Trong bài báo này tác giả đề xuất bộ điều khiển được thiết kế để điều khiển bám quỹ đạo cho Robot. Bộ điều khiển này được thiết kế dựa trên nền tảng của bộ điều khiển trượt SMC kết hợp với ổn định Lyapunov và phương pháp đạo hàm cấp phân số. Kết quả mô phỏng trên Matlab một lần nữa khẳng định sự thành công của phương pháp này với hiệu suất của bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số cho thời gian quá độ là rất ngắn và ổn định với tất cả đạo hàm bậc phân số khi hệ thống xuất hiện yếu tố nhiễu và bất định.
Ngày hoàn thiện: 31/5/2022	
Ngày đăng: 31/5/2022	
TỪ KHÓA	
Điều khiển	
Khớp	
Robot	
Điều khiển trượt bậc phân số	
Hệ cơ cấu chấp hành	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5752>

* Corresponding author. Email: minhhtx.dhktcn@gmail.com

1. Mở đầu

Nghiên cứu về hệ thống huyệt cơ cấu chấp hành là một chủ đề nghiên cứu thu hút được sự quan tâm trong cộng đồng điều khiển. Các hệ thống đó được đặc trưng bởi việc có ít hơn các cơ cấu điều khiển độc lập so với các bậc tự do có thể điều khiển được. Điều khiển hệ thống cơ khí huyệt cơ cấu chấp hành phi tuyến là một vấn đề đầy thách thức vì nó yêu cầu khai thác đầy đủ các thuộc tính phi tuyến (the non-holonomic properties). Ví dụ như các hệ thống tay máy với khớp linh hoạt (flexible joint manipulators), tàu thủy (ships), vệ tinh (satellites), con lắc ngược đơn và đôi (single and double inverted pendulum), cánh tay robot 2 khớp nối (the Acrobot), robot phẳng (the underactuated planar robot) [1] robot 2 bậc có liên kết đàn hồi (the Pendubot) [2], ...

Có rất nhiều các công trình nghiên cứu đã công bố sử dụng các phương pháp điều khiển khác nhau để điều khiển hệ huyệt cơ cấu chấp hành, hay áp dụng phương pháp điều khiển trượt kết hợp với đạo hàm cấp phân số để điều khiển các đối tượng khác nhau ví dụ cho hệ $2n$ bậc tự do [3]. Một vài bộ điều khiển đã được đề xuất cho các hệ thống huyệt chấp hành cụ thể như các kỹ thuật tuyến tính hóa phản hồi một phần (partial feedback linearization) cho pendubot [4], luật điều khiển phản hồi trạng thái phi tuyến (nonlinear state feedback control law) cho con lắc ngược (the inverted pendulum) [5], điều khiển dựa trên sự thụ động (passivity based control) cho con lắc ngược [6] và pendubot, điều khiển trượt phân cấp cho một họ các hệ thống thiếu điều khiển SIMO [7], điều khiển trượt kết hợp với nguyên lý điều khiển ISS cho đối tượng cầu treo 3D [8].

Bài báo này tác giả đề xuất bộ điều khiển trượt và phương pháp đạo hàm cấp phân số để điều khiển bám quỹ đạo cho robot khớp mềm hai bậc tự do, đồng thời phương pháp nghiên cứu được mô phỏng bằng phần mềm Matlab/Simulink.

2. Mô hình toán học

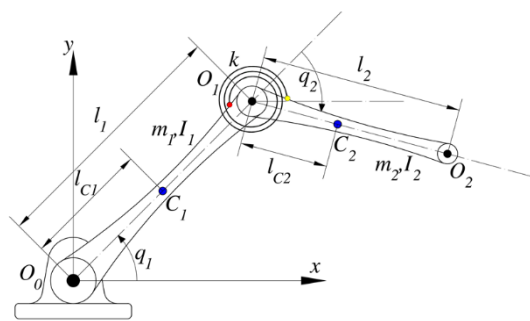
Đầu tiên, mô hình toán học của hệ robot khớp mềm với hai bậc tự do (Hình 1) được đưa ra nhưng tổng quát hơn khi xem xét đến các thành phần bất định của mô hình cũng như nhiễu ngoài.

$$\mathbf{D}'(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}'\mathbf{q} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} \quad (1)$$

Trong đó: $\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2]^T$ là vecto gồm hai thành phần góc cần kiểm soát

$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad 0]^T$ là vecto đầu vào điều khiển

$\mathbf{d} = [d_1 \quad d_2]^T$ là thành phần nhiễu ngoài



Hình 1. Mô hình robot khớp mềm với hai bậc tự do

Thành phần bất định trong phương trình (1) được phân tích chi tiết từ các ma trận $\mathbf{D}'(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{K}'$ lần lượt thành các giá trị tham số định danh $\mathbf{D}(\mathbf{q})$, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\mathbf{K}$ và các tham số chưa biết $\Delta\mathbf{D}(\mathbf{q})$, $\Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$, $\Delta\mathbf{K}$.

$$\begin{cases} \mathbf{D}'(\mathbf{q}) = \mathbf{D}(\mathbf{q}) + \Delta\mathbf{D}(\mathbf{q}) \\ \mathbf{C}'(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{K}' = \mathbf{K} + \Delta\mathbf{K} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó, $\mathbf{D}'(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ là ma trận quán tính của hệ thống, $\mathbf{D}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ là ma trận quán tính ly tâm và Coriolis, $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ là ma trận độ cứng. Mô hình động lực học của hệ thống trong (1) sẽ được viết lại bằng việc gộp các thành phần bất định của mô hình được định nghĩa trong (2) với nhiễu bên ngoài $\mathbf{d}$ thành $\delta(\mathbf{q}, \mathbf{d}) = [\delta_1 \quad \delta_2]^T$.

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \boldsymbol{\tau} + \delta(\mathbf{q}, t) \quad (3)$$

Ta giả sử rằng thành phần chứa bất định và nhiễu ngoài, đạo hàm theo thời gian của nó lần lượt được chặn bởi các vectơ hằng số $\boldsymbol{\Lambda}$ và $\bar{\boldsymbol{\Lambda}}$ như sau:

$$|\delta(\mathbf{q}, t)| \leq \boldsymbol{\Lambda} \quad (4)$$

$$|\dot{\delta}(\mathbf{q}, t)| \leq \bar{\boldsymbol{\Lambda}} \quad (5)$$

Như vậy, tác giả đã đưa ra robot khớp mềm với hai bậc tự do trong (3) và đưa ra những giả thuyết về thành phần bất định và nhiễu trong (4), (5) nhằm tạo cơ sở để thiết kế cấu trúc ở phần tiếp theo. Thêm vào đó, những giả thuyết đưa ra được xem là hợp lý theo các phân tích cụ thể trong [9] và [10].

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Phép toán phân số

Nếu như khái niệm phép toán đạo hàm nguyên đã có từ rất lâu và trở nên quen thuộc với tất cả những ai biết đến giải tích sơ cấp. Nhưng phải đến năm 1884, lý thuyết về các phép toán bậc phân số mới được tổng quát hóa và trở thành nền tảng cho các nhà toán học hiện đại và các nhà điều khiển sau này. Đầu tiên, phép tính phân số là một phép toán tổng quát của phép tích phân và phép đạo hàm với toán tử bậc không nguyên cho hàm số $a(t)$ bất kỳ được định nghĩa như sau:

$${}_t D_t^\mu a(t) = \begin{cases} \frac{d^\mu(a(t))}{dt^\mu} & , \mu > 0 \\ 1 & , \mu = 0 \\ \int_{t_0}^t a(\tau)(d\tau)^{-\mu} & , \mu < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $t > t_0$, t_0 là thời điểm đầu.

3.2. Bộ điều khiển trượt bậc phân số

Đầu tiên, bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số được thiết kế nhằm giúp q_1 tiến về q_{1d} và đảm bảo các dao động của q_2 tắt dần. Trong quá trình thiết kế, ta giả thuyết rằng $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$, $\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}$. Mặt trượt phân số được lựa chọn như sau:

$$\begin{aligned} s &= D^\mu e_1 + k_1 e_1 + k_2 D^\mu e_2 + k_3 e_2 \\ &= D^{\mu-1} \dot{e}_1 + k_1 e_1 + k_2 D^{\mu-1} \dot{e}_2 + k_3 e_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó:

$e_1 = q_1 - q_{1d}$, $e_2 = q_2 - q_{2d}$ lần lượt là sai lệch vị trí của biến trạng thái.

D^μ là phép toán bậc phân số.

k_1, k_2, k_3 lần lượt là các tham số điều khiển được thiết kế.

Thực hiện đạo hàm mặt trượt, ta có:

$$\begin{aligned}\dot{s} &= D^{\mu+1}e_1 + k_1\dot{e}_1 + k_2D^{\mu+1}e_2 + k_3\dot{e}_2 \\ &= D^{\mu-1}\ddot{e}_1 + k_1\dot{e}_1 + k_2D^{\mu-1}\ddot{e}_2 + k_3\dot{e}_2\end{aligned}\quad (8)$$

Với

$$\begin{aligned}\ddot{q}_1 &= \frac{\tau_1 + \delta_1 - \frac{d_{12}\delta_2}{d_{22}} - \bar{c}_{11}\dot{q}_1 - \bar{c}_{12}\dot{q}_2 - \bar{k}_1q_2}{\bar{d}_1} \\ \ddot{q}_2 &= \frac{\delta_2 - \frac{d_{21}(\tau_1 + \delta_1)}{d_{11}} - \bar{c}_{21}\dot{q}_1 - \bar{c}_{22}\dot{q}_2 - \bar{k}_2q_2}{\bar{d}_2}\end{aligned}$$

thay vào (8) ta được

$$\begin{aligned}\dot{s} &= D^{\mu-1}\left(\frac{\tau_1}{\bar{d}_1} - \frac{k_2d_{21}\tau_1}{d_{11}\bar{d}_2}\right) + k_1\dot{q}_1 + k_3\dot{q}_2 \\ &\quad + D^{\mu-1}\left(\frac{-\bar{c}_{11}\dot{q}_1 - \bar{c}_{12}\dot{q}_2 - \bar{k}_1q_2}{\bar{d}_1} + k_2\frac{-\bar{c}_{21}\dot{q}_1 - \bar{c}_{22}\dot{q}_2 - \bar{k}_2q_2}{\bar{d}_2}\right. \\ &\quad \left.+ \frac{d_{22}\delta_1 - d_{12}\delta_2}{d_{22}\bar{d}_1} + k_2\frac{d_{11}\delta_2 - d_{21}\delta_1}{d_{11}\bar{d}_2}\right)\end{aligned}\quad (9)$$

Tín hiệu điều khiển giữ trạng thái ở lại mặt trượt được thiết kế và đưa ra như sau:

$$\begin{aligned}\tau_{1eq} &= \frac{d_{11}\bar{d}_2(\bar{c}_{11}\dot{q}_1 + \bar{c}_{12}\dot{q}_2 + \bar{k}_1q_2) + k_2d_{11}\bar{d}_1(\bar{c}_{21}\dot{q}_1 + \bar{c}_{22}\dot{q}_2 + \bar{k}_2q_2)}{d_{11}\bar{d}_2 - \bar{d}_1k_2d_{21}} \\ &\quad - \frac{\bar{d}_1d_{11}\bar{d}_2}{d_{11}\bar{d}_2 - \bar{d}_1k_2d_{21}}D^{1-\mu}(k_1\dot{q}_1 + k_3\dot{q}_2)\end{aligned}\quad (10)$$

Thành phần tín hiệu điều khiển giúp trạng thái tiến về mặt trượt được thiết kế để thêm vào phương trình (10) như sau:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{\bar{d}_2d_{11}(\bar{c}_{11}\dot{q}_1 + \bar{c}_{12}\dot{q}_2 + \bar{k}_1q_2) + k_2d_{11}\bar{d}_1(\bar{c}_{21}\dot{q}_1 + \bar{c}_{22}\dot{q}_2 + \bar{k}_2q_2)}{d_{11}\bar{d}_2 - \bar{d}_1k_2d_{21}} \\ &\quad - \frac{\bar{d}_1d_{11}\bar{d}_2}{d_{11}\bar{d}_2 - \bar{d}_1k_2d_{21}}D^{1-\mu}(k_1\dot{q}_1 + k_3\dot{q}_2) - \frac{\bar{d}_1d_{11}\bar{d}_2k_4\operatorname{sgn}(s)}{(d_{11}\bar{d}_2 - \bar{d}_1k_2d_{21})}\end{aligned}\quad (11)$$

Để chứng minh sự ổn định bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số, hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V_1 = \frac{1}{2}s^2\quad (12)$$

Đạo hàm phương trình (12), thu được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s\dot{s} \\ &= s \left(D^{\mu-1} \left(\frac{\tau_1}{\bar{d}_1} - \frac{k_2 d_{21} \tau_1}{d_{11} \bar{d}_2} \right) + k_1 \dot{q}_1 + k_3 \dot{q}_2 \right. \\ &\quad \left. + D^{\mu-1} \left(\frac{-\bar{c}_{11} \dot{q}_1 - \bar{c}_{12} \dot{q}_2 - \bar{k}_1 q_2}{\bar{d}_1} + k_2 \frac{-\bar{c}_{21} \dot{q}_1 - \bar{c}_{22} \dot{q}_2 - \bar{k}_2 q_2}{\bar{d}_2} \right) \right. \\ &\quad \left. + D^{\mu-1} \left(\frac{d_{22} \delta_1 - d_{12} \delta_2}{d_{22} \bar{d}_1} + k_2 \frac{d_{11} \delta_2 - d_{21} \delta_1}{d_{11} \bar{d}_2} \right) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Thay tín hiệu điều khiển trong (11) vào phương trình (13)

$$\dot{V}_1 = s\dot{s} = s \left(D^{\mu-1} \left(-k_4 \operatorname{sgn}(s) + \frac{d_{11} \bar{d}_2 (d_{22} \delta_1 - d_{12} \delta_2) + d_{22} \bar{d}_1 (d_{11} \delta_2 - d_{21} \delta_1)}{\bar{d}_1 d_{11} d_{22} \bar{d}_2} \right) \right) \quad (14)$$

Do $\bar{d}_1 d_{11} d_{22} \bar{d}_2 > 0$ thì với $k_4 > \frac{|d_{11} \bar{d}_2 d_{22}|(\Lambda_1 + \Lambda_2) - |d_{11} \bar{d}_2 d_{12}| \Lambda_2 - |d_{22} \bar{d}_1 d_{21}| \Lambda_1}{\bar{d}_1 d_{11} d_{22} \bar{d}_2}$ đảm bảo $\dot{V}_1 \leq 0$.

Cuối cùng, thành phần hàm dấu trong bộ điều khiển (11) có thể gây ra hiện tượng rung. Vì vậy, ta thay thế hàm dấu bằng sự kết hợp của hàm khuếch đại bão hòa và hàm sigmoid trong nghiên cứu này.

$$\operatorname{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} \tanh\left(\frac{s}{\varepsilon}\right), & \left|\frac{s}{\varepsilon}\right| \geq 1 \\ \frac{s}{\varepsilon}, & \left|\frac{s}{\varepsilon}\right| < 1 \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó, ε và $\tanh(\cdot)$ lần lượt là lớp bao và hàm tiếp tuyến hyperbolic.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Kích bản mô phỏng

Để quan sát hiệu suất của bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số (FO-SMC) cho hệ robot khớp mềm 2 bậc tự do, tác giả đã thực hiện mô phỏng trên MATLAB/SIMULINK với thời gian trích mẫu 0,01s. Ta xem xét hệ thống với các tham số như sau: $\theta_1 = 0.0799$, $\theta_2 = 0.0244$, $\theta_3 = 0.0205$ và đối với hằng số độ cứng $k = 1$. Tham số bộ điều khiển được sử dụng là: $k_1 = 1$, $k_2 = 0.5$, $k_3 = -5$, $k_4 = 50$, $\varepsilon = 0.01$, và đối với vị trí ban đầu được khởi tạo là:

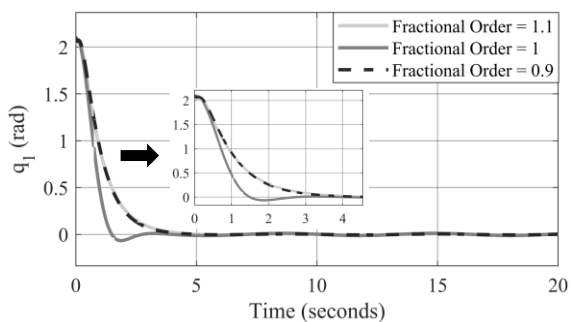
$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{2\pi}{3} & q_2 &= \frac{\pi}{8} \\ \dot{q}_1 &= 0 & \dot{q}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Ngoài ra, các kết quả mô phỏng sau đây đều được tác giả đưa vào thành phần nhiễu cũng như bất định bằng: $\delta = [0.5 \sin(t) \quad 0]^T$

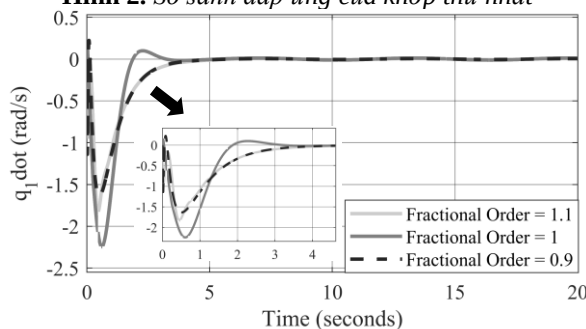
4.2. Kết quả và so sánh

4.2.1. Trường hợp 1

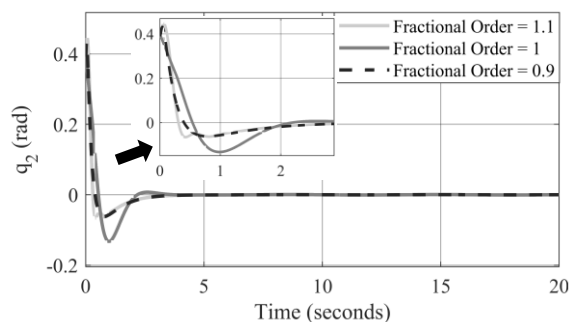
Nhằm cho thấy ưu điểm của bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số, tác giả đã so sánh kết quả của 3 bậc đạo hàm phân số khác nhau là: 1,1, 1,0 và 0,9.



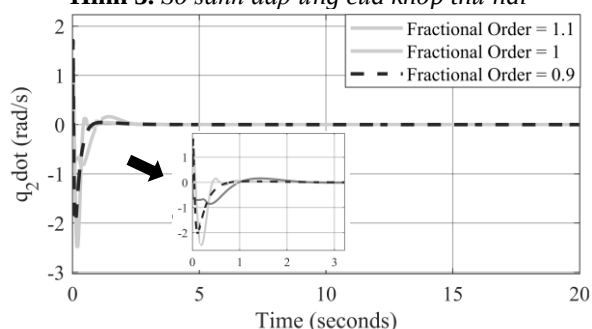
Hình 2. So sánh đáp ứng của khớp thứ nhất



Hình 4. So sánh đáp ứng đạo hàm góc quay khớp thứ nhất



Hình 3. So sánh đáp ứng của khớp thứ hai

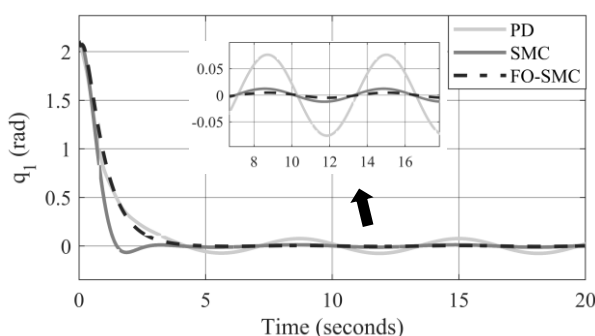


Hình 5. So sánh đáp ứng đạo hàm góc quay khớp thứ hai

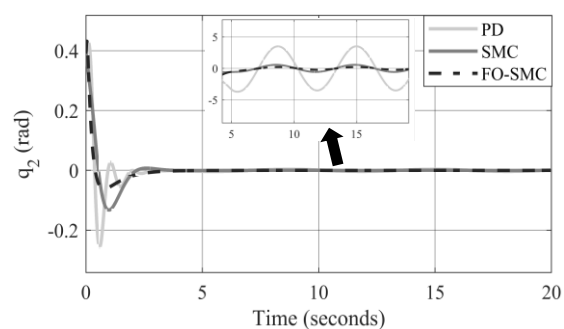
Đáp ứng vị trí của hai khớp trong Hình 2 và Hình 3, vận tốc trong Hình 4 và Hình 5 đã cho thấy hiệu suất của bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số với thời gian quá độ là 4 (giây). Tuy nhiên, việc so sánh các bậc đạo hàm phân số đã cho thấy các chất lượng khác nhau, khi tăng bậc phân số lên sẽ khiến cho độ vọt lố càng cao. Như vậy, bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số được đề xuất ổn định với tất cả đạo hàm bậc phân số cho hệ robot khớp mềm khi xuất hiện yếu tố nhiễu và bất định. Tuy nhiên, với từng bậc đạo hàm lại đem lại hiệu suất khác nhau tùy thuộc vào việc chỉnh định của người thiết kế điều khiển.

4.2.2. Trường hợp 2

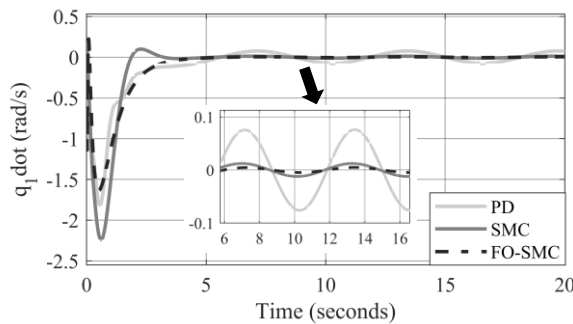
Thực hiện mô phỏng kiểm chứng bộ điều khiển trượt bậc phân số với mũ đạo hàm bậc phân số là 0,9 (FO-SMC), so sánh với bộ điều khiển trượt truyền thống (SMC) và bộ điều khiển PID.



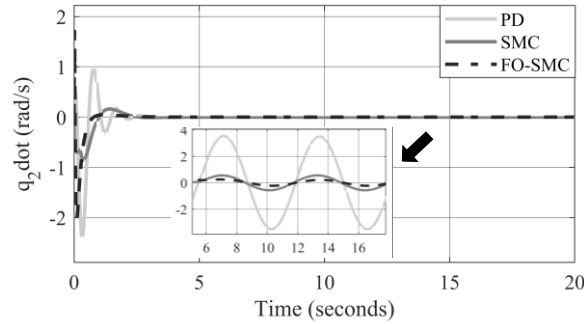
Hình 6. Đáp ứng góc quay của khớp thứ nhất



Hình 7. Đáp ứng góc quay của khớp thứ hai



Hình 8. Đáp ứng đạo hàm góc quay khớp thứ nhất



Hình 9. Đáp ứng đạo hàm góc quay khớp thứ hai

Hiệu suất của các bộ điều khiển đã được thể hiện qua các hình 6 đến hình 9, kết quả cho thấy đáp ứng về vị trí và vận tốc của bộ điều khiển trượt bậc phân số là tốt nhất khi dựa trên yếu tố thời gian đáp ứng và độ vọt lố. Ngoài ra, khả năng bền vững của bộ điều khiển PD còn kém hơn bộ điều khiển trượt (SMC) và bộ điều khiển trượt bậc phân số (FO-SMC).

5. Kết luận

Công trình này đã thiết kế thành công một bộ điều khiển bền vững áp dụng cho robot khớp mềm với hai bậc tự do. Bộ điều khiển này dựa trên nền tảng kỹ thuật trượt SMC kết hợp với ổn định Lyapunov và đạo hàm cấp phân số. Bộ điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng MATLAB/SIMULINK được sử dụng để kiểm tra tính hiệu quả với tay máy hai khớp mềm. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển được so sánh với phương pháp điều khiển dựa trên Passivity của Robot, thu được kết quả điều khiển cải thiện rõ rệt đặc biệt khi hệ thống ảnh hưởng bởi các thành phần bất định.

Kết quả cho thấy bộ điều khiển làm việc tốt với thời gian quá độ 4 giây, ổn định với tất cả đạo hàm bậc phân số cho hệ robot khớp mềm khi xuất hiện yếu tố nhiễu và bất định.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. Kanoh, S. Tzafestas, H. G. Lee, and J. Kalat, "Modelling and control of flexible robot arms," in *1986 25th IEEE Conference on Decision and Control*, 1986, pp. 1866-1870, doi: 10.1109/CDC.1986.267312.
- [2] F.-Y. Wang and Y. Gao, *Advanced Studies of Flexible Robotic Manipulators*, 2003.
- [3] A. T. Le, "Quick stop slide control with fractional derivative of double manipulator," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 58, pp. 49-55, 2019.
- [4] I. Fantoni, R. Lozano, and M. W. Spong, "Energy based control of the Pendubot," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 45, no. 4, pp. 725-729, 2000, doi: 10.1109/9.847110.
- [5] A. Rybovic, M. Pricinsky, and M. Paskala, "Control of the inverted pendulum using state feedback control," in *2012 ELEKTRO*, 2012, pp. 145-148, doi: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225627.
- [6] A. Shiriaev, A. Pogromsky, H. Ludvigsen, and O. Egeland, "On global properties of passivity-based control of an inverted pendulum," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 10, no. 4, pp. 283-300, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1099-1239(20000415)10:4<283::AID-RNC473>3.0.CO;2-I.
- [7] D. Qian, J. Yi, and D. Zhao, "Hierarchical sliding mode control for a class of SIMO under-actuated systems," *Control and Cybernetics*, vol. 37, no. 1, pp. 83-135, 2008.
- [8] T. V. H. Nguyen, V. T. Tran, and P. N. Dao, "High-order Sliding Approach for Robust control of a 3-D Overhead Crane System," *Journal of Science and Technology of Technical Universities*, vol. 108, pp. 007-011, 2015.
- [9] M. Van, "An enhanced tracking control of marine surface vessels based on adaptive integral sliding mode control and disturbance observer," *ISA Trans.*, vol. 90, pp. 30-40, 2019, doi: 10.1016/j.isatra.2018.12.047.
- [10] Van, "Adaptive neural integral sliding-mode control for tracking control of fully actuated uncertain surface vessels," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 29, no. 5, pp. 1537-1557, 2019, doi: 10.1002/rnc.4455.