

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VỚI CÁCH TIẾP CẬN HÀM MŨ CHO CẦU TRỤC 3D

SLIDING MODE CONTROL DESIGN WITH EXPONENTIAL REACHING LAW OF A THREE-DIMENSIONAL OVERHEAD CRANE

PHẠM VĂN TRIỆU^{1*}, MAI THẾ TRỌNG¹, 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 nghiên cứu này, bộ điều khiển trượt được áp dụng trên đối tượng cầu trục 3D - một hệ thống phi tuyến nhiều đầu vào, đầu ra. Một cách tiếp cận mới được đề xuất cho phép giảm hiện tượng rung trên đầu vào điều khiển, đồng thời đảm bảo hiệu suất bám của bộ điều khiển ở chế độ trạng thái ổn định. Cách tiếp cận này bao gồm việc thiết kế luật phi tuyến bằng cách sử dụng một hàm số mũ giúp hệ cầu trục tiến đến vị trí mong muốn và đồng thời loại bỏ rung lắc của tải trong quá trình vận chuyển. Các kết quả mô phỏng chứng minh tính hiệu quả của bộ điều khiển được đề xuất và so sánh với bộ điều khiển trượt với hàm khuếch đại bão hòa. Ngoài ra, tính bền vững của bộ điều khiển đối với sự không chắc chắn trong các thông số của cầu trục cũng được khảo sát thông qua mô phỏng.

Từ khóa: Cầu trục 3D, bộ điều khiển trượt, luật tiếp cận hàm mũ, Hàm Lyapunov.

Abstract

In this study, Sliding Mode Control (SMC) is applied on a three-dimensional (3D) overhead crane - a multi-input, multi-output nonlinear system. A novel approach is proposed that allows chattering reduction on control input, while keeping high tracking performance of the controller in a steady-state regime. This approach involves designing a nonlinear law using an exponential function that helps to effectively control the tower crane system to desired positions and eliminate cargo swings during the transport process. The simulation results demonstrate the efficiency of the proposed controller and compare it with a sliding controller with a saturation gain function. In addition, the certainty of the controller against the uncertainty in the crane parameters is also investigated through simulation.

Keywords: Three-dimensional (3D) overhead crane, Sliding Mode Control (SMC), Exponential Reaching Law (ERL), Lyapunov function.

1. Giới thiệu

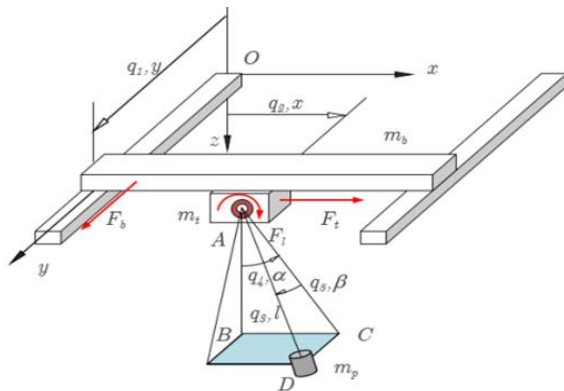
Cầu trục có vai trò quan trọng trong việc thực hiện công nghiệp hóa, hiện đại hóa, nó giúp nâng cao năng lực bốc xếp và vận chuyển. Ngày nay, trong các ngành xây dựng công nghiệp, cơ khí, đóng tàu, vận tải, vật liệu xây dựng, cầu cảng..., các thiết bị nâng chuyển như cầu trục có vai trò rất quan trọng trong việc tăng năng suất lao động. Một trong những vấn đề cơ bản trong nghiên cứu tính toán, thiết kế và điều khiển để nâng cao hiệu quả làm việc của cầu trục là phải xây dựng các mô hình động lực học hệ thống cầu trục sát với mô hình thực. Tùy theo mục tiêu nghiên cứu, nhiều mô hình động lực học chuyển động của tháp cầu trục đã được xây dựng, cụ thể: Mô hình 2 bậc tự do trong [1], [2], [3]; mô hình ba bậc tự do trong [4], [5]; mô hình bốn bậc tự do trong [6], [7] và mô hình năm bậc tự do trong [8], [9]. Hệ thống cầu trục hiện đại thường được trang bị các bộ điều khiển chất lượng cao để giảm sự lắc của hàng hóa và tăng độ chính xác các chuyển động. Trong [10] đề xuất cấu trúc hệ thống điều khiển phản hồi vòng kín sử dụng bộ điều khiển PD để điều khiển cả vị trí xe con và giảm góc lắc. Kết quả cho thấy hiệu suất điều khiển tốt, đáp ứng nhanh nhưng bộ điều khiển PID truyền thống dễ mất điều khiển khi xuất hiện nhiễu, việc chỉnh định lại phụ thuộc vào người kỹ sư vận hành. Trong hai nghiên cứu [8] và [11] đã sử dụng kỹ thuật nắn tín hiệu vào (input shaping) cho vòng điều khiển hở. Tuy nhiên, phương pháp này có hiệu quả không cao trong việc giảm góc lắc ngược của khối lượng hàng. Một đề xuất hệ thống điều khiển phản hồi vòng kín sử dụng logic mờ được trình bày trong [12]. Một phương pháp điều khiển bền vững dựa trên điều khiển trượt cũng thường được áp dụng cho hệ phi tuyến, phương pháp này rất hữu dụng cho hệ hệt dẫn động như hệ cầu trục. Lý thuyết chung của phương pháp điều khiển trượt đối với hệ hệt dẫn động lần đầu được giới thiệu trong [13], sau đó được

phát triển tiếp bởi nghiên cứu [14] và được hoàn thiện trong [15]. Mặc dù, lý thuyết điều khiển trượt có ưu điểm là khả năng bền vững với bất định nhưng lại có một nhược điểm lớn gây ra bởi hiện tượng rung, nó ảnh hưởng đến hiệu suất đáp ứng đầu ra cũng như giảm tuổi thọ của các thiết bị. Vì vậy, chúng tôi đề xuất thuật toán nhằm xử lý hiện tượng rung trong bộ điều khiển trượt nhưng vẫn đảm bảo hiệu suất điều khiển và khả năng bền vững.

Trong bài báo này, tác giả trình bày thuật toán điều khiển trượt kết hợp kỹ thuật chống rung dựa trên luật tiếp cận hàm mũ cho hệ cầu trục năm bậc tự do. Ngoài ra, việc kiểm chứng hiệu suất của bộ điều khiển đề xuất được thực hiện trên phần mềm mô phỏng. Cấu trúc của nghiên cứu bao gồm các nội dung như sau: trong Phần 2, phân tích mô hình động lực học của hệ cầu trục; thuật toán điều khiển được trình bày trong Phần 3, trong Phần 4, thể hiện kết quả mô phỏng; cuối cùng, kết luận về nghiên cứu.

2. Mô hình động lực học hệ cầu trục

Cầu trục thông thường gồm ba bộ phận chính: Cơ cấu nâng hạ thực hiện nhiệm vụ nâng và hạ hàng; xe con cùng với cơ cấu di chuyển xe con thực hiện nhiệm vụ di chuyển xe con và hàng hóa theo trục ngang; và xe cầu cùng với cơ cấu di chuyển cầu thực hiện nhiệm vụ di chuyển cả cầu trục và tải chạy theo trục dọc. Trong quá trình làm việc, cầu trục 3D thực hiện năm chuyển động chính gồm chuyển động của xe cầu, chuyển động của xe con, chuyển động nâng hạ hàng và hai chuyển động lắc của hàng. Theo Hình 1, vị trí của hệ cầu trục và tải trọng trong trường hợp tổng quát được mô tả với năm tọa độ suy rộng. Các tọa độ này được định nghĩa như sau: x là khoảng cách từ xe con đến tải trọng nâng; y là dịch chuyển của xe cầu theo trục Oy; l là khoảng cách từ xe con đến tải trọng nâng; α là góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng đứng ABC song song Oxz; β là góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng ACD.



Hình 1. Mô hình cầu trục 3D

Trong các tọa độ suy rộng trên x, y, l là các chuyển động được dẫn động, còn α, β là các chuyển động tự phát. Ngoài ra, m_b, m_t, m_p lần lượt là khối lượng của xe cầu, xe con và hàng hóa; b_1, b_2 lần lượt là hệ số cản di chuyển của xe cầu và xe con; F_1, F_2, F_3 lần lượt là lực tác dụng lên xe cầu, xe con và cáp [17].

Sử dụng phương trình Lagrange và sau các bước tính toán, mô hình toán học của cầu trục thu được ở 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 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ là ma trận quán tính, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ liên quan đến lực Coriolis và lực ly tâm, \mathbf{D} là ma trận cản, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ là véc tơ trọng lực, \mathbf{F} là véc tơ chứa các biến điều khiển. Các thành phần này biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{15} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 \\ m_{51} & m_{52} & 0 & 0 & m_{55} \end{bmatrix}; \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & c_{15} \\ 0 & 0 & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ 0 & 0 & 0 & c_{34} & c_{35} \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ 0 & 0 & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}; \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}(b_1, b_2, 0, 0, 0).$$

Các thành phần của ma trận quán tính được xác định bởi:

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_b + m_t + m_p; m_{13} = m_p \sin(\beta); m_{15} = m_p l \cos(\beta); \\ m_{22} &= m_t + m_p; m_{23} = m_p \sin(\alpha) \cos(\beta); \\ m_{24} &= m_p l \cos(\alpha) \cos(\beta); m_{25} = -m_p l \sin(\alpha) \sin(\beta); \\ m_{31} &= m_p \sin(\beta); m_{32} = m_p \sin(\alpha) \cos(\beta); m_{33} = m_p; \\ m_{42} &= m_{24}; m_{44} = m_p l^2 \cos^2(\beta); m_{51} = m_p l \cos(\beta); \\ m_{52} &= m_{25}; m_{55} = m_p l^2. \end{aligned}$$

Các hệ số của ma trận $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ được mô tả như sau:

$$\begin{aligned} c_{13} &= m_p \dot{\beta} \cos(\beta); c_{15} = m_p \dot{\alpha} \cos(\beta) - m_p l \dot{\beta} \sin(\beta); \\ c_{23} &= m_p \dot{\alpha} \cos(\alpha) \cos(\beta) - m_p \dot{\beta} \sin(\alpha) \sin(\beta); \\ c_{24} &= m_p \dot{\alpha} \cos(\alpha) \cos(\beta) - m_p l \dot{\alpha} \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ &\quad - m_p l \dot{\beta} \cos(\alpha) \sin(\beta); \\ c_{25} &= -m_p \dot{l} \sin(\alpha) \sin(\beta) - m_p l \dot{\alpha} \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ &\quad - m_p l \dot{\beta} \sin(\alpha) \cos(\beta); \\ c_{34} &= -m_p l \dot{\alpha} \cos^2(\beta); c_{35} = -m_p l \dot{\beta}; c_{43} = m_p l \dot{\alpha} \cos^2(\beta); \\ c_{44} &= m_p l \dot{l} \cos^2(\beta) - m_p l^2 \dot{\beta} \cos(\beta) \sin(\beta); \\ c_{45} &= -m_p l^2 \dot{\alpha} \cos(\beta) \sin(\beta); c_{53} = m_p l \dot{\beta}; \\ c_{54} &= m_p l \dot{\alpha} \cos(\beta) \sin(\beta); c_{55} = m_p l \dot{l}; \end{aligned}$$

và các thành phần khác không được biểu diễn dưới dạng:

$$g_1 = -m_p g \cos(\alpha) \cos(\beta); \quad g_2 = m_p g l \sin(\alpha) \cos(\beta);$$

$$g_3 = m_p g l \cos(\alpha) \sin(\beta).$$

Hệ cầu trục 3D có năm biến trạng thái cần được kiểm soát, nhưng chúng ta chỉ có ba đầu vào điều khiển. Do đó, phương trình động lực học của hệ thống (1) được phân tích thành hai hệ thống con với các biến trạng thái lần lượt là: $\mathbf{q}_a = [x \ y \ l]^T$ và $\mathbf{q}_u = [\alpha \ \beta]^T$, được biểu diễn như sau:

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

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

Phương trình (2) và (3) được viết lại như sau:

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{M}_{11}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{pmatrix} \mathbf{F} - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a \\ -\mathbf{C}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{D}_{11}\dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{G}_1(\mathbf{q}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{pmatrix} -\mathbf{M}_{21}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a \\ -\mathbf{C}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{G}_2(\mathbf{q}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Thay phương trình (5) vào phương trình (2) và phương trình (4) vào phương trình (3), ta thu được hệ thống con như sau:

$$\bar{\mathbf{M}}_1(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_a \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{M}}_2(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) = \mathbf{F}_u \quad (7)$$

Trong đó:

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

$$\bar{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{D}_{11} + \mathbf{C}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}_{12}(\mathbf{q})\mathbf{M}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{C}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}});$$

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

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

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

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

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

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

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

Phương trình (6) và (7) là một dạng khác để mô tả hệ cầu trục 3D trong biểu thị rõ ràng mối quan hệ của biến ràng buộc với tín hiệu điều khiển. Dựa trên phương pháp điều khiển trượt, mô hình động lực học này sẽ được sử dụng để thiết kế điều khiển trong phần tiếp theo.

3. Thiết kế điều khiển bền vững

Mục tiêu chính của bộ điều khiển được thiết kế là đạt được vị trí mong muốn của ba biến trạng thái x, y, l và dập tắt được các dao động góc tải. Ngoài ra, việc xử lý hiện tượng rung trong bộ điều khiển trượt truyền thống cũng được xem xét trong phần này thông qua cách tiếp cận bởi hàm mũ. Gọi x_d, y_d, l_d lần lượt là các giá trị mong muốn của x, y, l và các giá trị mong muốn của α, β là không. Do đó, $\mathbf{q}_{ad} = [x_d \ y_d \ l_d]^T$ và $\mathbf{q}_u = \mathbf{0}$.

Đầu tiên, hai véc tơ sai lệch được định nghĩa như sau:

$$\mathbf{e}_a = \mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad} = \begin{bmatrix} x - x_d \\ y - y_d \\ l - l_d \end{bmatrix}; \quad \mathbf{e}_u = \mathbf{q}_u - \mathbf{q}_{ud} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

Mặt trượt được chúng tôi chọn như sau:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}}_a + \mathbf{k}_1 \mathbf{e}_a + \mathbf{k}_2 \dot{\mathbf{e}}_u + \mathbf{k}_3 \mathbf{e}_u \quad (8)$$

Trong đó:

$\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ s_3]^T$, $\mathbf{k}_1 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, $\mathbf{k}_2 \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$, $\mathbf{k}_3 \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$ là các thông số thiết kế được mô tả như sau:

$$\mathbf{k}_1 = \text{diag}(k_{11}, k_{12}, k_{13})$$

$$\mathbf{k}_2 = \begin{bmatrix} k_{21} & 0 \\ 0 & k_{22} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{k}_3 = \begin{bmatrix} k_{31} & 0 \\ 0 & k_{33} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Thực hiện đạo hàm mặt trượt trong phương trình (8), chúng ta viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{s}} = (\ddot{\mathbf{q}}_a - \ddot{\mathbf{q}}_{ad}) + \mathbf{k}_1 (\dot{\mathbf{q}}_a - \dot{\mathbf{q}}_{ad}) + \mathbf{k}_2 (\ddot{\mathbf{q}}_u - \ddot{\mathbf{q}}_{ud}) + \mathbf{k}_3 (\dot{\mathbf{q}}_u - \dot{\mathbf{q}}_{ud}) \quad (9)$$

Tiếp theo, việc thiết kế tín hiệu điều khiển \mathbf{F}_1 dựa trên bộ điều khiển trượt bao gồm hai thành phần: tín hiệu điều khiển \mathbf{F}_{1sw} giúp trạng thái tiến về mặt trượt và tín hiệu điều khiển \mathbf{F}_{1eq} giữ cho biến trạng thái ở lại trên mặt trượt.

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{1eq} + \mathbf{F}_{1sw} \quad (10)$$

Tín hiệu điều khiển giữ cho biến trạng thái ở lại trên mặt trượt sẽ phải tạo ra $\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{0}$, vì vậy thay phương trình (4) và (5) vào (9), ta có:

$$\mathbf{F}_{1eq} = \bar{\mathbf{C}}_{11}\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{12}\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_1 - \left((\mathbf{I}_3 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{M}_{21})\bar{\mathbf{M}}_1^{-1} \right. \\ \left. \begin{array}{l} \left((\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{C}_{21})\dot{\mathbf{q}}_a \\ + (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{C}_{22})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{G}_2 \right) \end{array} \right) \quad (11)$$

Đối với tín hiệu điều khiển \mathbf{F}_{1sw} , chúng tôi đề xuất một tín hiệu dựa trên hàm sign như sau:

$$\mathbf{F}_{1sw} = -\mathbf{k}_4\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (12)$$

trong đó $\mathbf{k}_4 = \text{diag}(k_{41}, k_{42}, k_{43})$ với k_{41}, k_{42}, k_{43} là các giá trị dương.

Tuy nhiên, việc sử dụng tín hiệu điều khiển trong phương trình (12) lại gây ra hiện tượng rung, ảnh hưởng xấu đến tuổi thọ của thiết bị. Do đó, trong bài báo này, luật cập nhật theo hàm mũ trong [16] được sử dụng để giải quyết hiện tượng rung mà vẫn duy trì được hiệu suất bám của bộ điều khiển trượt. Tín hiệu điều khiển \mathbf{F}_{1sw} được thiết kế lại như sau:

$$\mathbf{F}_{1sw} = -\mathbf{N}^{-1}(\mathbf{s})\mathbf{k}_4\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (13)$$

với:

$$\mathbf{N}(\mathbf{s}) = \text{diag}(N_1, N_2, N_3)$$

$$[N]_i = r_i + (1 - r_i)e^{-q_i|s_i|^{p_i}}, q_i, p_i > 0, r_i \in (0, 1)$$

Cuối cùng, tín hiệu điều khiển được viết lại như sau:

$$\mathbf{F}_1 = \bar{\mathbf{C}}_{11}\dot{\mathbf{q}}_a + \bar{\mathbf{C}}_{12}\dot{\mathbf{q}}_u + \bar{\mathbf{G}}_1 - \left((\mathbf{I}_3 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{M}_{21})\bar{\mathbf{M}}_1^{-1} \right. \\ \left. \begin{array}{l} \left((\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{C}_{21})\dot{\mathbf{q}}_a \\ + (\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{C}_{22})\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{k}_2\mathbf{M}_{22}^{-1}\mathbf{G}_2 \right) \end{array} \right) - \frac{\mathbf{k}_4}{\mathbf{N}(\mathbf{s})}\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (14)$$

Để xem xét tính ổn định, một hàm Lyapunov được xem xét như sau:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2}\mathbf{s}^T\mathbf{s} \quad (15)$$

Thực hiện đạo hàm công thức (15), ta có:

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{s}^T\dot{\mathbf{s}} \quad (16)$$

Thay các phương trình (4), (5) và (14) vào (16), đạo hàm của hàm Lyapunov được viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{V}} = -\mathbf{s}^T \frac{\mathbf{k}_4}{\mathbf{N}(\mathbf{s})}\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (17)$$

Rõ ràng $\mathbf{N}(\mathbf{s})$ luôn xác định dương, vì vậy hệ thống sẽ ổn định với mọi \mathbf{k}_4 xác định dương, điều này đảm bảo sự hội tụ của quỹ đạo trạng thái đối với mặt trượt. Ngoài ra, vấn đề thời gian hữu hạn trong bộ

điều khiển trượt dựa trên cách tiếp cận theo hàm mũ cũng đã được xem xét tổng quát trong nghiên cứu [16].

Mặt khác, theo tài liệu [5], các trạng thái ràng buộc xuất hiện trên mặt trượt sẽ hội tụ về giá trị mong muốn nếu các điều kiện thích hợp được thỏa mãn. Các điều kiện đủ được phân tích bằng cách xem xét động lực học bề mặt trượt $\mathbf{s} = \mathbf{0}$. Viết lại phương trình (8) với $\dot{\mathbf{q}}_{ad} = \mathbf{0}$; $\mathbf{q}_{ud} = \mathbf{0}$ cho kết quả:

$$\dot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{k}_1(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) + \mathbf{k}_2\dot{\mathbf{q}}_u + \mathbf{k}_3\mathbf{q}_u = \mathbf{0} \quad (18)$$

hoặc:

$$\dot{\mathbf{q}}_a = -\mathbf{k}_1(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) - \mathbf{k}_2\dot{\mathbf{q}}_u - \mathbf{k}_3\mathbf{q}_u \quad (19)$$

Bằng cách xác định các biến trạng thái $\mathbf{x} = [\mathbf{q}_u \quad \dot{\mathbf{q}}_u \quad \mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}]^T$ và sử dụng định lý tuyến tính hóa của Lyapunov như trong nghiên cứu [5], chúng ta nhận được các điều kiện đủ sau:

$$k_{21} < l_d; k_{22} < l_d; \\ k_{31} < (l_d - 1)k_{11}; k_{32} < (l_d - 1)k_{12}. \quad (20)$$

4. Mô phỏng

Trong phần này, kết quả mô phỏng dựa trên phần mềm Matlab-Simulink với thời gian trích mẫu 0,01s sẽ được đưa ra để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán điều khiển. Thông số của mô hình cầu trục 3D và thông số của bộ điều khiển được đưa ra trong Bảng 1.

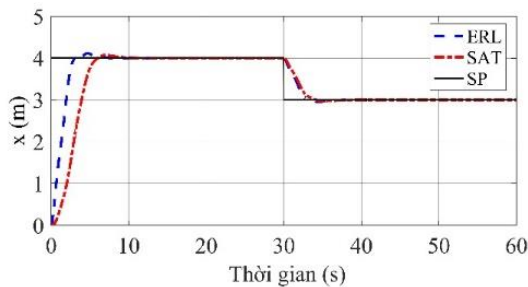
Đầu tiên, chúng tôi thực hiện mô phỏng kiểm chứng khả năng đáp ứng của bộ điều khiển trượt kết hợp với cách tiếp cận theo hàm mũ, đồng thời so sánh với bộ điều khiển trượt sử dụng hàm khuếch đại bão hòa trong phương trình (21) để cho thấy khả năng xử lý hiện tượng rung của chúng.

Bảng 1. Thông số hệ thống và thông số điều khiển

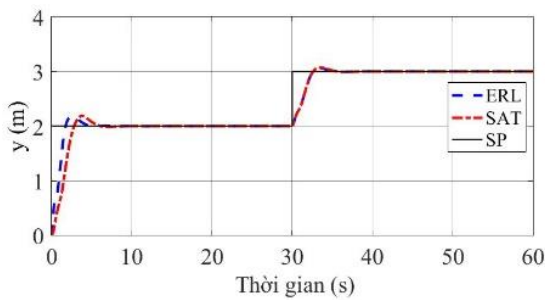
Tham số	Giá trị	Đơn vị
m_b	5	kg
m_t	2	kg
m_p	5	kg
b_1	18,35	Ns/m
b_2	12,68	Ns/m
$k_{11}=k_{12}$	2	
k_{13}	10	
$k_{21}=k_{22}$	0.1	
$k_{31}=k_{32}$	-5	
$k_{41}=k_{42}$	1000	
k_{43}	800	
$p_1=p_2=p_3$	10	
$q_1=q_2=q_3$	2	
$r_1=r_2=r_3$	0.2	

$$y = \text{sat}(x) \Leftrightarrow \begin{cases} y = -1 & x \leq -1 \\ y = x & -1 < x < 1 \\ y = 1 & x \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

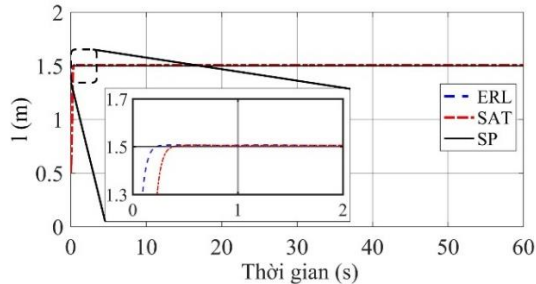
Các kết quả trong Hình 2 đến Hình 6 so sánh hiệu suất bám của bộ điều khiển chế độ trượt bằng cách sử dụng luật tiếp cận hàm mũ (ERL) và hàm khuếch đại bão hòa (SAT) với giá trị tham chiếu (SP). Bằng cách sử dụng luật tiếp cận hàm mũ, bộ điều khiển đạt được kết quả tốt hơn so với sử dụng hàm khuếch đại bão hòa do thời gian đáp ứng và độ quá điều chỉnh được giảm xuống.



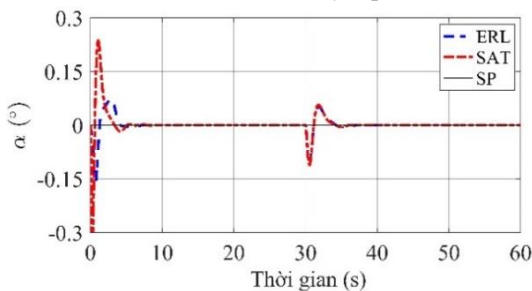
Hình 2. Vị trí xe con



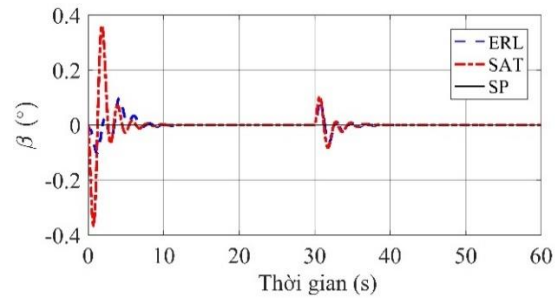
Hình 3. Vị trí xe cầu



Hình 4. Độ dài dây cáp



Hình 5. Góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng đứng ABC

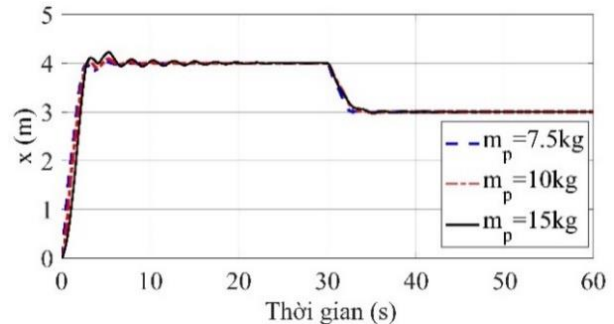


Hình 6. Góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng ACD

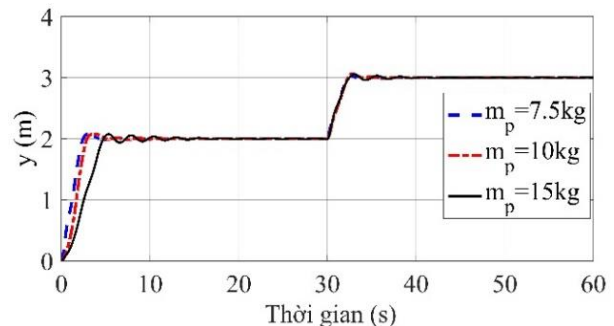
Tóm lại, các bộ điều khiển được đề xuất ổn định tất cả các đáp ứng của hệ cầu trục 3D với hiệu suất điều khiển tốt. Các đáp ứng về vị trí của xe con, xe cầu và chiều dài dây bám theo quỹ đạo đặt với khoảng thời gian đáp ứng ngắn. Hai đáp ứng góc lắc của dây cáp luôn được giữ nhỏ và hoàn toàn biến mất ở trạng thái ổn định.

Tiếp theo, khả năng bền vững của bộ điều khiển được nghiên cứu liên quan đến sự thay đổi trong thông số hoạt động của cầu trục 3D cũng được xem xét trong phần này.

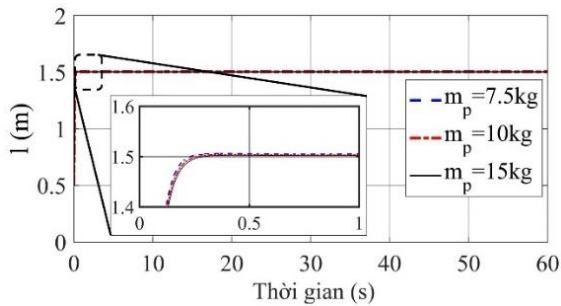
Thông thường, khối lượng tải trọng rất đa dạng và tùy thuộc vào từng điều kiện hoạt động riêng. Bằng cách thay đổi về khối lượng của hàng hóa, với các giá trị 7.5 kg, 10 kg, 15 kg ta có thể nhận được các đáp ứng của hệ thống như trong Hình 7 đến Hình 11. Lưu ý rằng các thông số bộ điều khiển vẫn hoàn toàn giống như trong phần Bảng 1.



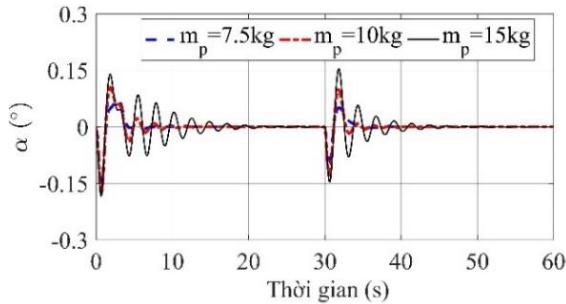
Hình 7. Vị trí xe con với bất định



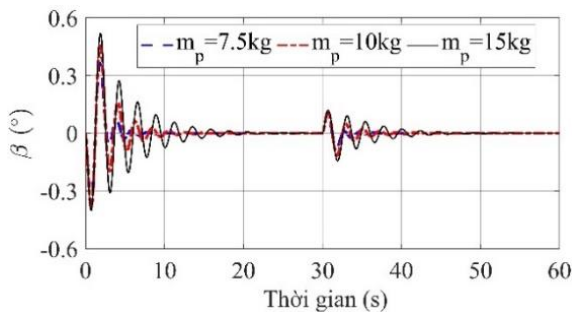
Hình 8. Vị trí xe cầu với bất định



Hình 9. Độ dài dây cáp với bất định



Hình 10. Góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng đứng ABC khi xuất hiện bất định



Hình 11. Góc lắc của dây cáp trong mặt phẳng ACD khi xuất hiện bất định

Các kết quả mô phỏng trong trường hợp có sự thay đổi trong các tham số hệ thống cho thấy khả năng bền vững của các bộ điều khiển trượt với luật tiếp cận theo hàm số mũ được đề xuất. Hệ thống cần trục luôn ổn định ngay cả khi khối lượng hàng hóa khác nhau, tuy nhiên, khi khối lượng càng lớn thì thời gian đáp ứng của đối tượng càng tăng.

5. Kết luận

Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã đưa ra và biến đổi phương trình động lực học của hệ cầu trục 3D để phù hợp với phương pháp thiết kế điều khiển đề xuất. Bộ điều khiển được đề xuất ổn định tiệm cận với tất cả các đầu ra của hệ thống: các vị trí xe con, xe cầu và chiều dài dây cáp theo dõi chính xác giá trị mong muốn, dao động của hàng hóa được triệt tiêu hoàn toàn. Tính bền vững của bộ điều khiển được đảm bảo trong trường hợp có sự thay đổi trong tham số của hệ thống. Tuy nhiên, cấu trúc điều khiển được đề xuất

trong nghiên cứu này lại yêu cầu tất cả thông tin của mô hình, nhưng một số thông số của cầu trục không thể biết trong thực tế. Vì vậy, để giải quyết trường hợp một số thông số cần trục 3D không được biết, một bộ điều khiển có khả năng thích nghi sẽ được xem xét trong nghiên cứu trong tương lai. Ngoài ra, việc nghiên cứu thực nghiệm sẽ được áp dụng để xác nhận kết quả mô phỏng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Giua, M. Sanna, and C. Seatzu, *Observer-Controller Design for Three Dimensional Overhead Cranes Using Time-Scaling*, Math. Comput. Model. Dyn. Syst., Vol.7, No.1, pp.77-107, 2001.
- [2] Y. B. Kim, *A new approach to anti-sway system design problem*, KSME Int. J., Vol.18, No.8, pp. 1306-1311, 2004.
- [3] Z. Wang and B. W. Surgenor, *A problem with the LQ control of overhead cranes*, J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME, Vol.128, No.2, pp.436-440, 2006.
- [4] J. H. Yang and K. S. Yang, *Adaptive coupling control for overhead crane systems*, Mechatronics, Vol.17, No.2-3, pp.143-152, 2007.
- [5] N. B. Almutairi and M. Zribi, *Sliding mode control of a three-dimensional overhead crane*, JVC/Journal Vib. Control, Vol.15, No.11, pp.1679-1730, 2009.
- [6] D. Chwa, *Nonlinear tracking control of 3-D overhead cranes against the initial swing angle and the variation of payload weight*, IEEE Trans. Control Syst. Technol., Vol.17, No.4, pp.876-883, 2009.
- [7] A. Giua, C. Seatzu, and G. Usai, *Observer-controller design for cranes via Lyapunov equivalence*, Automatica, Vol.35, No.4, pp.669-678, 1999.
- [8] W. Singhose, L. Porter, M. Kenison, and E. Krikkku, *Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes*, Control Eng. Pract., Vol.8, No.10, pp.1159-1165, 2000.
- [9] W. Singhose, D. Kim, and M. Kenison, *Input shaping control of double-pendulum bridge crane oscillations*, J. Dyn. Syst. Meas. Control. Trans. ASME, Vol.130, No.3, pp.1-7, 2008.
- [10] H. Osumi, A. Miura, and S. Eiraku, *Positioning of wire suspension system using CCD cameras*, 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS, pp.1665-1670, 2005.

- [11] H. Park, D. Chwa, and K. S. Hong, *A feedback linearization control of container cranes: Varying rope length*, Int. J. Control. Autom. Syst., Vol.5, No.4, pp.379-387, 2007.
- [12] H. Lee and S. Cho, *A new fuzzy-logic anti-swing control for industrial three-dimensional overhead cranes*, pp. 2956-2961, 2001.
- [13] H. C. Cho and K. S. Lee, *Adaptive control and stability analysis of nonlinear crane systems with perturbation*, J. Mech. Sci. Technol., Vol.22, No.6, pp.1091-1098, 2008.
- [14] H. Ashrafiuon and R. S. Erwin, *Sliding mode control of underactuated multibody systems and its application to shape change control*, Int. J. Control, Vol.81, No.12, pp.1849-1858, 2008.
- [15] V. Sankaranarayanan and A. D. Mahindrakar, *Control of a class of underactuated mechanical systems using sliding modes*, IEEE Trans. Robot., Vol.25, No.2, pp.459-467, 2009.
- [16] C. J. Fallaha, M. Saad, H. Y. Kanaan, and K. Al-Haddad, *Sliding-Mode Robot Control With Exponential Reaching Law*, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol.58, No.2, pp.600-610, 2011.
- [17] Diep, D. V., and V. V. Khoa. *PID-controllers tuning optimization with pso algorithm for nonlinear gantry crane system*. International Journal of Engineering and Computer Science 3.6 pp.6631-6635, 2014.

Ngày nhận bài:	09/12/2021
Ngày nhận bản sửa:	17/12/2021
Ngày duyệt đăng:	21/12/2021