

ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN THỤ ĐỘNG KẾT HỢP QUAN SÁT CHO HỆ THỐNG CẦU TRỤC MÔ HÌNH CON LẮC ĐÔI

APPLICATION A PASSIVE CONTROLLER COMBINED EXTENDED STATE OBSERVER FOR CRANE WITH DOUBLE PENDULUM EFFECT

Bùi Thị Khánh Hòa^{1*},
Hà Văn Phương¹, Phạm Văn Huy¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.164>

TÓM TẮT

Nghiên cứu đề xuất một bộ điều khiển thụ động kết hợp bộ quan sát trạng thái cho hệ thống cầu trục con lắc đôi. Động lực học của hệ thống được xây dựng bằng cách áp dụng phương trình Euler - Lagrange. Dựa trên phương trình động lực học, bộ điều khiển được xây dựng cho phép hệ thống di chuyển tải trọng tới vị trí mong muốn đồng thời giảm rung lắc. Bộ điều khiển đảm bảo tính ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov. Mô phỏng được thực hiện để xác thực tính chính xác và hiệu quả của bộ điều khiển. Do yêu cầu về độ chính xác về vị trí, góc dao động nhỏ, thời gian đáp ứng không quá lớn nên bộ điều khiển phải có chất lượng cao và phù hợp với từng hệ thống.

Từ khóa: Cầu trục, điều khiển thụ động, bộ quan sát trạng thái.

ABSTRACT

The study proposes a passive controller combined with a state observer for the double pendulum crane system. The dynamics of the system are built by applying the Euler-Lagrange equation. Based on the equation of dynamics, a controller is built that allows the system to move the load to the desired position while reducing vibration. The controller ensures stability according to Lyapunov standards. Simulation is performed to validate the accuracy and efficiency of the controller. Due to the position accuracy requirements, slight oscillation angle, and transit time of the crane, the controller must be of high quality and suitable for each system.

Keywords: Overhead crane, passive control, Extended State Observer.

¹Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: hoabtk@hau.edu.vn.

Ngày nhận bài: 10/8/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 24/9/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2023

1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật, các đối tượng điều khiển trong công nghiệp ngày càng phức tạp và đòi hỏi sự thích ứng của các hệ điều khiển. Hệ thống cầu trục là một trong những đại diện tiêu biểu, ứng dụng phổ biến trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp vận tải, nhà máy luyện kim, trong các cảng biển, kho bãi, xây dựng

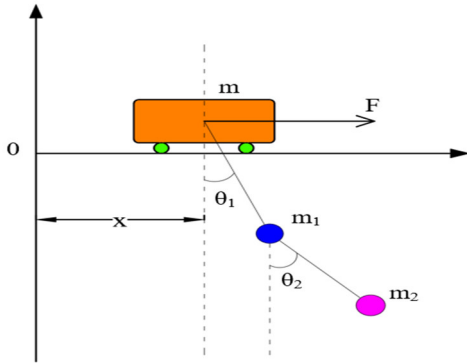
lắp đặt,... với chi phí lắp đặt thấp, dễ dàng trong công việc thay thế và bảo trì hệ thống. Vì vậy việc nghiên cứu, phát triển hệ thống cầu trục thu hút sự quan tâm lớn của các nhà khoa học trong nhiều thập kỉ gần đây. Trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu về động lực học và điều khiển cầu trục bao gồm mô phỏng và thực nghiệm, nhiều thuật toán điều khiển được sử dụng trong nghiên cứu điều khiển cầu trục, mỗi thuật toán điều khiển đều có những ưu nhược điểm khác nhau. Điều khiển tuyến tính (Linear Control) [1], bộ điều khiển tuyến tính khó đáp ứng được cho hệ cầu trục khi tính đến ma sát hay sự thay đổi của dây treo. Điều khiển phi tuyến (Non-linear Control) [2], bộ điều khiển phi tuyến cũng cần phải xác định chính xác mô hình điều khiển. Điều khiển tối ưu (Optimal Control) [3], với điều khiển tối ưu tập trung vào tối ưu về thời gian, năng lượng. Tuy nhiên, thuật toán này không tập trung cải thiện chất lượng (độ rung lắc, độ quá điều chỉnh,...). Điều khiển bền vững (Robust Control) [4], với ưu điểm không cần mô hình chính xác. Điều khiển thích nghi (Adaptive Control) [5], có khả năng thích nghi với sự thay đổi của thông số hệ thống và nhiễu tác động. Điều khiển trượt (Sliding mode control) [6] và điều khiển hiện đại/điều khiển thông minh (Modern Control/Intelligent Control) [8, 9], các bộ điều khiển thông minh có khả năng thích nghi và không bắt buộc phải có mô hình chính xác của đối tượng điều khiển. Bộ điều khiển MPC (Model Predictive Control) [10], có ưu điểm của nó trong việc giải quyết ràng buộc của hệ thống.

Hệ thống cầu trục con lắc kép với tính chất hệt cơ cấu chấp hành có khả năng di chuyển theo phương ngang cũng như nâng chuyển theo phương thẳng đứng. Hệ thống nâng chuyển có thể được gắn cố định trong nhà xưởng hoặc được đặt trên bệ di động để tăng tính linh hoạt. Do thiết kế cơ khí của cơ cấu nâng chuyển và tính mềm của dây cầu dẫn đến sự rung lắc của tải trọng trong quá trình vận hành làm giảm hiệu suất, độ an toàn của cơ cấu nâng chuyển, người và các thiết bị xung quanh. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng mô hình cầu trục con lắc kép trong không gian 2D với 4 bậc tự do bao gồm chuyển động của xe và 2 chuyển động của hai tải trọng.

Trong bài báo này, phương pháp điều khiển điều khiển thụ động kết hợp bộ quan sát trạng thái để cải thiện chất lượng điều khiển của hệ thống, nâng cao hiệu suất làm việc được đề xuất, triển khai. Nghiên cứu thực hiện xây dựng mô hình cầu trục kiểu con lắc kép trong không gian hai chiều trên phần mềm Matlab/Simulink.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CỦA HỆ THỐNG

Cấu trúc kiểu con kép trong không gian 2D được mô tả trong hình 1.



Hình 1. Mô hình hóa cầu trục kiểu con lắc kép

Trong mô hình cầu trục kiểu con lắc kép trọng lượng của xe đẩy được kí hiệu là m (kg), trọng lượng móc treo là m1, trọng lượng của tải trọng là m2, lực tác dụng lên xe đẩy F(N), góc dao động của móc so với phương thẳng đứng là θ1, góc dao động của tải trọng so với phương thẳng đứng là θ2 và vị trí của xe theo phương ngang là x(m).

Xuất phát từ phương trình Lagrange ta có :

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

Trong đó: L là lagrange, qi là tọa độ tổng quát, Ti là ngoại lực tác dụng

$$L \text{ được tính theo công thức: } L = K - P \tag{2}$$

Trong đó: K là động năng của hệ, P là thế năng của hệ.

Từ hình 1 ta được động năng của hệ được tính bằng:

$$K = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_1 (v_{1x}^2 + v_{1y}^2) + \frac{1}{2} m_2 (v_{2x}^2 + v_{2y}^2) \tag{3}$$

Trong đó: v1x, v1y là vận tốc móc treo theo hướng x và y.

v2x, v2y là vận tốc tải trọng theo hướng x và y.

$$v_{1x} = \dot{x} + l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1, \quad v_{1y} = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \tag{4}$$

$$v_{2x} = \dot{x} + l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2, \quad v_{2y} = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2$$

Thế năng của hệ được tính:

$$P = m \cdot g \cdot l_1 (1 - \cos \theta_1) + m_2 \cdot g [l_1 (1 - \cos \theta_1) + l_2 (1 - \cos \theta_2)] \tag{5}$$

Phương trình Lagrange cho hệ cầu trục kiểu con lắc kép là:

$$L = K - P = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_1 (v_{1x}^2 + v_{1y}^2) + \frac{1}{2} m_2 (v_{2x}^2 + v_{2y}^2) - m \cdot g \cdot l_1 (1 - \cos \theta) - m_2 \cdot g [l_1 (1 - \cos \theta_1) + l_2 (1 - \cos \theta_2)] \tag{6}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = (m + m_1 + m_2) \ddot{x} + (m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 - (m_1 + m_2) l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2^2 \cos \theta_2 - m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 = F \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = (m_1 + m_2) l_1 \ddot{x} \cos \theta_1 + (m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 = 0 \tag{8}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = m_2 l_2 \ddot{x} \cos \theta_2 + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g l_2 \sin \theta_2 = 0 \tag{9}$$

Từ công thức (7), (8), (9) ta được các hệ phương trình động học của hệ là:

$$\begin{cases} -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g l_2 \sin \theta_2 = 0 \\ (m + m_1 + m_2) \ddot{x} + (m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_1 + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - (m_1 + m_2) l_1 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_1 - m_2 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 = f \\ (m_1 + m_2) l_1 \ddot{x} \cos \theta_1 + (m_1 + m_2) l_1 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 = 0 \\ m_2 l_2 \ddot{x} \cos \theta_2 + m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 l_2 \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g l_2 \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \tag{10}$$

Mô hình được xây dựng dưới dạng ma trận như sau:

Phương trình trạng thái của hệ cầu trục con lắc kép có dạng [1]:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau \tag{11}$$

Trong đó:

q = [x θ1 θ2]^T là một vector của các biến tọa độ suy rộng.

τ = [F 0 0]^T là một vector chứa lực tổng quát.

M(q) là ma trận quán tính 3x3.

C(q, q̇)q̇ là vector chứa các momen hướng tâm.

G(q) là vector của lực hấp dẫn.

g là gia tốc trọng trường, g = 9,8m/s².

Các ma trận M(q), C(q, q̇)q̇, G(q) được xác định:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m + m_1 + m_2 & (m_1 + m_2) l_1 \cos \theta_1 & m_2 l_2 \cos \theta_2 \\ (m_1 + m_2) l_1 \cos \theta_1 & (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ m_2 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -(m_1 + m_2) l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 & -m_2 l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ 0 & -m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$G(q) = [0 \quad (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 \quad m_2 g l_2 \sin \theta_2]^T \tag{14}$$

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG

3.1. Bộ điều khiển thụ động (PBAC: Passivity - Base Anti-sway Control)

Tính thụ động là một trong những khái niệm hấp dẫn nhất về mặt vật lý trong lý thuyết hệ thống và đã được sử dụng như một công cụ cơ bản trong việc phát triển các công cụ điều khiển cho các hệ thống tuyến tính và phi tuyến. Điều khiển theo nguyên lý thụ động là thuật toán điều khiển dựa trên đặc tính thụ động của hệ thống với mục tiêu làm cho hệ kín cũng là một hệ thụ động với hàm lưu trữ năng lượng mong muốn [12 - 15]. Hệ thống cầu trục treo kiểu con lắc kép là hệ thụ động [11] có tổng năng lượng của hệ thống được xác định bởi động năng cộng với thế năng như sau:

$$E(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + P(q) \quad (15)$$

Trong đó: $\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}$ là động năng của hệ, $P(q)$ là thế năng của hệ.

Thực hiện đạo hàm (15) với thời gian t ta được:

$$\dot{E}(q, \dot{q}) = \dot{q}^T \tau + \frac{1}{2} \dot{q}^T [M(\dot{q}) - 2C(q, \dot{q})] \dot{q} = \dot{q}^T \tau + \frac{1}{2} \dot{q}^T N(q) \dot{q} \quad (16)$$

Trong đó: $N(q, \dot{q}) = \dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ là ma trận đối xứng chéo do đó $\dot{q}^T N(q) \dot{q} = 0$

Công thức (16) trở thành: $\dot{E}(q, \dot{q}) = \dot{q}^T \tau \quad (17)$

Với $q = [x, \theta_1, \theta_2]^T$, $\tau = [f, 0, 0]^T$ thay vào (17) ta được:

$$\dot{E}(q, \dot{q}) = \dot{x} f \quad (18)$$

Tích phân 2 vế của phương trình ta được:

$$\int_0^t \dot{x} f dt = \int_0^t \dot{E}(q, \dot{q}) dt = E(q(t), \dot{q}(t)) - E(q(0), \dot{q}(0)) \quad (19)$$

Do $E(q(t), \dot{q}(t)) \geq 0$, công thức (19) có thể viết thành:

$$\int_0^t \dot{x} f dt \geq -E(q(0), \dot{q}(0)) \quad (20)$$

Ta thấy $(f | \dot{x})_t \geq -E(q(0), \dot{q}(0))$, từ định nghĩa về tính thụ động công thức (19) chỉ ra rằng hệ thống cầu trục kiểu con lắc kép bị động đối với đầu vào f và đầu ra \dot{x} . Do đó, có thể phát triển bộ điều khiển chống rung thông qua thuộc tính của sự thụ động.

Chọn hàm Lyapunov:

$$V(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} k_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} k_2 (x - x_d)^2 + k_3 (E(q, \dot{q}) - P(q_d)) \quad (21)$$

Trong đó: x_d là vị trí đặt mong muốn (m).

k_1, k_2, k_3 là các hằng số.

$P(q_d)$ là thế năng tại vị trí mong muốn.

Đạo hàm $V(q, \dot{q})$ theo thời gian ta được:

$$\dot{V}(q, \dot{q}) = k_1 \dot{x} \ddot{x} + k_2 \dot{x} (x - x_d) + k_3 \dot{E}(q, \dot{q}) \quad (22)$$

Ta thay thế công thức (18) vào công thức (22) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{V}(q, \dot{q}) &= k_1 \dot{x} \ddot{x} + k_2 \dot{x} (x - x_d) + k_3 \dot{x} f \\ &= \dot{x} (k_1 \ddot{x} + k_2 (x - x_d) + k_3 f) \end{aligned} \quad (23)$$

Để đảm bảo ổn định vòng kín Lyapunov thì hàm mong muốn là:

$$\dot{V}(q, \dot{q}) = -k_4 \dot{x}^2 \quad (24)$$

Trong đó: k_4 là một hằng số dương

3.2. Bộ quan sát trạng thái (ESO: extended state observation)

Trong phương trình động lực học phi tuyến, một số biến trạng thái như vận tốc của con lắc hoặc xe đẩy (\dot{q}) khó có thể đo được. Bộ quan sát trạng thái (ESO) được thiết kế để xử lý nhiễu loạn bên trong, không chỉ quan sát các biến trạng thái mà còn ước tính phần phi tuyến không chắc chắn của hệ thống và nhiễu loạn [16].

Trong một bộ quan sát được thiết kế, các biến trạng thái được định nghĩa như sau:

$$x_1 = q; x_2 = \dot{q} \quad (25)$$

Từ phương trình (11), động lực học của hệ thống có thể viết lại dưới dạng:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = H^1(q)F - H^{-1}(q)(C(q, \dot{q}) + G(q) + D) \end{cases} \quad (26)$$

Trong đó, D là nhiễu ảnh hưởng đến cầu trục, $D = [d_x, d_{\theta_1}, d_{\theta_2}]^T$

đặt $f(q, \dot{q}, t) = H^1(q)F - H^{-1}(q)(C(q, \dot{q}) + G(q) + D)$

vector hàm phi tuyến $f(q, \dot{q}, t) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ biểu diễn cả phần phi tuyến bất định và nhiễu loạn gọi là nhiễu toàn phần. Lúc này nhiễu loạn toàn phần trở thành biến trạng thái mở rộng $f(q, \dot{q}, t) = x_3$ của hệ thống.

Giả thiết (*) nhiễu tổng $f(q, \dot{q}, t)$ và đạo hàm của nó giả định có giới hạn và liên tục.

Công thức (26) được viết lại:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + H^{-1}(q)F \\ \dot{x}_3 = \zeta(t) \end{cases} \quad (27)$$

Trong đó, $\zeta(t)$ là đạo hàm của $f(q, \dot{q}, t)$. Các biến z_i được định nghĩa là các biến quan sát của biến trạng thái x_i , ($i = 1 - 3$). Do đó, sai lệch của bộ quan sát $e_i = z_i - x_i$ là xác định. Dựa vào công thức (27) công thức bộ quan sát được viết lại như sau:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \Lambda_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = x_3 + H^{-1}(q)F - \Lambda_1 F \Lambda_1 \\ \dot{z}_3 = -\Lambda_2 F \Lambda_2 \end{cases} \quad (28)$$

Trong đó $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$, là các ma trận dương có kích thước 3×3 . $F \Lambda_1$ và $F \Lambda_2$ là các hàm của e_1 được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned}
 Fal_1(e_1, \gamma, \delta) &= \begin{cases} \frac{e_1}{\delta^{1-\gamma_1}} & \max[e_1] \leq \delta \\ [e_1]^{\gamma_1} \text{sign}(e_1) & \max[e_1] > \delta \end{cases} \\
 Fal_2(e_1, \gamma, \delta) &= \begin{cases} \frac{e_1}{\delta^{1-\gamma_2}} & \max[e_1] \leq \delta \\ [e_1]^{\gamma_2} \text{sign}(e_1) & \max[e_1] > \delta \end{cases}
 \end{aligned} \tag{29}$$

Trong đó, $\delta, \gamma_1, \gamma_2$ là các tham số dương trong đó $\gamma_1 \in (0, 1)$ và $\gamma_2 \in (0, 1)$

Từ công thức (28), (29) ta có công thức tính sai lệch của bộ quan sát ESO.

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \Lambda_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \Lambda_2 Fal_1 \\ \dot{e}_3 = \zeta(t) - \Lambda_3 Fal_2 \end{cases} \tag{30}$$

Sai số trong phương trình động học được đề cập trong giả thiết (*) sẽ xấp xỉ về 0 nếu các hệ số trong ma trận Λ_1 đủ lớn.

Chứng minh: Xét hàm Lyapunov:

$$V_{ESO} = \frac{1}{2} e_1^T K_1 e_1 + \frac{1}{2} e_2^T K_2 e_2 + \frac{1}{2} e_3^T K_3 e_3 \tag{31}$$

Trong đó K_1, K_2, K_3 là các hằng số dương. Đạo hàm của hàm Lyapunov (31) là:

$$\dot{V}_{ESO} = e_1^T K_1 \dot{e}_1 + e_2^T K_2 \dot{e}_2 + e_3^T K_3 \dot{e}_3 \tag{32}$$

Thay (30) vào (32) được:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_{ESO} &= -e_1^T K_1 \Lambda_1 e_1 + e_1^T K_1 e_2 - e_2^T K_2 \Lambda_2 Fal_1 \\
 &\quad - e_3^T K_3 \Lambda_3 Fal_2 + e_2^T K_2 e_3 - e_3^T K_3 \zeta(t)
 \end{aligned}$$

Nếu lựa chọn tham số Λ_1 đủ lớn thì $\dot{V} < 0$ thì sai lệch sẽ tiến về 0 và tính ổn định của ESO được chứng minh.

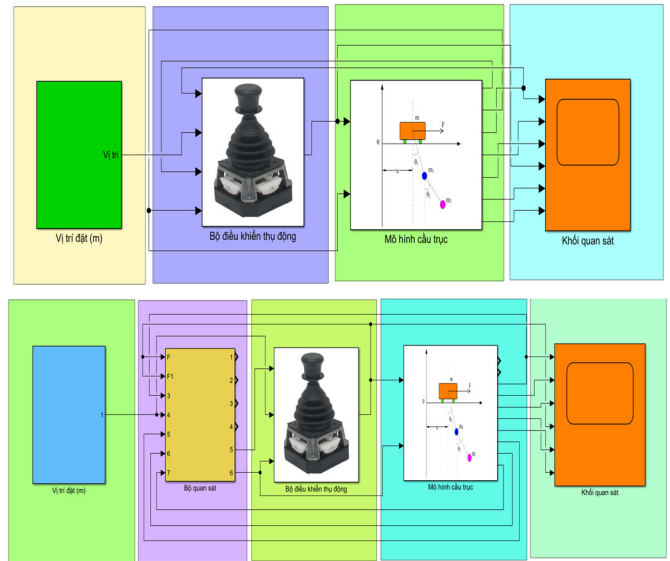
4. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Mô phỏng thực hiện hai trường hợp khi không có bộ quan sát ESO và trường hợp có bộ quan sát ESO trong hai giai đoạn: giai đoạn 1 trong 10s đầu tiên, vị trí xe được đặt tại vị trí cách vị trí ban đầu là 0,6m. Giai đoạn 2 là trong 10s tiếp theo, xe di chuyển về vị trí ban đầu tương ứng với vị trí đặt và cả trong hai giai đoạn thì góc dao động của móc treo và tải trọng phải luôn nằm trong giá trị cho phép là $-10^\circ \leq \theta_1 \leq 10^\circ$. Thông số được sử dụng trong bài mô phỏng được trình bày tại bảng 1.

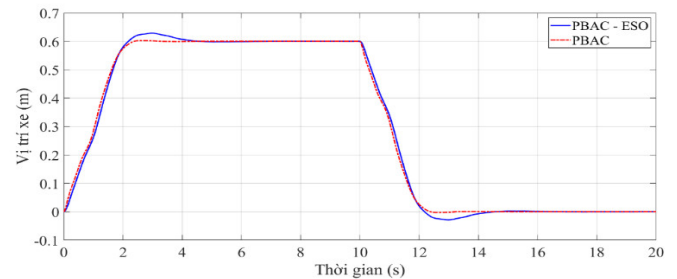
Bảng 1. Thông số của hệ thống khi không sử dụng bộ điều khiển

STT	Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Khối lượng xe con	m	0,5	Kg
2	Khối lượng móc	m_1	0,25	Kg
3	Khối lượng tải trọng	m_2	0,5	Kg
4	Chiều dài dây l_1	l_1	0,5	m
5	Chiều dài dây l_2	l_2	0,5	m
6	Lực tác dụng max F_{max}	F	1	N
7	Gia tốc trọng trường	g	9,81	m/s^2

Kết quả thu được về quỹ đạo chuyển động của xe chỉ ra trên hình 3, với bộ điều khiển thụ động có dùng bộ quan sát đã đưa xe đến vị trí đặt trong khoảng thời gian 4,5s và có xuất hiện một lần vọt lố khoảng 0,4m. Với bộ điều khiển thụ động không có bộ quan sát, xe con được đưa đến vị trí đặt trong khoảng thời gian 2,5s và không xuất hiện sự quá điều chỉnh trong suốt quá trình di chuyển.

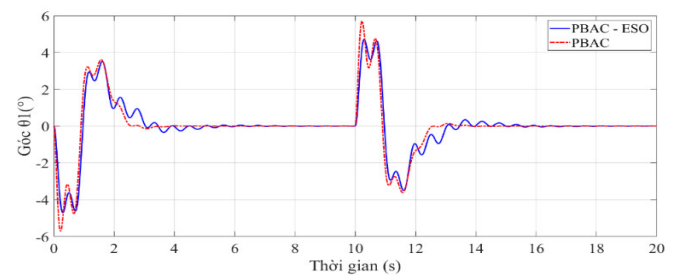


Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển cầu trục kiểu con lắc kép



Hình 3. Quỹ đạo của xe trong hai trường hợp

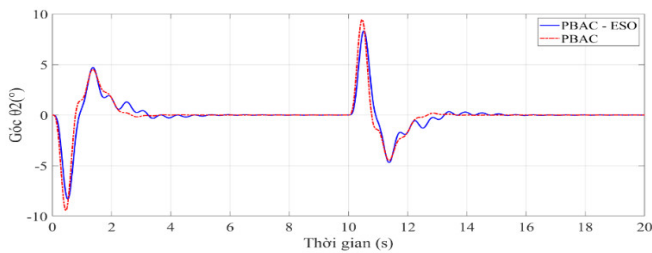
Hình 6 và 7 là vận tốc góc dao động của móc treo và tải trọng tương ứng. Ta thấy rằng, khi dùng bộ điều khiển không có bộ quan sát sẽ cho giá trị độ vọt lố ban đầu đều lớn khoảng 0,7 rad/s, nhưng thời gian quá độ lại ngắn hơn là 4s. Khi có bộ quan sát độ quá điều chỉnh ban đầu là nhỏ hơn 0,45 rad/s nhưng thời gian đi đến ổn định tại dài hơn nhiều vào khoảng 7,5s.



Hình 4. Góc dao động của móc treo

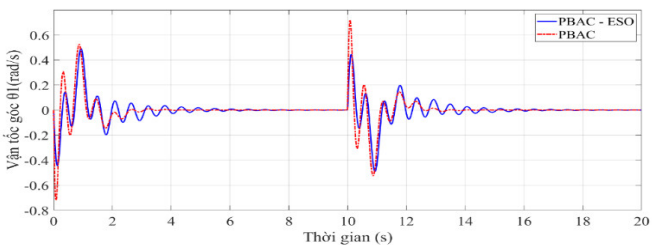
Góc dao động của móc treo được thể hiện trong hình 4. Với bộ điều khiển thụ động có dùng bộ quan sát, góc dao động của trọng tải đã luôn giữ được góc dao động luôn nằm trong phạm vi cho phép là $-10^\circ \leq \theta_1 \leq 10^\circ$ và đã đưa móc treo về trạng thái ổn định sau 8s nhưng vẫn xuất hiện nhiều lần đổi chiều chuyển động của móc treo, với bộ điều khiển thụ động không dùng bộ quan sát, mặc dù góc dao động ban đầu có lớn hơn so với khi dùng bộ quan sát nhưng thời

gian quá độ lại ngắn hơn là 3,5s và số lần đổi chiều chuyển động của móc treo cũng ít hơn.

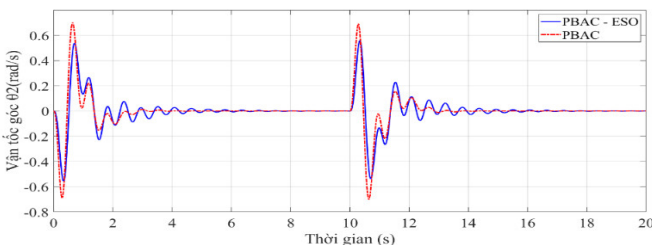


Hình 5. Góc dao động của tải trọng

Kết quả về góc dao động của tải trọng trong quá trình vận chuyển hàng khi sử dụng bộ điều khiển thụ động không kết hợp với bộ quan sát, góc dao động ban đầu của tải trọng có độ lớn lớn hơn nhưng thời gian quá độ ngắn hơn là 3,5s và số lần chuyển chiều chuyển động của móc treo cũng ít hơn nhiều so với khi sử dụng bộ quan sát được thể hiện như hình 5.



Hình 6. Vận tốc góc của móc treo



Hình 7. Vận tốc góc của tải trọng

Các kết quả mô phỏng trong hình 6, 7 cho thấy khi dùng bộ điều khiển không có bộ quan sát sẽ cho giá trị độ quá điều chỉnh ban đầu đều lớn khoảng 0,7 rad/s, nhưng thời gian quá độ lại ngắn hơn là 4s. Khi có bộ quan sát độ quá điều chỉnh ban đầu là nhỏ hơn 0,45 rad/s nhưng thời gian đi đến ổn định dài hơn khoảng 7,5s.

5. KẾT LUẬN

Bộ điều khiển PBAC kết hợp bộ quan sát ESO là một giải pháp điều khiển hệ cấu trúc kiểu con lắc kép mang lại hiệu quả nhất định về khắc phục hiện tượng dao động của tải trọng, bám quỹ đạo đặt, thời gian đưa xe đến vị trí đặt nhanh, giảm sự congest kênh của hệ thống và chi phí thiết bị đo lường mà vẫn đảm bảo thông số quan sát chính xác. Tuy nhiên kết quả đáp ứng tốc độ vẫn còn độ quá điều chỉnh, thời gian xác lập vẫn còn chậm. Đây là một công trình nghiên cứu khoa học đã góp phần thêm vào việc hoàn thiện các nghiên cứu điều khiển hệ thống cấu trúc.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả xin trân thành cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã hỗ trợ kinh phí thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường năm 2023 mã số 10-2023-RD/HĐ-ĐHCN

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tuan L. A., Lee S. G., Dang V. H., Moon S., Kim B, 2013. Partial feed-back linearization control of a three-dimensional overhead crane." In: International Journal of Control, Automation, and Systems, 11(4),718–727.
- [2]. Thomas Erneux, Tamás Kalmár-Nagy, 2007. *Nonlinear stability of a delayed feedback controlled container crane.* Journal of Vibration and Control (2007). 13(5): p. 603-616.
- [3]. Sun N, Wu Y, Chen H, 2018. *An energy-optimal solution for transportation control of cranes with double pendulum dynamics: Design and experiments.* Mechanical Systems and Signal Processing, 87–101.
- [4]. Kazuo Kawada, et al, 2004. *Robust PD sway control of a lifted load for a crane using a genetic algorithm.* IEEJ Transactions on Industry Applications, p:1097-1103, 123.
- [5]. Tuan LA, Moon SC, Kim DH, Lee SG, 2012. *Adaptive sliding Mode control of three-dimensional overhead cranes.* IEEE international conference on cyber technology in Automation, control, and intelligentsystems(2012) pp 354–359
- [6]. Tuan L, Lee S, 2013. *Sliding mode controls of double-pendulum crane systems.* Journal of Mechanical Science and Technology, 1863-1873, 27(6)
- [7]. Lu B, Fang Y, Sun N, 2017. *Sliding mode control for underactuated overhead cranes suffering from both matched and unmatched disturbances.* Mechatronics 47:116–125
- [8]. Qian D, Tong S, Lee S., 2016. *Fuzzy-Logic-based control of payloads subjected to double-pendulum motion in overhead cranes.* Automation in Construction (2016), 133–143, 65
- [9]. Iftikhar S., Faqir O. J., Kerrigan E. C. (n.d.). *Nonlinear model predictive control of an overhead laboratory-scale gantry crane with obstacle avoidance.*
- [10]. Grune L., Pannek J., 2011. *Nonlinear Model Predictive Control: Theory and Algorithms.* Communications and Control Engineering (2011)
- [11]. *Anti-sway Control for Cranes. Design and Implementation Using Matlab.* <https://doi.org/10.1515/9783110520101>
- [12]. H. Gao, T. Chen, T. Chai, 2007. *Passivity and pacification for networked control systems.* SIAM J Control Optim, vol. 46, no. 4, pp. 1299–1322, 2007.
- [13]. H. Sira-Ramírez, M. I. Angulo-Núñez, 1997. *Passivity-based control of nonlinear chemical processes.* Int J Control, vol. 68, no. 5, pp. 971–996, Jan. 1997.
- [14]. M. W. Spong, J. K. Holm, D. Lee, 2007. *Dynamics of Bipedal Locomotion Passivity-Based Control of Bipedal Locomotion Regulating Walking by Exploiting Passive Gaits in 2-D and 3-D Biped.*
- [15]. R. Ortega, A. Van Der Schaft, B. Maschke, G. Escobar, 2002. *Interconnection and damping assignment passivity-based control of port-controlled Hamiltonian systems.* [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/automatica
- [16]. Bao-Zhu Guo, Zhi-Liang Zhao, 2011. *Extended State Observer for Nonlinear Systems with Uncertainty.* Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011

AUTHORS INFORMATION

Bui Thi Khanh Hoa, Ha Van Phuong, Pham Van Huy
Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam