

ĐIỀU KHIỂN CÔNG TRỤC 3D DỰA TRÊN BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT BẬC PHÂN SỐ CONTROL STRATEGY OF A 3D-GANTRY CRANE BASED ON FRACTIONAL-ORDER SLIDING MODE CONTROL

PHẠM VĂN TRIỆU^{1*}, ĐẶNG VĂN TRỌNG²

¹Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Điện, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email liên hệ: phamvantrieu@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Trong bài báo, đối tượng mà chúng tôi xem xét đến là mô hình công trục 3D với năm bậc tự do. Để đối phó với một hệ thống phi tuyến, nhiều đầu vào, nhiều đầu ra và thiếu cơ cấu chấp hành này, chúng tôi trình bày một bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số. Bộ điều khiển này với bậc đạo hàm có thể điều chỉnh được, giúp ta có thể tìm điểm có đáp ứng tối ưu. Ngoài ra, việc xem xét tính ổn định và thời gian hội tụ cũng được trình bày. Các kết quả mô phỏng chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất được thực hiện thông qua phần mềm Matlab-Simulink.

Từ khóa: Công trục 3D, Phép toán bậc phân số, Bộ điều khiển trượt bậc phân số, Lý thuyết ổn định Lyapunov.

Abstract

In this paper, the object that we consider is a 3D crane model with five degrees of freedom. To deal with this nonlinear and multiple-input multiple-output (MIMO) system in which there is a lack of actuators, we present a fractional-order sliding mode controller. This controller has an adjustable fractional order so that we can find the point with the optimal response. In addition, the stability and convergence time is also taken into account. The simulation results proving the effectiveness of the proposed controller are conducted through Matlab-Simulink software.

Keywords: Three-dimensional (3D) gantry crane, Fractional calculus, Fractional-order Sliding Mode Control (FOSMC), Lyapunov's stability theory.

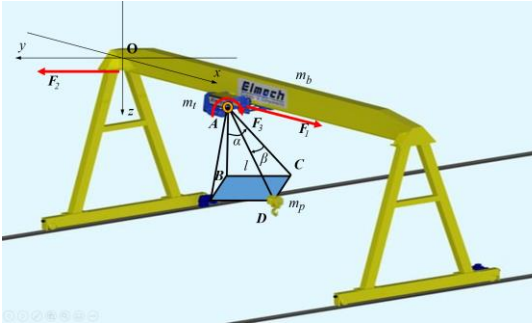
1. Giới thiệu

Công trục được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp. Có rất nhiều công trình liên quan đến nghiên cứu về mô hình hóa hệ công trục đã được thực hiện, phổ biến có thể kể đến như: mô hình hai bậc tự do trong [1] và [2], mô hình ba bậc tự do ở [3], [4], và [5], mô hình toán học với bốn bậc tự do trong [6] và mô

hình xem xét năm bậc tự do [7]. Hệ thống công trục hiện nay thường được vận hành chủ yếu bằng tay, điều này kết hợp với những tác động của môi trường sẽ làm giảm độ chính xác của hệ thống từ đó gây nguy hiểm cho người lao động. Vì vậy, việc thiết kế điều khiển công trục sao cho hệ thống có hiệu suất làm việc tốt nhất là vô cùng cần thiết. Bộ điều khiển PID là một trong những bộ điều khiển phổ biến nhất và được sử dụng nhiều trong công nghiệp do cấu trúc đơn giản, dễ điều chỉnh. Tuy nhiên, đối với những hệ thống phức tạp, hiệu quả và tính chính xác của bộ PID sẽ bị ảnh hưởng nếu chỉ dựa vào các cách điều chỉnh truyền thống. Để xử lý các ràng buộc trạng thái, nghiên cứu [8] đã sử dụng một phương pháp điều khiển phi tuyến cho hệ thống thiếu cơ cấu chấp hành. Bộ điều khiển thích nghi xây dựng dựa trên hàm Lyapunov chặn ở [9] đã được đề xuất để ngăn chặn các rung động không mong muốn của hệ thống công trục linh hoạt với giới hạn đầu ra biên. Nghiên cứu [10] đã sử dụng điều khiển trượt kết hợp với việc sử dụng mạng nơ-ron cho công trục 3D - một kỹ thuật điều khiển thích nghi với nhiễu và bất định. Bộ điều khiển trượt bậc hai được giới thiệu ở [10] và [11] đã xử lý được hiện tượng rung còn tồn tại trong bộ điều khiển trượt bậc một, tuy vậy việc thiết kế điều khiển theo phương pháp này lại khá phức tạp. Thêm vào đó, kỹ thuật điều khiển trượt bậc phân số đã được áp dụng nhiều trong các nghiên cứu gần đây như một giải pháp để xác định điểm đáp ứng tối ưu [12] và [13]. Gần đây, phương án kết hợp giữa bộ điều khiển chế độ trượt truyền thống và phép toán bậc phân số cũng đã được xem xét và áp dụng cho công trục trong [14] và [15]. Ngoài ra, trong nghiên cứu [7] còn kết hợp thêm lý thuyết về mạng nơ-ron để quan sát đầu ra và nhiễu.

Xuất phát từ những nghiên cứu trên, một thuật toán điều khiển chế độ trượt bậc phân số được áp dụng cho hệ công trục 3D được trình bày trong bài báo này. Kết cấu của bài viết sẽ bao gồm năm phần như sau: mô hình toán học ở dạng ma trận của hệ công trục 3D sẽ được đưa ra và biến đổi trong Phần 2; bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số được trình bày trong Phần 3; trong Phần 4; trình bày kết quả mô phỏng thông qua phần mềm Matlab-simulink; cuối cùng, kết luận và hướng nghiên cứu tương lai được đưa ra.

2. Mô hình toán học



Hình 1. Mô hình công trực 3D

Trong Hình 1, biểu diễn mô hình công trực 3D với ba đầu vào điều khiển $\mathbf{F} = [F_1 \ F_2 \ F_3]^T$ nhằm kiểm soát năm biến đầu ra $\mathbf{q} = [x \ y \ l \ \alpha \ \beta]^T$. Trong năm biến đầu ra ở trên, chỉ có ba biến x, y, l là các biến được dẫn động, trong khi đó hai biến còn lại là các chuyển động không được dẫn động và bị ràng buộc. Dựa trên nghiên cứu [16], mô hình động lực học của hệ công trực 3D được viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{F} \quad (1)$$

Trong đó: $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ là ma trận quán tính, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ liên quan đến lực Coriolis và lực ly tâm, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{5 \times 5}$ là ma trận cản, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{5 \times 1}$ là véc tơ trọng lực.

Để tạo cơ sở thuận lợi cho việc thiết kế bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số ở phần tiếp theo, phương trình được biến đổi thành 2 hệ con với biến trạng thái như sau: $\mathbf{q}_a = [x \ y \ l]^T$ và $\mathbf{q}_u = [\alpha \ \beta]^T$

$$\mathbf{M}_{11}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{D}_{11}\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{M}_{22}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{G}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

Sau các bước biến đổi toán học, các công thức trong (2) và (3) được viết lại như sau:

$$\bar{\mathbf{M}}_1(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_a \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{M}}_2(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_u \quad (5)$$

Trong đó:

$$\bar{\mathbf{M}}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_{11}(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q});$$

$$\bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}});$$

$$\bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_2(\mathbf{q});$$

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{F}; \quad \mathbf{F}_u = -\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F}_a;$$

$$\bar{\mathbf{M}}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{M}_{22}(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{12}(\mathbf{q});$$

$$\bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$- \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q})(\mathbf{D}_{11} + \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}));$$

$$\bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$$

$$- \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}});$$

$$\bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_2(\mathbf{q}) - \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{G}_1(\mathbf{q});$$

Như vậy, sau khi thực hiện biến đổi để đưa hệ thống (1) về hai hệ thống con trong phương trình (4) và (5), chúng tôi đã chỉ mối quan hệ giữa tín hiệu điều khiển và các biến được dẫn động, bị ràng buộc.

3. Chiến lược kiểm soát hệ công trực 3D

Bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số được thiết kế nhằm giúp \mathbf{q}_a tiến về $\mathbf{q}_{ad} = [x_d \ y_d \ l_d]^T$ và đảm bảo các dao động của \mathbf{q}_u tắt dần. Thay vì sử dụng đạo hàm cấp số nguyên cố định như thông thường, đạo hàm bậc phân số được xem là thuận lợi hơn vì có khả năng điều chỉnh. Bằng cách điều chỉnh những bậc đạo hàm, chúng tôi có thể có được những phản hồi tối ưu. Ngoài ra, việc xem xét tính ổn định và thời gian hữu hạn cũng được trình bày trong phần này.

3.1. Phép toán bậc phân số

Đầu tiên, những phép toán phân số cho hàm số $a(t)$ bất kỳ được đưa ra. Phép tích phân bậc phân số μ theo Riemann-Liouville [17] được định nghĩa như sau:

$${}_t^{\mu} I_t^{\mu} a(t) = {}_t^{\mu} D_t^{-\mu} a(t) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \int_{t_0}^t \frac{a(\tau)}{(t-\tau)^{1-\mu}} d\tau \quad (6)$$

Trong đó: $t > t_0$, t_0 và $\Gamma(\mu) = \int_0^{\infty} s^{\mu-1} s^{-t} ds$ lần lượt là thời điểm đầu và hàm Gamma.⁰

Phép đạo hàm bậc phân số μ theo Caputo [17] được định nghĩa như sau:

$${}_t^{\mu} D_t^{\mu} a(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m-\mu)} \int_{t_0}^t \frac{a^m(\tau)}{(t-\tau)^{1+\mu-m}} d\tau, m-1 < \mu < m \\ \frac{d^m a(t)}{dt^m}, \mu = m \end{cases} \quad (7)$$

với: $m-1 < \mu \leq m, m \in \mathbf{N}$.

Theo [17], tính chất sau được áp dụng cho các định nghĩa trên:

$${}_t D_t^\mu \left({}_t D_t^{-\eta} a(t) \right) = {}_t D_t^{\mu-\eta} a(t) \quad (8)$$

Trong đó: $m-1 < \eta \leq m$.

3.2. Bộ điều khiển trượt bậc phân số

Để tìm ra tín hiệu điều khiển thì mặt trượt bậc phân số $\mathbf{s} = [s_1 \quad s_2 \quad s_3]^T \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= D^\mu \mathbf{e}_a + \delta_1 \mathbf{e}_a + \delta_2 D^\mu \mathbf{e}_u + \delta_3 \mathbf{e}_u \\ &= D^{\mu-1} \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_1 \mathbf{e}_a + \delta_2 D^{\mu-1} \dot{\mathbf{e}}_u + \delta_3 \mathbf{e}_u \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó:

$\mathbf{e}_a = \mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$, $\mathbf{e}_u = \mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud} \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$ là các sai lệch giữa biến trạng thái và quỹ đạo mong muốn, D^μ là phép toán bậc phân số đã được định nghĩa trong phương trình (7), $\delta_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, $\delta_2 \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$, $\delta_3 \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$ là các điều khiển được thiết kế và mô tả như sau:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \text{diag}(\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{13}) \\ \delta_2 &= \begin{bmatrix} \delta_{21} & 0 \\ 0 & \delta_{22} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \delta_3 = \begin{bmatrix} \delta_{31} & 0 \\ 0 & \delta_{33} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Đạo hàm mặt trượt bậc phân số trong (9), ta được:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= D^{\mu+1} \mathbf{e}_a + \delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_2 D^{\mu+1} \mathbf{e}_u + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u \\ &= D^{\mu-1} \ddot{\mathbf{e}}_a + \delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_2 D^{\mu-1} \ddot{\mathbf{e}}_u + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u \end{aligned} \quad (10)$$

Thay thế các phương trình (4) và (5) vào phương trình (10), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= D^{\mu-1} \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) - \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q}) \right) \mathbf{F}_a \\ &\quad - D^{\mu-1} \left(\begin{aligned} & \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_a \\ & + \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_u \\ & + \bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) \\ & + \ddot{\mathbf{q}}_{ad} + \delta_2 \ddot{\mathbf{q}}_{ud} \end{aligned} \right) \\ &\quad + \delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u \end{aligned} \quad (11)$$

Thành phần véc tơ điều khiển giúp trạng thái của đối tượng ở lại trên mặt trượt phân số được đưa ra bằng cách xem xét khi $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{0}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{aeq}} &= \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) - \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q}) \right)^{-1} \\ &\quad \times \left(\begin{aligned} & \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_a \\ & + \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_u \\ & + \bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) + \ddot{\mathbf{q}}_{ad} + \ddot{\mathbf{q}}_{ud} \\ & - D^{1-\mu} (\delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u) \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Để duy trì các biến trạng thái của hệ thống trên bề mặt trượt, thành phần chuyển mạch phải được thực hiện. Do đó, bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số tổng thể sẽ bao gồm (12) và thành phần chuyển mạch được viết bởi:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{aeq}} &= \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) - \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{21}(\mathbf{q}) \mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q}) \right)^{-1} \\ &\quad \times \left(\begin{aligned} & \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_a \\ & + \left(\bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right) \dot{\mathbf{q}}_u \\ & + \bar{\mathbf{M}}_1^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) + \delta_2 \bar{\mathbf{M}}_2^{-1}(\mathbf{q}) \bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) + \ddot{\mathbf{q}}_{ad} + \ddot{\mathbf{q}}_{ud} \\ & - D^{1-\mu} (\delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u) \\ & - D^{1-\mu} (\delta_4 \text{sgn}(\mathbf{s})) \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó $\delta_4 = \text{diag}(\delta_{41}, \delta_{42}, \delta_{42})$ là tham số điều khiển được thiết kế.

Việc xem xét tính ổn định và xác định thời gian hội tụ được thực hiện và dựa trên một hàm ứng viên Lyapunov được đưa ra như sau:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} \quad (14)$$

Thực hiện đạo hàm công thức (14) và thay phương trình (10) vào đạo hàm của hàm Lyapunov ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} \\ &= \mathbf{s}^T \left(D^{\mu-1} \ddot{\mathbf{e}}_a + \delta_1 \dot{\mathbf{e}}_a + \delta_2 D^{\mu-1} \ddot{\mathbf{e}}_u + \delta_3 \dot{\mathbf{e}}_u \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Sau đó, véc tơ điều khiển trong phương trình (13) được thay vào phương trình (15) và sử dụng các phép toán biến đổi để rút gọn và đưa ra được kết quả như sau:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \delta_4 \text{sgn}(\mathbf{s}) \quad (16)$$

Vì vậy, ta có thể khẳng định được $\dot{V} \leq 0$ với ma trận δ_4 xác định dương, điều này đảm bảo sự ổn định của hệ công trực 3D. Ngoài ra, vấn đề thời gian hữu hạn trong bộ điều khiển cũng được xem xét bằng cách viết lại phương trình (16).

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s_1 \delta_{41} \text{sgn}(s_1) - s_2 \delta_{42} \text{sgn}(s_2) - s_3 \delta_{43} \text{sgn}(s_3) \\ &\leq -\delta_{\min} \sum_{i=1}^3 |s_i| \end{aligned} \quad (17)$$

Do $V^{0.5} = 2^{-0.5} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \leq \sum_{i=1}^3 |s_i|$ ta có:

$$\dot{V} \leq -\delta_{\min} \sum_{i=1}^3 |s_i| \leq -\delta_{\min} V^{0.5} \quad (18)$$

Thực hiện tích phân cho cả hai vế của phương trình

(18) từ thời điểm thời gian bằng 0 đến t_{\max} , ta có:

$$\int_{V(0)}^{V(t_{\max})} \frac{dV(t)}{V^{0.5}(t)} \leq - \int_0^{t_{\max}} \delta_{\min} dt \quad (19)$$

Sau các bước tính toán ta có được kết quả như sau:

$$2(V^{0.5}(t_{\max}) - V^{0.5}(0)) \leq -\delta_{\min} t_{\max} \quad (20)$$

Viết lại công thức (20), ta được:

$$t_{\max} \leq \frac{\sum_{i=1}^3 |s_i|}{\delta_{\min}} \quad (21)$$

Cuối cùng, thành phần hàm dấu trong bộ điều khiển (13) có thể gây ra hiện tượng rung. Vì vậy, chúng tôi thay thế hàm dấu bằng sự kết hợp của hàm khuếch đại bão hòa và hàm sigmoid trong nghiên cứu này.

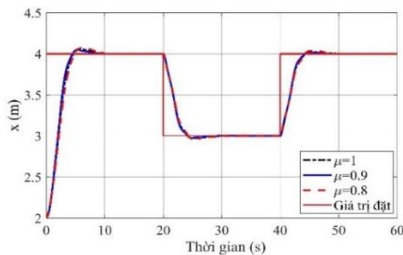
$$\text{sat}\left(\frac{\mathbf{s}}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} \tanh\left(\frac{\mathbf{s}}{\varepsilon}\right), & \left|\frac{\mathbf{s}}{\varepsilon}\right| \geq 1 \\ \frac{\mathbf{s}}{\varepsilon}, & \left|\frac{\mathbf{s}}{\varepsilon}\right| < 1 \end{cases} \quad (22)$$

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

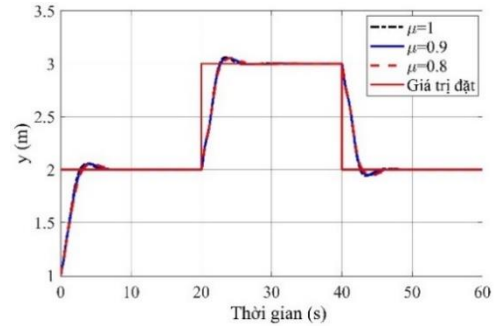
4. Mô phỏng

Việc kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển chế độ trượt (13) được thực hiện dựa trên phần mềm Matlab-Simulink với thời gian trích mẫu là 0.001s. Thông số về khối lượng và hệ số cản được sử dụng như sau: $m_b = 525 \text{ kg}$, $m_t = 55 \text{ kg}$, $m_p = 20 \text{ kg}$ và $b_1 = 18.35 \text{ Ns/m}$, $b_2 = 12.68 \text{ Ns/m}$. Những tham số của bộ điều khiển được lựa chọn như sau: $\delta_{11} = \delta_{12} = 1$, $\delta_{13} = 10$, $\delta_{21} = \delta_{22} = 0.1$, $k_{31} = -0.1$, $k_{32} = -0.4$, $k_{41} = k_{42} = 100$, $k_{43} = 500$. Để cho thấy khả năng điều chỉnh của bộ điều khiển chúng tôi xem xét ba bậc đạo hàm phân số $\mu = 0.8, 0.9, 1.0$ với giá trị đầu là $\mathbf{q}_a(0) = [2 \ 1 \ 0.5]^T$ và $\mathbf{q}_u = [0 \ 0]^T$.

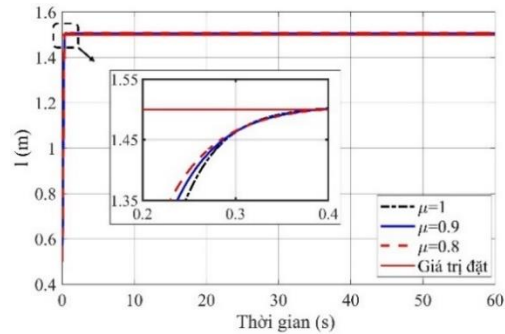
Trong Hình 2, Hình 3 và Hình 4, ba tín hiệu điều khiển được kích hoạt đồng thời để dẫn động xe con, xe cầu đến các điểm đến mà chúng tham chiếu biến thiên liên tục dưới dạng sóng vuông và khoảng cách từ xe con đến tải trọng nâng bám theo giá trị 1.5m. Ngoài ra, các biến trạng thái không được dẫn động có xu hướng tắt dần được biểu thị trong Hình 5 và 6.



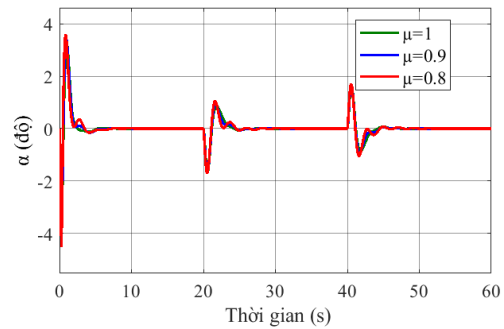
Hình 2. Đáp ứng vị trí của xe con



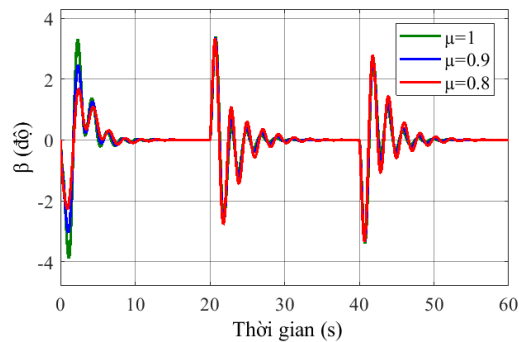
Hình 3. Đáp ứng vị trí của xe cầu



Hình 4. Đáp ứng độ dài của dây cáp



Hình 5. Góc lắc α của dây cáp



Hình 6. Góc lắc β của dây cáp

Bộ điều khiển chế độ trượt bậc phân số được đề xuất ổn định với tất cả đạo hàm bậc phân số cho hệ công trục 3D. 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.

5. Kết luận

Bằng cách sử dụng các kỹ thuật điều khiển chế độ trượt, các phép toán bậc phân số và lý thuyết ổn định Lyapunov, chúng tôi đã xây dựng thành công một bộ điều khiển mà giúp kiểm soát hệ công trục 3D 3 đầu vào, 5 đầu ra. Bộ điều khiển trượt bậc phân số được đề xuất đem đến hiệu suất tốt với đáp ứng của các biến trạng thái. Tính ổn định và thời gian hữu hạn cũng được xem xét trong nghiên cứu này như một cách kiểm chứng về mặt toán học. Ngoài ra, kiểm chứng mô phỏng cũng được xây dựng cho thấy khả năng điều chỉnh linh hoạt với bậc phân số - một tính năng ưu việt hơn bộ điều khiển chế độ trượt truyền thống. Tuy nhiên, cấu trúc điều khiển này còn phụ thuộc hoàn toàn vào mô hình toán học, yếu tố khó đo đạc chính xác, vì vậy, những lý thuyết về mạng mờ, mạng nơ-ron sẽ được chúng tôi xem xét trong các nghiên cứu tiếp theo. Việc tiến hành thực nghiệm kiểm chứng bộ điều khiển sẽ được thực hiện trong tương lai gần.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Sun, Y. Fang, and H. Chen, *A new antisming control method for underactuated cranes with unmodeled uncertainties: Theoretical design and hardware experiments*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.62, No.1, pp.453-465, 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327569.
- [2] T. Vyhlidal, M. Anderle, J. Busek, and S. I. Niculescu, *Time-Delay Algorithms for Damping Oscillations of Suspended Payload by Adjusting the Cable Length*, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol.22, No.5, pp.2319-2329, 2017, doi: 10.1109/TMECH.2017.2736942.
- [3] Y. Fang, P. Wang, N. Sun, and Y. Zhang, *Dynamics analysis and nonlinear control of an offshore boom crane*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.61, No.1, pp.414-427, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2251731.
- [4] N. Sun, T. Yang, Y. Fang, Y. Wu, and H. Chen, *Transportation control of double-pendulum cranes with a nonlinear quasi-pid scheme: Design and experiments*, IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst., Vol.49, No.7, pp.1408-1418, 2019, doi: 10.1109/TSMC.2018.2871627.
- [5] N. Sun, Y. Fang, H. Chen, Y. Wu, and B. Lu, *Nonlinear Antisming Control of Offshore Cranes with Unknown Parameters and Persistent Ship-Induced Perturbations: Theoretical Design and Hardware Experiments*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.65, No.3, pp.2629-2641, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2767523.
- [6] N. Sun, Y. Fang, H. Chen, B. Lu, and Y. Fu, *Slew/Translation Positioning and Swing Suppression for 4-DOF Tower Cranes with Parametric Uncertainties: Design and Hardware Experimentation*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.63, No.10, pp.6407-6418, 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2587249.
- [7] L. A. Tuan, *Neural Observer and Adaptive Fractional-Order Backstepping Fast-Terminal Sliding-Mode Control of RTG Cranes*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.68, No.1, pp.434-442, 2021, doi: 10.1109/TIE.2019.2962450.
- [8] H. Chen and N. Sun, *Nonlinear Control of Underactuated Systems Subject to Both Actuated and Unactuated State Constraints with Experimental Verification*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.67, No.9, pp.7702-7714, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2946541.
- [9] W. He, S. Zhang, and S. S. Ge, *Adaptive control of a flexible crane system with the boundary output constraint*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.61, No.8, pp.4126-4133, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2288200.
- [10] L. A. Tuan, H. M. Cuong, P. Van Trieu, L. C. Nho, V. D. Thuan, and L. V. Anh, *Adaptive neural network sliding mode control of shipboard container cranes considering actuator backlash*, Mech. Syst. Signal Process., Vol.112, pp.233-250, 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.04.030.
- [11] P. Van Trieu, D. D. Luu, H. M. Cuong, and L. A. Tuan, *Neural network integrated sliding mode control of floating container cranes*, 2017 Asian Control Conf. ASCC 2017, Vol.2018-January, pp.847-852, 2018, doi: 10.1109/ASCC.2017.8287281.
- [12] H. Ren, X. Wang, J. Fan, and O. Kaynak, *Fractional order sliding mode control of a pneumatic position servo system*, J. Franklin Inst., Vol.356, No.12, pp.6160-6174, 2019, doi: 10.1016/j.jfranklin.2019.05.024.
- [13] S. Huang and J. Wang, *Fixed-time fractional-order sliding mode control for nonlinear power systems*, JVC/Journal Vib. Control, Vol.26, No.17-18, pp.1425-1434, 2020, doi: 10.1177/1077546319898311.

- [14] P. Van Trieu, H. M. Cuong, H. Q. Dong, N. H. Tuan, and L. A. Tuan, *Adaptive fractional-order fast terminal sliding mode with fault-tolerant control for underactuated mechanical systems: Application to tower cranes*, Autom. Constr., Vol.123, March 2021, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103533.
- [15] H. M. Cuong, H. Q. Dong, P. Van Trieu, and L. A. Tuan, *Adaptive fractional-order terminal sliding mode control of rubber-tired gantry cranes with uncertainties and unknown disturbances*, Mech. Syst. Signal Process., Vo.154, 1 June 2021, 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107601.
- [16] D. V. Diep and V. V. Khoa, *PID-Controllers Tuning Optimization with PSO Algorithm for Nonlinear Gantry Crane System*, Int. J. Eng. Comput. Sci., Vol.15, pp.6631-6635, 2014.
- [17] F. V. Monje, C. A. M., Chen Y. Vinagre, B.M. Xue D., *Fractiona-Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*, Springer, London, 2019.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84996-335-0>

Ngày nhận bài:	10/02/2022
Ngày nhận bản sửa:	10/03/2022
Ngày duyệt đăng:	13/03/2022