

Thiết lập quỹ đạo chuyển động và điều khiển chống dao động tải trọng cho hệ cầu trục

Bùi Thị Khánh Hòa^{1,2}, Hoàng Thị Mai¹, Lưu Thị Huế³,
Nguyễn Tùng Lâm¹, Nguyễn Danh Huy^{1*}

¹Đại học Bách khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam;

²Đại học Công nghiệp Hà Nội, 298 Cầu Diễn, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam;

³Trường Đại học Điện lực Hà Nội, 235 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam.

*Tác giả liên hệ: huy.nguyendanh@hust.edu.vn

Nhận bài: 21/8/2024; Hoàn thiện: 12/11/2024; Chấp nhận đăng: 15/11/2024; Xuất bản: 06/12/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2024.43-50>

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đề xuất một bộ điều khiển chuyển động tối ưu thời gian cho hệ thống cầu trục con lắc đơn dựa trên lý thuyết phẳng sao cho hệ thống di chuyển tải trọng tới vị trí mong muốn đồng thời giảm rung lắc khi chiều dài dây treo thay đổi. Động lực học của hệ thống được xây dựng bằng cách áp dụng phương pháp Euler-Lagrange. Nghiên cứu sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng thời gian cố định (ESO) và bộ điều khiển trượt (SMC) nhằm cải thiện độ ổn định và khử nhiễu. ESO đưa ra ước tính có độ chính xác cao về trạng thái và tổng nhiễu loạn trong khoảng thời gian cố định. Quỹ đạo dự kiến có được bằng cách giải quyết các thông số tối ưu của đầu ra phẳng.

Từ khoá: Cầu trục; Tựa phẳng; Điều khiển trượt; Quan sát trạng thái.

1. GIỚI THIỆU

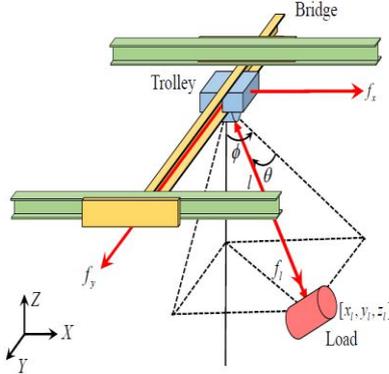
Việc vận chuyển bằng cầu trục đòi hỏi sự kết hợp giữa chuyển động của xe đẩy và chuyển động nâng hạ tải một cách đồng thời, cầu trục chịu nhiều tác động bởi các nhiễu loạn bên ngoài và sự thiếu chính xác của mô hình, các yếu tố này ảnh hưởng đến hiệu suất của cầu trục. Một số chiến lược điều khiển truyền thống được áp dụng để điều khiển cầu trục điều khiển kinh điển PID, điều khiển tuyến tính LQR, LQG [1, 2] bộ điều khiển này không đạt được độ chính xác cao đối với hệ thống phi tuyến và có sự tác động của các thành phần bất định. Hiện nay, các phương pháp điều khiển dựa trên mặt trượt (SMC) [3, 4] cũng được áp dụng nhiều do tính đơn giản và hiệu quả của bộ điều khiển. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là không đáp ứng tốt trong điều kiện hệ thống có sự xuất hiện của các thành phần bất định hoặc các nhiễu loạn bên ngoài. Cần thiết triển khai một bộ quan sát cho hệ thống cầu trục. Thực tế các hệ thống cầu trục hạn chế trong việc đo các trạng thái hệ thống và độ nhạy với các nhiễu loạn bên ngoài. Nghiên cứu này đề xuất phương pháp điều khiển trượt kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) [5, 6] không chỉ quan sát các biến trạng thái mà còn ước tính các thành phần bất định của hệ thống cầu trục [7, 8]. Nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển trượt bậc hai kết hợp với bộ quan sát trạng thái mở rộng nhằm đảm bảo chất lượng điều khiển của hệ thống, nâng cao hiệu suất làm việc trong thực tế. Chiến lược kiểm soát cho cầu trục trong nghiên cứu còn bao gồm lập quỹ đạo phù hợp nhằm quan sát các biến trạng thái của hệ thống và quản lý các nhiễu bên ngoài để điều hướng cầu trục 3DOC một cách hiệu quả. Do mô hình hệ thống phức tạp, việc giải quyết đầy đủ các vấn đề tối ưu hóa trong khi xem xét động lực của 3DOC dẫn đến gánh nặng tính toán và có thể gây ra xung đột trong điều khiển thời gian thực đã được giải quyết phần nào bởi lý thuyết phẳng [9, 10], nên việc tối ưu hóa quỹ đạo trong khi tính đến các ràng buộc động trở nên khả thi.

Nghiên cứu xây dựng mô hình cầu trục trên phần mềm mô phỏng và thực nghiệm với phương pháp lập kế hoạch chuyển động tối ưu về thời gian có tính đến các khía cạnh động lực học và giải quyết vấn đề chống rung trong 3DOC; Xây dựng bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) để ước tính cả trạng thái hệ thống và nhiễu loạn tổng thể; Kết hợp bộ điều khiển trượt (SMC) với bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) đảm bảo sự hội tụ trong một khung thời gian cụ thể.

2. MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG CẦU TRỤC

Mô hình cầu trục được thể hiện như trong hình 1. {Oxyz} là khung tọa độ gốc của hệ thống.

Bảng 1. Các tham số của 3DOC.



Tín hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
x	m	Vị trí xe theo trục x
y	m	Vị trí xe theo trục y
l	m	Chiều dài dây treo tải
ϕ	rad	Góc lắc của tải theo trục x
θ	rad	Góc lắc của tải theo trục y
m	kg	Khối lượng của xe
m_x	kg	Khối lượng tải theo trục x
m_y	kg	Khối lượng tải theo trục y
m_l	kg	Khối lượng tải theo trục l
f_x	N	Lực tác động lên xe theo trục x
f_y	N	Lực tác động lên xe theo trục y
f_l	N	Lực tác động lên xe theo trục dây treo

$\mathbf{F} = [f_x; f_y; f_l; 0; 0]$ véc tơ lực cấp cho 3DOC,

Véc tơ biến trạng thái $\mathbf{q} = [x, y, l, \phi, \theta]^T$

Hình 1. Mô hình hệ thống cầu trục.

Áp dụng công thức Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \mathbf{F}_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (m_x + m)\ddot{x} + ml \cos \phi \cos \theta \ddot{\phi} - ml \sin \phi \sin \theta \ddot{\theta} + m \sin \phi \cos \theta \dot{\phi} \dot{\theta} \\ + b_x \dot{x} + 2m \cos \phi \cos \theta \dot{\phi} \dot{\theta} - 2m \sin \phi \sin \theta \dot{\theta} \dot{\phi} - ml \sin \phi \cos \theta \dot{\phi}^2 \\ - 2ml \cos \phi \sin \theta \dot{\phi} \dot{\theta} - ml \sin \phi \cos \theta \dot{\theta}^2 = f_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} ml^2 \cos^2 \theta \ddot{\phi} + ml \cos \phi \cos \theta \ddot{x} + 2ml \cos^2 \theta \dot{\phi} \dot{x} - 2ml^2 \sin \theta \cos \theta \dot{\phi} \dot{\theta} \\ + mgl \sin \phi \cos \theta = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$(m_y + m)\ddot{y} + ml \cos \theta \ddot{\theta} + m \sin \theta \dot{\theta} \dot{\phi} + b_y \dot{y} + 2m \cos \theta \dot{\theta} \dot{\phi} - ml \sin \theta \dot{\theta}^2 = f_y \quad (4)$$

$$\begin{aligned} ml^2 \ddot{\theta} + ml \cos \theta \ddot{y} - ml \sin \phi \sin \theta \ddot{x} + 2ml \dot{\theta} \dot{\phi} + ml^2 \cos \theta \sin \theta \dot{\phi}^2 \\ + mgl \cos \phi \sin \theta = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (m_l + m)\ddot{l} + m \sin \phi \cos \theta \ddot{x} + m \sin \theta \ddot{y} + b_l \dot{l} - ml \cos^2 \theta \dot{\phi}^2 \\ - ml \dot{\theta}^2 - mg \cos \phi \cos \theta = f_l \end{aligned} \quad (6)$$

Từ công thức Lagrange, cầu trục mô tả: $\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{F}$ (7)

3. LẬP KẾ HOẠCH CHUYỂN ĐỘNG TỐI ƯU THEO THỜI GIAN TỰA PHẪNG

3.1. Hệ thống độ phẳng

Tựa phẳng hệ cầu trục tức là hệ quy chiếu cầu trục $\mathbf{q} = [x, y, \phi, \theta]^T$ và tín hiệu điều khiển $\mathbf{F}_a = [f_x, f_y, f_l]^T$ có thể tham chiếu thông qua đầu ra phẳng bằng cách hình thành ban đầu chuyển động tải và sau đó tính toán lại trạng thái hệ thống bằng lý thuyết phẳng. Vị trí của tải có thể được tính toán thông qua các trạng thái hệ thống bằng cách:

$$\begin{cases} x_l = x + l \sin \phi \cos \theta \\ y_l = y + l \sin \theta \\ z_l = h - l \cos \phi \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

h là chiều cao của cầu trục. Phương trình Newton của chuyển động của cầu trục xác định bởi:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_l = -T\cos\theta\sin\phi \\ m\ddot{y}_l = T\sin\theta \\ m\ddot{z}_l = T\cos\theta\cos\phi - mg \end{cases} \quad (9)$$

Trong đó, T là lực căng của dây. Từ (9), góc xoay có thể được tính từ đầu ra phẳng bằng cách:

$$\begin{cases} \phi = \arctan\left(-\frac{\dot{x}_l}{\dot{z}_l+g}\right) \\ \theta = \arctan\left(\frac{\dot{y}_l}{\sqrt{\dot{x}_l^2+(g+\dot{z}_l)^2}}\right) \end{cases} \quad (10)$$

Thay (10) vào vị trí tải (8), vị trí của xe và chiều dài l có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{cases} x = x_l + (h - z_l) \frac{\dot{x}_l}{g+\dot{z}_l} \sqrt{\frac{\dot{y}_l^2(\dot{x}_l^2+(g+\dot{z}_l)^2)}{x_l^4} + 1} \\ y = y_l - (h - z_l) \frac{\dot{y}_l}{g+\dot{z}_l} \\ l = (h - z_l) \sqrt{\frac{\dot{x}_l^2}{(g+\dot{z}_l)^2} + 1} \sqrt{\frac{\dot{y}_l^2}{(\dot{x}_l^2+(g+\dot{z}_l)^2)} + 1} \end{cases} \quad (11)$$

Từ (10) và (11), $q = f_q(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi})$, khi đó, $\dot{q} = f_q(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}, \xi^{(3)})$ và $\ddot{q} = f_q(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}, \xi^{(3)}, \xi^{(4)})$, thay q , \dot{q} và \ddot{q} vào (2), (3) và (4), các lực tác dụng lên hệ 3DOC có thể được biểu thị bằng $F_a = f_f(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}, \xi^{(3)}, \xi^{(4)})$. Rõ ràng là các thành phần của đầu ra phẳng $\xi = [x_l, y_l, z_l]^T$ độc lập khác nhau khi không có mối quan hệ nào giữa các tín hiệu điều khiển của từng bộ truyền động, tức là không có dạng $\rho_\xi(\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}, \dots, \xi^{(n)}) = 0$.

3.2. Lập kế hoạch chuyển động theo thời gian tối ưu

Nhóm nghiên cứu đề xuất bài toán thời gian tối ưu quỹ đạo mong muốn cho tải của 3DOC, hàm chi phí được xác định bởi thời gian di chuyển của 3DOC. Bằng cách giảm thiểu hàm chi phí trong khi xem xét các ràng buộc của hệ thống và các mục tiêu kiểm soát, giải pháp của phương pháp này có thể cung cấp tốt nhất cho 3DOC. Hàm chi phí được nghĩa là: tối giản $J = t_f$

Hơn nữa, các ràng buộc cho bài toán thời gian tối ưu được liệt kê như sau:

$$\xi(0) = [x_l(0), y_l(0), z_l(0)]^T \quad (12)$$

$$\xi(t_f) = \xi_{or} = [x_l(t_f), y_l(t_f), z_l(t_f)]^T \quad (13)$$

$$\dot{\xi}(t_f) = [0, 0, 0]^T \quad (14)$$

$$\dot{\xi}_1(t) = f(\xi_1(t), u(\xi(t))) \quad (15)$$

$$\dot{\xi}_{min} \leq \dot{\xi}(t) \leq \dot{\xi}_{max} \quad (16)$$

$$\phi_{min} \leq h_\phi(u(\xi(t))) \leq \phi_{max} \quad (17)$$

$$\theta_{min} \leq h_\theta(u(\xi(t))) \leq \theta_{max} \quad (18)$$

Các ràng buộc mục tiêu động và điều khiển với một vai trò quan trọng trong việc điều chỉnh hành vi của tải trong hệ thống 3DOC. Các ràng buộc được thiết kế để duy trì động lực học của tải, các vấn đề chống rung và đạt được vị trí tải mục tiêu. Các ràng buộc (12) đến (14) liên quan trực tiếp đến khía cạnh vị trí của tải đảm bảo sự chuyển đổi tải 3DOC từ vị trí ban đầu sang vị trí mục tiêu được chỉ định đồng thời đảm bảo rằng vận tốc của tải giảm xuống 0 khi đến vị trí mong muốn.

Động lực học của các ràng buộc tải được liệt kê từ (15) đến (16). Để lập kế hoạch quỹ đạo chuyển động, động lực học của tải trọng bao gồm vị trí, vận tốc và gia tốc.

4. BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT TRẠNG THÁI MỞ RỘNG

4.1. Bộ quan sát trạng thái mở rộng

Bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) tuyến tính được thiết kế sẽ giải quyết được cả hai vấn đề: ước lượng nhiễu, và ước lượng biến trạng thái khó đo hay không đo.

Các biến trạng thái của hệ thống được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{q}; \mathbf{x}_2 = \dot{\mathbf{q}} \quad (19)$$

Từ (1), động lực học của hệ thống có thể viết lại theo biến trong không gian trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = & \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = & \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_3 = & \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F} - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}) \end{cases} \quad (20)$$

Đặt $\mathbf{f}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}})$ là thành phần bất định phi tuyến của hệ thống $\mathbf{d}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}$ là nhiễu của hệ thống. Hệ phương trình trạng thái (20) viết lại:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = & \mathbf{x}_2 \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = & \mathbf{x}_3 + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F} \\ \dot{\mathbf{x}}_3 = & \boldsymbol{\zeta}(t) \end{cases} \quad (21)$$

với \mathbf{x}_3 là biết trạng thái của nhiễu tổng (gồm nhiễu ngoài và thành phần phi tuyến bất định) $\mathbf{h}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = \mathbf{f}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \mathbf{d}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$, $\boldsymbol{\zeta}(t)$ là đạo hàm của hàm $\mathbf{h}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$. Biến trạng thái \mathbf{z}_i được định nghĩa là biến quan sát của biến trạng thái \mathbf{x}_i , ($i = 1 - 3$). Bộ quan sát trạng thái mở rộng phi tuyến (NESO) được thiết kế dựa trên hàm phi tuyến $g_i(x)$ như sau:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{z}_2 + \epsilon g_1\left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1}{\epsilon^2}\right) \\ \dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{z}_3 + g_2\left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1}{\epsilon^2}\right) + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F} \\ \dot{\mathbf{z}}_3 = \frac{1}{\epsilon} g_3\left(\frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1}{\epsilon^2}\right) \end{cases} \quad (22)$$

Trong nghiên cứu này, hàm g_i được chọn là hàm tuyến tính $g_i(\bullet) = \alpha_i \times (\bullet)$, do vậy, NESO trở thành bộ quan sát trạng thái mở rộng tuyến tính (LESO).

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_1 = \mathbf{z}_2 + \frac{\alpha_1}{\epsilon} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1) \\ \dot{\mathbf{z}}_2 = \mathbf{z}_3 + \frac{\alpha_2}{\epsilon^2} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1) + \mathbf{u}_x \\ \dot{\mathbf{z}}_3 = \frac{\alpha_3}{\epsilon^3} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{z}_1) \end{cases} \quad (23)$$

với $\mathbf{u}_x = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F}$ là lực, mô men tác động lên hệ thống 3DOC.

4.2. Bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên ESO

Lực tác động lên xe con được định nghĩa: $F_a = [f_x, f_y, f_l]^T$. Bộ điều khiển trượt bậc hai (SO-SMC) dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng được đề xuất, với các tín hiệu biến trạng thái được ước lượng bởi bộ quan sát (23), tín hiệu ước lượng $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3$ cho các biến trạng thái được sử dụng để tính toán tín hiệu điều khiển F_a , tín hiệu điều khiển F_a đảm bảo khả năng bám quỹ đạo cũng như độ ổn định của hệ thống 3DOC.

Hệ thống 3DOC là hệ thống hực cơ cấu chấp hành, biến trạng thái được tách thành hai thành phần: có cơ cấu chấp hành $\mathbf{q}_a = [x, y, l]^T$ và không có cơ cấu chấp hành $\mathbf{q}_u = [\phi, \theta]^T$. Phương trình động

lực học của hệ thống (1) được viết thành hai phương trình theo hai biến \mathbf{q}_a và \mathbf{q}_u như sau:

$$\begin{cases} M_{a1}(q)\ddot{q}_a + M_{u1}(q)\ddot{q}_u + B_{a1}\dot{q}_a + C_{a1}(q, \dot{q})\dot{q}_a + C_{u1}(q, \dot{q})\dot{q}_u + G_1(q) + D_{a1} = F_a \\ M_{a2}(q)\ddot{q}_a + M_{u2}(q)\ddot{q}_u + C_{a2}(q, \dot{q})\dot{q}_a + C_{u2}(q, \dot{q})\dot{q}_u + G_2(q) + D_{u1} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

Hai phương trình trong (24) được viết lại thành phương trình động lực học của biến trạng thái \mathbf{q}_a có cơ cấu chấp hành như sau:

$$\overline{M}(q)\ddot{q}_a + \overline{C}_1(q, \dot{q})\dot{q}_a + \overline{C}_2(q, \dot{q})\dot{q}_u + \overline{G}(q) + \overline{D}_a = F_a \quad (25)$$

với:

$$\begin{aligned} \overline{M}(q) &= M_{a1}(q) - M_{u1}(q)M_{u2}^{-1}(q)M_{a2}(q); \\ \overline{C}_1(q, \dot{q}) &= B_{a1} + C_{a1}(q, \dot{q}) - M_{u1}(q)M_{u2}^{-1}(q)C_{a2}(q, \dot{q}) \\ \overline{C}_2(q, \dot{q}) &= C_{u1}(q, \dot{q}) - M_{u1}(q)M_{u2}^{-1}(q)C_{u2}(q, \dot{q}); \\ \overline{G}(q) &= G_1(q) - M_{u1}(q)M_{u2}^{-1}(q)G_2(q) \\ \overline{D}_a &= D_{a1} - M_{u1}(q)M_{u2}^{-1}(q)D_{u1} \end{aligned}$$

Các biến trạng thái \mathbf{q}_a và \mathbf{q}_u được ước lượng bởi $\mathbf{z}_a = [\mathbf{z}_1(1), \mathbf{z}_1(2), \mathbf{z}_1(3)]^T$ và $\mathbf{z}_u = [\mathbf{z}_1(4), \mathbf{z}_1(5)]^T$. Nhiễu tổng được ước lượng bởi $\mathbf{z}_{3a} = [\mathbf{z}_3(1), \mathbf{z}_3(2), \mathbf{z}_3(3)]^T$.

Bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng sẽ được đề xuất mặt trượt:

$$s_0 = \ddot{q}_a + \lambda\dot{q}_a + \beta\ddot{q}_u \quad (26)$$

với $\ddot{q}_a = q_a - q_{ar}$ và $\ddot{q}_u = q_u - q_{ur}$ là véc tơ sai số;

$q_{ar} = [x_r, y_r, l_r]^T$, $q_{ur} = [\phi_r, \theta_r]^T$ là quỹ đạo đặt của cầu trục; tham số $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$

và $\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \end{bmatrix}^T$ đảm bảo quỹ đạo thực bám theo quỹ đạo đặt.

\hat{s}_0 là ước lượng của mặt trượt s_0 , được xác định dựa vào ESO như sau:

$$\hat{s}_0 = -\dot{e}_a - \lambda e_a - \beta e_u + s_0 \quad (27)$$

với $e_a = q_a - z_a = [e_1(1), e_1(2), e_1(3)]^T$; $e_u = q_u - z_u = [e_1(4), e_1(5)]^T$ là sai số ước lượng.

Bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên ESO được đề xuất như sau:

$$F_a = -K \text{sign}(\hat{s}_0) - \overline{M}(q)[z_{3a} + 2\lambda(\dot{z}_a - \dot{q}_{ar}) - \ddot{q}_{ar} + \lambda^T \lambda(z_a - q_{ar}) + \beta(\dot{z}_u - \dot{q}_{ur}) + \lambda\beta(z_u - q_{ur})] \quad (28)$$

Hàm Lyapunov được chọn như sau: $V_{smc} = \frac{1}{2} s_0^T s_0$ (29)

Đạo hàm hàm Lyapunov theo thời gian t , sau một vài bước biến đổi có được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{smc} &= s_0^T [-\overline{M}^{-1}(q)K \text{sign}(-\dot{e}_a - \lambda e_a - \beta e_u + s_0) - \lambda(\dot{q}_a - \dot{q}_{ar} - \lambda^T \lambda(q_a - q_{ar}) - \\ &\lambda\beta(q_u - q_{ur}) + e_{3a} - 2\lambda(\dot{z}_a - \dot{q}_a) - \lambda^T \lambda(z_a - q_a) - \lambda\beta(z_u - q_u) - \beta(\dot{z}_u - \dot{q}_u)] \\ &= -s_0^T \overline{M}^{-1}(q)K \text{sign}(-\dot{e}_a - \lambda e_a - \beta e_u + s_0) - s_0^T (\lambda s_0 + e_{3a} + 2\lambda\dot{e}_a + \lambda^T \lambda e_a - \lambda\beta e_u - \\ &\beta\dot{e}_u) \end{aligned} \quad (30)$$

Các sai số quan sát sẽ hội tụ về không, nghĩa là: $|e_i(t)| \rightarrow 0$. Do đó, (24) được viết lại như sau:

$$\dot{V}_{smc} \approx -s_0^T \overline{M}^{-1}(q)K \text{sign}(s_0) - s_0^T \lambda s_0 \quad (31)$$

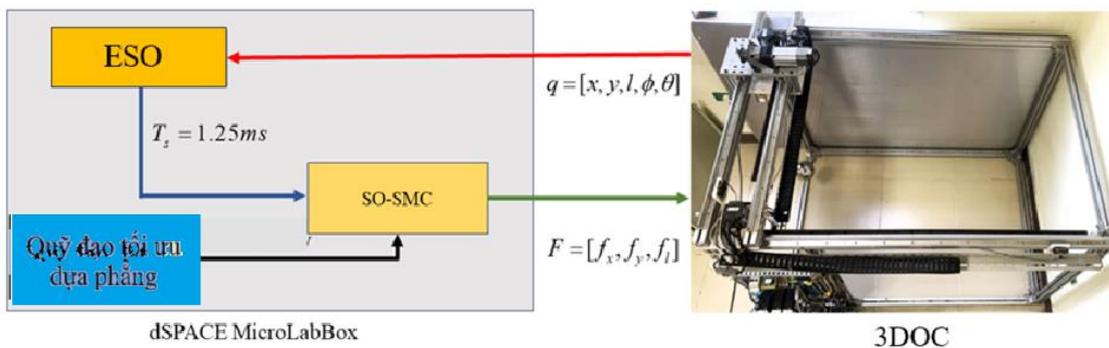
Ma trận quán tính $\overline{M}(q)$ là ma trận xác định dương, các ma trận tham số điều khiển λ , K xác định dương. Vì vậy, $\dot{V}_{smc} \leq 0$. s_0 bị chặn, mặt trượt ổn định tiệm cận. Mặt trượt được hội tụ về 0, nghĩa là $s_0 = \ddot{q}_a + \lambda\dot{q}_a + \beta\ddot{q}_u \rightarrow 0$. Dưới tác dụng của trọng lực, các góc xoay ϕ , θ sẽ hội tụ về 0, hay sai số $\ddot{q}_u \rightarrow 0$. Do đó, $\ddot{q}_a + \lambda\dot{q}_a \rightarrow 0$, có nghĩa $\ddot{q}_a \rightarrow 0$. Như vậy, sai số điều khiển \ddot{q}_a , $\ddot{q}_u \rightarrow 0$, bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên ESO đã điều khiển hệ thống 3DOC bám quỹ đạo tham chiếu.

5. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

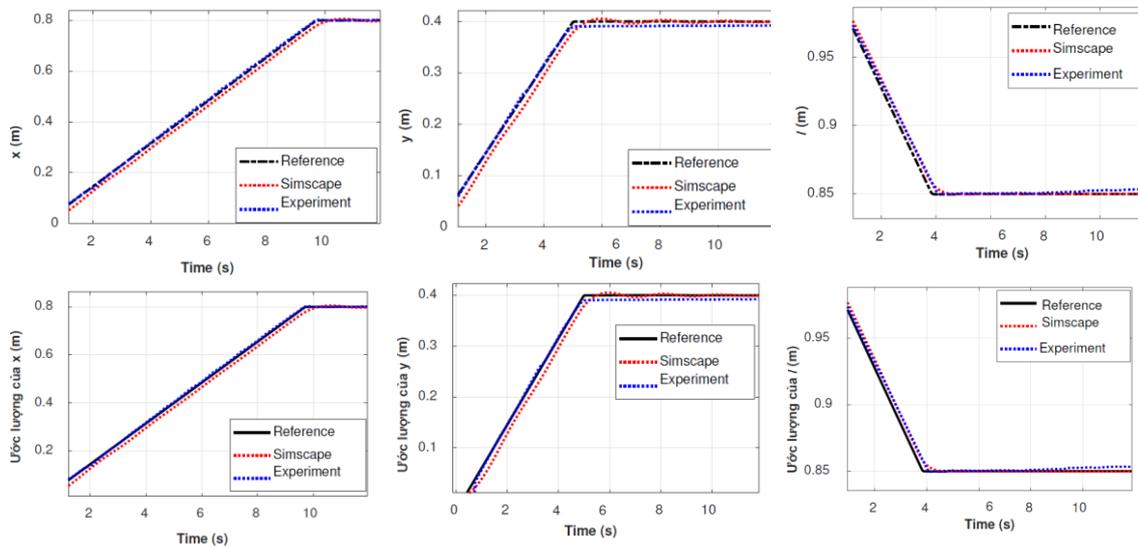
Trong phần này, thực nghiệm và mô phỏng Matlab/Simscape Multibody để kiểm chứng bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên ESO cho hệ thống 3DOC. Không gian làm việc của hệ thống 3DOC là một hình khối có kích thước 1,2m x 0,5m x 1,1m dọc theo trục x , trục y và trục z . Bộ điều khiển sẽ giúp hệ thống bám theo quỹ đạo mong muốn theo thời gian thực. Trạng thái ban đầu của 3DOC là $\mathbf{q}_0 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, vị trí cuối mong muốn là $\mathbf{q}_r = [0.8 \ 0.4 \ 0.85 \ 0 \ 0]^T$

Tham số của hệ thống 3DOC: $m_x = 12 \text{ kg}$, $m_y = 5 \text{ kg}$, $m_l = 2 \text{ kg}$, $m = 0.85 \text{ kg}$, $l_{\max} = 1 \text{ m}$, $b_x = 20 \text{ Nm/s}$, $b_y = 30 \text{ Nm/s}$, $b_l = 50 \text{ Nm/s}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Tham số bộ quan sát và bộ điều khiển: $N_p = 10$, $T_s = 0.2$, $P = \text{diag}(500, 500, 500, 200, 200)$, $Q = \text{diag}(1, 1, 1)$, $F_{\max} = [12 \ 12 \ 12]^T$, $q_{\max} = [1 \ 1 \ 1 \ 0.15 \ 0.15]^T$, $\lambda = \text{diag}(0.75, 0.75, 1)$, $\alpha_1 = -4$, $\alpha_2 = -3.5$, $K = \text{diag}(0.5, 0.5, 1)$

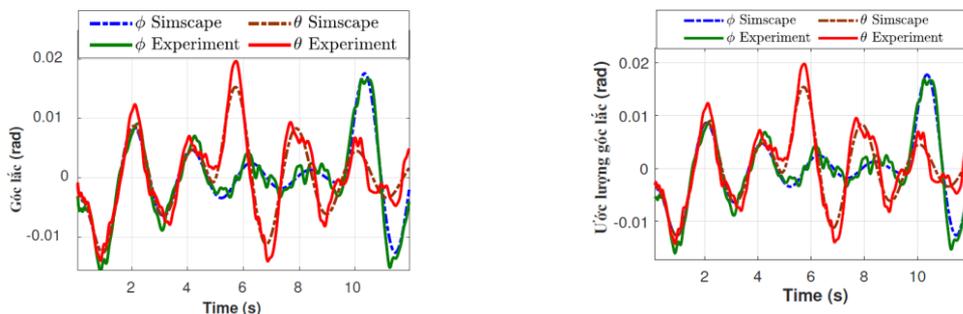


Hình 2. Thiết lập thí nghiệm của hệ thống 3DOC.

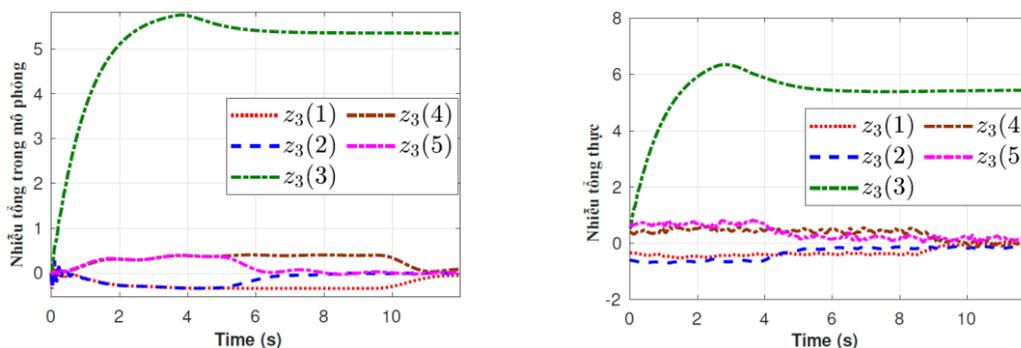


Hình 3. Điều khiển bám quỹ đạo và ước lượng trạng thái theo trục x , y , z .

Các kết quả trong hình 3-5 thể hiện điều khiển bám quỹ đạo theo các trục và ước lượng của chúng, góc lắc và ước lượng góc lắc. Kết quả cho thấy bộ điều khiển trượt bậc hai dựa trên bộ quan sát trạng thái mở rộng cho kết quả tốt, quỹ đạo chuyển động dọc theo trục x , y , z đã bám với quỹ đạo đặt, góc lắc của tải trọng rất nhỏ khoảng 0,015 (rad). ESO hoạt động hiệu quả, tín hiệu ước lượng bám giá trị thực. Như vậy, cho thấy tính hiệu quả và khả thi của phương pháp điều khiển đề xuất, lực tín hiệu điều khiển, góc xoay không vượt quá giới hạn và ước lượng ESO bám với giá trị thực.



Hình 4. Góc lắc và ước lượng của góc lắc.



Hình 5. Ước lượng nhiễu tổng.

6. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày phương pháp mới để điều khiển hệ thống 3DOC: bộ điều khiển SMC dựa trên ESO kết hợp với phương pháp lập kế hoạch chuyển động tối ưu về thời gian có tính đến các khía cạnh động lực học và giải quyết vấn đề chống rung trong 3DOC. Bộ ESO ước lượng đồng thời các biến trạng thái và nhiễu tổng gồm thành phần bất định của mô hình và nhiễu ngoài. Bộ điều khiển SMC_ESO điều khiển 3DOC bám quỹ đạo chuyển động theo các trục x, y, z và chống rung cho tải. Mô hình mô phỏng dựa trên Matlab/Simulink và mô hình thực nghiệm dựa trên quy mô phòng thí nghiệm 3DOC xác thực tính khả thi và tính bền vững của phương pháp điều khiển này.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách khoa Hà Nội (HUST) trong đề tài mã số T2023-TĐ-002.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. J.-H. Montonen, N. Nevaranta, M. Niemela, and T. Lindh, "Comparison of extrainsensitive input shaping and swing-angle-estimation-based slew control approaches for a tower crane," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 12, p. 5945, (2022).
- [2]. E. M. Abdel-Rahman, A. H. Nayfeh, and Z. N. Masoud, "Dynamics and control of cranes: A review," *Journal of Vibration and Control*, vol. 9, no. 7, pp. 863–908, (2003).
- [3]. Tuan L, Lee S, "Sliding mode controls of double-pendulum crane systems", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 1863-1873, 27(6), (2013).
- [4]. Lu B, Fang Y, Sun N "Sliding mode control for underactuated overhead cranes suffering from both matched and unmatched disturbances." *Mechatronics*, 47: 116–125, (2017).
- [5]. Kwon, Dongwoo, Myunghwan Eom, and Dongkyoung Chwa. "Anti-sway control of the overhead crane system using HOSM observer." *Journal of Electrical Engineering & Technology* 11.4: 1027-1034, (2016).
- [6]. Idrees, Muhammad. "Control of a Double-Pendulum Overhead Crane System Based on Hierarchical Sliding Mode Control Techniques." *Biophysical Reviews and Letters*: 1-16, (2023).

- [7]. Lei, Meizhen, et al. “Super-twisting disturbance-observer-based nonlinear control of the overhead crane system.” *Nonlinear Dynamics*: 1-11, (2023).
- [8]. Lv, Jixing, et al. “A fixed-time distributed extended state observer for uncertain second-order nonlinear system.” *ISA transactions* 138: 373-383, (2023).
- [9]. Z. Wang, J. Zha, and J. Wang, “Autonomous vehicle trajectory following: A flatness model predictive control approach with hardware-in-the-loop verification,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 5613– 5623, (2020).
- [10]. Z. Yu and W. Niu, “Flatness-based backstepping antisway control of underactuated crane systems under wind disturbance,” *Electronics*, vol. 12, no. 1, p. 244, (2023).

ABSTRACT

Flatness-based motion planning and a sliding mode control with an extended state observer for a gantry crane: a novel approach to payload positioning problems

This study proposes to produce a time-optimal motion controller for a single pendulum crane system based on the theory of construction so that the system transfers the load to the desired position while reducing vibration with variable rope length. The dynamics of the system are constructed by applying the Euler-Lagrange method. In addition, to improve robustness and noise effects, the study used a fixed-time extended state observer (ESO) and a sliding mode control (SMC). ESO provides an accurate estimate of the state and total disturbances in a fixed time. The expected trajectory is obtained by solving the optimal parameters of the flat output.

Keywords: Crane; Flatness; Sliding mode control; Extended state observer.