

ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỲ ĐẠO CẦU TRỤC DỰA TRÊN ĐỘNG LỰC HỌC NGƯỢC

TRAJECTORY TRACKING CONTROL OF OVERHEAD CRANES BASED ON INVERSE DYNAMICS

Nguyễn Quang Hoàng¹, Vũ Văn Khoa²

¹Khoa Cơ điện tử, Trường Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp điều khiển bám quỹ đạo dựa trên động lực học ngược cho cầu trục hệt dẫn động. Mô hình động lực của cầu trục được thiết lập với các tọa độ suy rộng dư và sử dụng phương trình Lagrange dạng nhân tử. Các tọa độ Đề các của tải là một phần của các tọa độ suy rộng cho phép tạo ra các liên kết servo để dễ dàng thiết kế luật điều khiển bám quỹ đạo cho tải. Bài toán động lực học ngược - xác định các đầu vào tương ứng với đầu ra mong muốn của hệ - được giải quyết nhờ tính chất phẳng vi phân của hệ. Các mô phỏng số được thực hiện cho thấy hiệu quả của phương pháp, chuyển động của tải bám theo quỹ đạo thiết kế và dao động của tải ở cuối hành trình được giảm rất đáng kể.

Từ khóa: Cầu trục; Hệ hệt dẫn động; Động lực học ngược; Điều khiển bám quỹ đạo; Liên kết servo; Mô phỏng số.

ABSTRACT

This paper presents a trajectory tracking control method based on inverse dynamics for underactuated overhead cranes. The dynamic model of the crane is established with redundant generalized coordinates and using the Lagrange's equation with multipliers. The Cartesian coordinates of the payload are part of the generalized coordinates that allow to easily design the tracking control for the payload by using of servo constraints. The problem of inverse dynamics - determining the inputs corresponding to the desired output of the system - is solved based on the differential flatness of the system. The results of numerical simulations show the effectiveness of the proposed method, that the payload tracks the given trajectory and the vibration of the payload at the end of the trajectory are effectively reduced.

Keywords: Overhead cranes; Underactuated systems; Inverse dynamics; Tracking control; Servo constraint; Numerical simulation.

1. MỞ ĐẦU

Cần trục được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như công nghiệp nặng, cảng biển, nhà máy ô tô và cơ sở xây dựng. Năng suất và hiệu quả của cần trục không chỉ phụ thuộc vào tải trọng vận chuyển và vận tốc tải, mà còn phụ thuộc vào khả năng làm tắt dao động của tải ở cuối mỗi chu trình hoạt động. Lý thuyết và thực tế đã chỉ ra rằng xe con tăng tốc và giảm tốc nhanh hơn sẽ làm cho góc lắc của tải lớn hơn. Tình trạng này dẫn đến tình huống nguy hiểm và có thể gây ra tai nạn nghiêm trọng nếu góc lắc của tải trở nên quá lớn, có thể làm gãy cần trục, hư hỏng các thiết bị và cơ sở hạ tầng khác hoặc làm bị thương người.

Quá trình hoạt động của cần trục có thể chia làm ba giai đoạn là nâng tải, vận chuyển ngang và hạ tải. Pha di chuyển ngang là nhiệm vụ khó khăn nhất, xe con và tải phải nhanh chóng đạt được vị trí mong muốn trong khi duy trì góc lắc nhỏ. Góc lắc cần phải được triệt tiêu khi xe con đến vị trí đích.

Hai cách tiếp cận chính sau đây là cần thiết để đạt được yêu cầu nói trên. Cách tiếp cận đầu tiên là lập kế hoạch chuyển động hay thiết kế quỹ đạo hợp lý cho xe con. Cách tiếp cận thứ hai là thiết kế điều khiển chống lắc. Trong cách tiếp cận đầu tiên, quỹ đạo mong muốn thường bao gồm ba giai đoạn: tăng tốc, vận tốc không đổi và giảm tốc. Thời gian và hình dạng của gia tốc trong giai đoạn thứ nhất và thứ ba làm tăng góc xoay đến giá trị lớn nhất trước khi giảm về không. Do đó, góc xoay bằng không trong giai đoạn vận tốc không đổi [18].

Cách tiếp cận thứ hai đã thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Nhiều thuật toán điều khiển đã được phát triển cho các cần trục. Một số bộ điều khiển có thể được liệt kê là

tuyến tính, phi tuyến, tuyến tính hóa phản hồi một phần, điều khiển trượt, thích nghi, mờ, v.v. [2-10]. Một số tác giả kết hợp các phương pháp điều khiển (ví dụ, điều khiển trượt mờ thích nghi) [14-22]. Các tổ hợp này tạo ra các bộ điều khiển phức tạp.

Các nhà nghiên cứu cũng đã đề xuất một phương pháp thiết kế dựa trên năng lượng và tính thụ động của hệ thống. Cách tiếp cận này có thể được áp dụng không chỉ trong việc điều khiển các hệ thống đủ dẫn động mà còn các hệ thống hụt dẫn động, chẳng hạn như cầu trục, tay máy hụt dẫn động, ... [11-13]. Phương pháp này đưa ra bộ điều khiển từ hàm trữ năng của hệ. Năng lượng bổ sung ảnh hưởng đến hiệu quả điều khiển. Tuy nhiên, việc giảm dao động của tải khi về đích còn khá hạn chế.

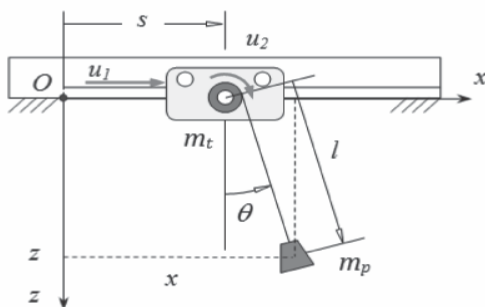
Một hướng tiếp cận khác nữa là sử dụng các liên kết servo và thiết lập hệ các phương trình vi phân đại số, sau đó sử dụng các công thức tích phân dạng ẩn để giải bài toán [23-28]. Cách này cho phép điều khiển tải bám quỹ đạo, tuy nhiên sự phức tạp ở đây là việc giải hệ phương trình vi phân đại số bằng các công thức tích phân dạng ẩn. Điều này dẫn đến các phép tính cồng kềnh và phức tạp.

Bài báo này trình cách tiếp cận kết hợp thiết kế quỹ đạo và điều khiển bám quỹ đạo dựa trên động lực học ngược và liên kết servo. Từ yêu cầu của động lực học ngược, quỹ đạo chuyển động của tải được thiết kế đảm bảo liên tục đến đạo hàm bậc 4. Liên kết servo ở mức gia tốc được tăng cường với kỹ thuật ổn định Baumgarte [29] đảm bảo cho điều khiển được ổn định. Với cách tiếp cận trong bài này, chuyển động của tải sẽ bám theo quỹ đạo thiết kế và đảm bảo rằng sẽ không có chuyển động lắc khi tải đạt đến vị trí cuối mong muốn.



Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày về mô hình động lực của hệ sử dụng các tọa độ suy rộng dư với các tọa độ Đề-các của tải; Động lực học ngược và điều khiển chuyển động dựa trên liên kết servo được thể hiện trong mục 3 và 4; Mục 5 là kết quả mô phỏng số; Cuối cùng, mục 6 là phần kết luận.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC



Hình 1. Mô hình cầu trục 2D

Khảo sát hệ cầu trục chuyển động trong mặt phẳng đứng, mô hình cơ học của hệ được thể hiện như trên Hình 1. Hệ này bao gồm xe con khối lượng m_t chạy trên cầu ngang, tải trọng có khối lượng m_p được coi như chất điểm, cáp treo tải coi như không dẫn và luôn căng, khối lượng cáp nhỏ và được bỏ qua. Tang cuốn cáp có bán kính r và mô men quán tính khối I_d . Hệ ba bậc tự do ứng với các chuyển động của xe con, chuyển động của tang cuốn/nhả cáp và góc lắc của cáp tương ứng được mô tả bởi các biến s, l, θ . Chuyển động của hệ được dẫn bởi lực đẩy xe con và mô men quay trên trục tang cuốn, tương ứng kí hiệu bởi u_1, u_2 . Hệ là hệ dẫn động vì số động cơ dẫn động là 2, trong khi đó, số bậc tự do của hệ là 3 ($2 < 3$).

Để xây dựng mô hình động lực học của hệ, ta có thể sử dụng các tọa độ suy rộng đủ (s, l, θ) hoặc sử dụng tọa độ suy rộng dư (s, l, x, z). Để thuận tiện cho thiết kế điều khiển bám quỹ đạo của tải, ở đây các tọa độ suy rộng dư được sử dụng.

Ký hiệu $q = [s, l, x, z]^T$ là véc tơ tọa độ suy rộng dư mô tả chuyển động của hệ, $u = [u_1, u_2]^T$ là véc tơ chứa các lực/mô men dẫn động. Phương trình động lực cho hệ được thiết lập nhờ phương trình Lagrange dạng nhân tử [1]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + \left(\frac{\partial P}{\partial q} \right)^T = \mathbf{B}u - \Phi_q^T l \quad (1)$$

$$\phi(q) = 0$$

Trong đó, T là biểu thức động năng, P là biểu thức thế năng, $\phi(q) = 0$ là các phương trình liên kết, Φ_q là ma trận Jacobi của phương trình liên kết. Với các tọa độ suy rộng dư, biểu thức động năng và thế năng của hệ được tính như sau:

Động năng hệ:

$$T = \frac{1}{2} m_t \dot{s}^2 + \frac{1}{2} I_d r^{-2} \dot{l}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}^2 + \dot{z}^2) \quad (2)$$

Thế năng hệ:

$$P = -m_p g z + \text{const} \quad (3)$$

Để đưa ra biểu thức lực suy rộng của các lực dẫn động, ta tính tổng công ảo của các lực này:

$$\delta A = u_1 \delta s + u_2 \delta l / r$$

$$\Rightarrow \mathbf{Q} = \mathbf{B}u = [u_1, u_2 / r, 0, 0]^T \quad (4)$$

Từ đây, ta viết được ma trận B như sau:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & r^{-1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Từ hình vẽ, ta suy ra được phương trình ràng buộc các tọa độ suy rộng như sau:

$$\phi(\mathbf{q}) = (x - s)^2 + z^2 - l^2 = 0 \quad (6)$$

Thay các đại lượng trên vào phương trình Lagrange dạng nhân tử (1), ta được phương trình động lực cho hệ ở dạng phương trình vi phân - đại số như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}\mathbf{u} - \Phi_q^T(\mathbf{q})\lambda$$

$$\phi(\mathbf{q}) = 0, \quad \Phi_q(\mathbf{q}) = \frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (7)$$

Trong đó:

$$\mathbf{M} = \text{diag}([m_t, I_d r^{-2}, m_p, m_p]), \quad \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = 0$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = [0 \quad 0 \quad 0 \quad -m_p g]^T, \quad \lambda = \lambda$$

$$\Phi_q(\mathbf{q}) = \frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} = [-2(x - s), -2l, 2(x - s), 2z]$$

Nếu quan tâm đến động cơ dẫn động, ta sẽ sử dụng mô hình đơn giản sau đây:

$$u_1 = k_1 U_1 - d_1 \dot{s}, \quad u_2 = r k_2 U_2 - r d_2 \dot{l}$$

Với U_i là điện áp đặt lên động cơ, k_i , d_i là các hệ số dương phụ thuộc thông số động cơ như hằng số mô men, hằng số phản sức điện động. Khi đó, các phương trình được viết chi tiết như sau:

$$\begin{bmatrix} m_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_d r^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{s} \\ \ddot{l} \\ \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \dot{s} \\ d_2 \dot{l} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -m_p g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -2(x-s) \\ -2l \\ 2(x-s) \\ 2z \end{bmatrix} \lambda$$

$$\phi(\mathbf{q}) = (x - s)^2 + z^2 - l^2 = 0$$

3. ĐỘNG LỰC HỌC NGƯỢC

Động lực học ngược giải quyết bài toán xác định các đại lượng dẫn động (đầu vào):

lực/mô men hoặc điện áp điều khiển), khi biết chuyển động của tải (đầu ra). Đối với hệ hạt dẫn động nói chung, bài toán động lực học ngược có lời giải hay không phụ thuộc vào từng hệ cụ thể. Đối với cầu trục phẳng xét ở đây, ta thấy rằng, khi biết chuyển động của tải $[x(t), z(t)]$, ta sẽ xác định được lực căng cáp. Biết lực căng cáp, ta sẽ xác định được các lực dẫn động u_1 và u_2 (hay U_1 và U_2). Sau đây sẽ trình bày phương án giải bài toán động lực học ngược cho cầu trục 2D dựa trên các phương trình (8).

Giả sử rằng, chuyển động của tải cần phải bám theo quỹ đạo mong muốn cho bởi $x_d(t)$, $z_d(t)$. Khi đó, ta sẽ bổ sung phương trình liên kết servo như sau:

$$\mathbf{c}(\mathbf{q}, t) = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} x - x_d(t) \\ z - z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Đạo hàm hai lần theo thời gian, phương trình trên ta được:

$$\ddot{\mathbf{c}}(\mathbf{q}, t) = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \ddot{x} - \ddot{x}_d(t) \\ \ddot{z} - \ddot{z}_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Trước hết, ta tìm được không gian rỗng của ma trận Jacobi, $\mathbf{R} = \text{null}(\Phi_q)$, thỏa mãn $\Phi_q \mathbf{R} = 0$.

$$\Phi_q = [-2(x - s), -2l, 2(x - s), 2z] \Rightarrow \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{(x-s)}{z} & \frac{l}{z} & \frac{(s-x)}{z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Nhân từ trái hai vế của phương trình thứ nhất trong (7) với $\mathbf{R}^T$, với chú ý rằng $\mathbf{R}^T \Phi_q^T(\mathbf{q}) = 0$, được:

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}^T \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}^T \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}^T \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{R}^T \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (12)$$

Kết quả thu được như sau:



$$m_s \ddot{s} + (x-s)z^{-1}m_p \ddot{z} + d_1 \dot{s} - (x-s)z^{-1}m_p g = k_1 U_1 \quad (13)$$

$$I_d r^{-2} \ddot{l} + lz^{-1}m_p \ddot{z} + d_2 \dot{l} - lz^{-1}m_p g = k_2 U_2 \quad (14)$$

$$m_p \ddot{x} + (s-x)z^{-1}m_p \ddot{z} - (s-x)z^{-1}m_p g = 0 \quad (15)$$

Cùng với đạo hàm hai lần phương trình liên kết theo thời gian như sau:

$$\Phi \ddot{q} + \dot{\Phi} \dot{q} = 0 \Rightarrow -2(x-s)\ddot{s} - 2\ddot{l} + 2(x-s)\ddot{x} + 2z\ddot{z} - 2(\dot{x}-\dot{s})\dot{s} - 2\dot{l} + 2(\dot{x}-\dot{s})\dot{x} + 2z\dot{z} = 0 \quad (16)$$

Để giải tìm $\ddot{s}, \ddot{l}, U_1, U_2$ từ hệ 4 phương trình trên, ta đạo hàm hai lần phương trình (15). Để cho gọn, ta nhân phương trình này với z và chia hai vế cho m_p trước khi đạo hàm. Ta nhận được các kết quả sau:

$$\begin{aligned} f &= z\ddot{x} + (s-x)(\ddot{z}-g) = 0 \\ \dot{f} &= z\ddot{x} + \dot{z}\ddot{x} + (s-x)\ddot{z} + (\dot{s}-\dot{x})(\ddot{z}-g) = 0 \\ \ddot{f} &= z\ddot{x} + 2\dot{z}\ddot{x} + \ddot{z}\ddot{x} + (s-x)\ddot{z} + 2(\dot{s}-\dot{x})\ddot{z} + (\ddot{s}-\ddot{x})(\ddot{z}-g) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Giải hệ 4 phương trình (13), (14), (17) và (16) sẽ cho ta các kết quả của bài toán động lực học ngược: $\ddot{s}, \ddot{l}, U_1, U_2$. Cụ thể, từ (17) giải được $\ddot{s}$, sau đó thay vào (16) và giải được $\ddot{l}$. Thay các đại lượng tìm được vào (13), (14), ta sẽ xác định được U_1, U_2 :

$$\ddot{s} = \frac{\ddot{x}g + z\ddot{x} + 2\dot{z}\ddot{x} + (s-x)\ddot{z} + 2(\dot{s}-\dot{x})\ddot{z}}{(g-\ddot{z})} \quad (18)$$

$$\ddot{l} = \frac{(x-s)(\ddot{x}-\ddot{s}) + z\ddot{z} + (\dot{x}-\dot{s})(\ddot{x}-\ddot{s}) - \dot{l} + \dot{z}}{l} \quad (19)$$

$$U_1 = [m_s \ddot{s} + m_p (x-s)(\ddot{z}-g)z^{-1} + d_1 \dot{s}] / k_1 \quad (20)$$

$$U_2 = [I_d r^{-2} \ddot{l} + m_p (\ddot{z}-g)lz^{-1} + d_2 \dot{l}] / k_2 \quad (21)$$

Trong các biểu thức tìm được có sự xuất hiện các đạo hàm bậc 4 của chuyển động cho trước $x(t), z(t)$. Do đó, khi lập trình quỹ đạo, yêu

cầu chuyển động của tải phải liên tục đến đạo hàm cấp 4. Ngoài ra, khi tích phân các phương trình (18)-(19), ta cần sử dụng đến kỹ thuật ổn định hóa để đảm bảo cho liên kết không bị phá vỡ do sai số tích lũy.

4. ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG

Nhiệm vụ của bài toán thiết kế điều khiển chuyển động là xác định các đầu vào U_1 và U_2 nhằm đảm bảo cho chuyển động của tải bám theo quỹ đạo cho trước, tức là đảm bảo cho liên kết servo (9) được duy trì. Như phần trên đã trình bày, các đầu vào điều khiển U_1 và U_2 được xác định dựa trên mô hình động lực học ngược và dựa vào đạo hàm bậc hai của liên kết servo (10). Nhằm đảm bảo cho chuyển động bám quỹ đạo được ổn định, ta thay liên kết servo ở cấp độ gia tốc (10) bởi:

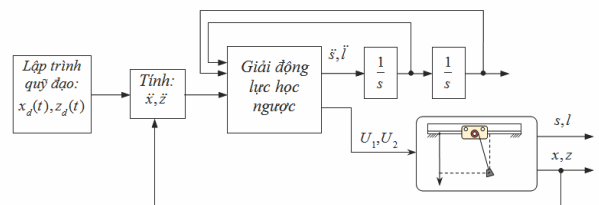
$$\ddot{c}(q, t) + 2\delta\omega\dot{c}(q, t) + \omega^2 c(q, t) = 0 \quad (22)$$

với các tham số thiết kế $\omega > 0$ và $\delta > 0$. Từ phương trình trên, ta suy ra được:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d(t) \\ \ddot{z}_d(t) \end{bmatrix} - 2\delta\omega \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{x}_d(t) \\ \dot{z} - \dot{z}_d(t) \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} x - x_d(t) \\ z - z_d(t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Như thế, việc thiết kế điều khiển dựa trên mô hình động lực học ngược cho cầu trục 2D chính là việc xác định các đầu vào U_1, U_2 từ các phương trình (13), (14), (16), (17) và (23).

Sơ đồ điều khiển dựa trên bài toán ngược động lực học được thể hiện như trên Hình 2.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển dựa trên động lực học ngược

5. MÔ PHỎNG SỐ

Để minh họa cho phương pháp đề xuất ở phần trên, các mô phỏng số sẽ được thực hiện trong phần mềm máy tính. Các thông số của cầu trục mẫu như đã nêu trong phần mô hình động lực được chọn cho mô phỏng số như sau:

$$\begin{aligned} m_t &= 2 \text{ kg}; & I_d &= 0,01 \text{ kg/m}^2; & r &= 0,1 \text{ m}. \\ m_p &= 5 \text{ kg}; & g &= 9,81 \text{ m/s}^2; \\ d_1 &= 2 \text{ Ns/m}; & d_2 &= 2 \text{ Ns/m}; \\ k_1 &= 2 \text{ N/Volt}; & k_2 &= 2 \text{ N/Volt}; \end{aligned}$$

5.1. Quỹ đạo chuyển động mong muốn của tải

Xét trường hợp tải chuyển động trên đường thẳng từ A (x_A, z_A) đến B (x_B, z_B). Gọi $d(t)$ là luật chuyển động dọc quỹ đạo, khi đó tọa độ mong muốn của tải tại thời điểm t được xác định bởi:

$$x = x_A + \frac{x_B - x_A}{AB} d(t), \quad z = z_A + \frac{z_B - z_A}{AB} d(t)$$

Như đã trình bày ở trên, chuyển động của tải phải liên tục đến đạo hàm bậc 4. Luật chuyển động có thể chọn là một đa thức bậc 9 thỏa mãn $d(0) = \dot{d}(0) = \dots = \ddot{d}(0) = 0$, $\dot{d}(t_f) = \dots = \ddot{d}(t_f) = 0$, $d(t_f) = L$ hoặc luật chuyển động với profile vận tốc dạng hình thang cong. Ở đây, profile vận tốc dọc quỹ đạo được chọn như sau:

$$v = v_{\max} \begin{cases} 35r^4 - 84r^5 + 70r^6 - 20r^7, & r = t/T, & 0 \leq t \leq T \\ 1, & T < t \leq T_f - T \\ 1 - 35r^4 + 84r^5 - 70r^6 + 20r^7, & r = (t - (T_f - T))/T, & T_f - T \leq t \leq T_f \end{cases}$$

Trong đó, tổng thời gian chuyển động là T_f , thời gian tăng tốc và hãm như nhau bằng T . Với L là quãng đường di chuyển của tải, vận tốc $v_{\max}$ được tính theo công thức sau:

$$v_{\max} = L/(T_f - T)$$

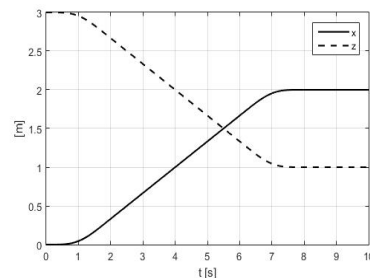
Để đưa ra kết quả mô phỏng số, ở đây sử dụng các số liệu sau:

Điểm A (0, 3) m và điểm B (2, 1) m.

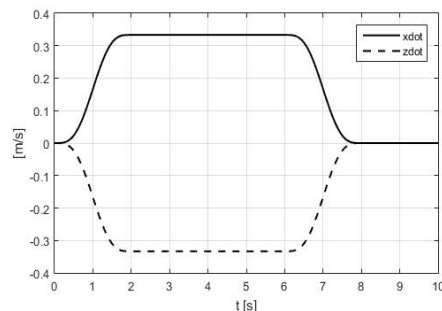
Thời gian tăng tốc và hãm $T = 2$ s; tổng thời gian $T_f = 8$ s.

5.2. Kết quả mô phỏng

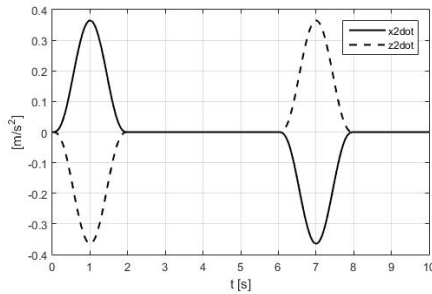
Kết quả mô phỏng số được thể hiện trên các Hình 3 đến Hình 8. Các Hình 3 đến 5 thể hiện chuyển động mong muốn của tải bao gồm dịch chuyển, vận tốc và gia tốc theo thời gian. Chuyển động thực của cầu trục được thể hiện trên các Hình 6 và 7. Đồ thị Hình 7 cho thấy tải đến được điểm cuối như mong muốn. So sánh đồ thị $s(t)$ và $x(t)$ trên các Hình 6 và 7, ta suy ra được rằng tải trọng không lắc khi đến điểm cuối. Có thể thấy rằng đây chính là một điểm nổi bật so với các phương pháp điều khiển khác. Kết quả trên Hình 8 cho thấy điện áp U_1 và U_2 thay đổi nhiều ở các giai đoạn tăng tốc và giảm tốc, chúng không thay đổi khi tải chuyển động thẳng đều và khi tải dừng lại.



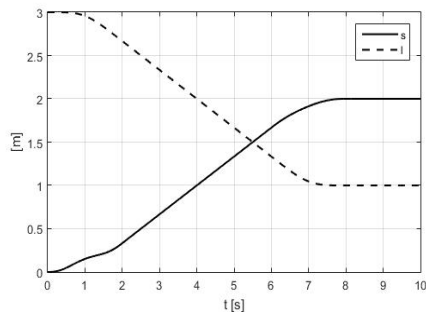
Hình 3. Đồ thị chuyển động mong muốn của tải theo thời gian



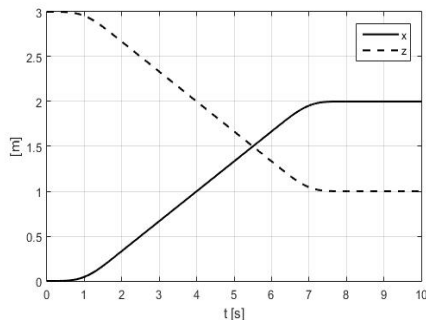
Hình 4. Đồ thị vận tốc của tải theo thời gian



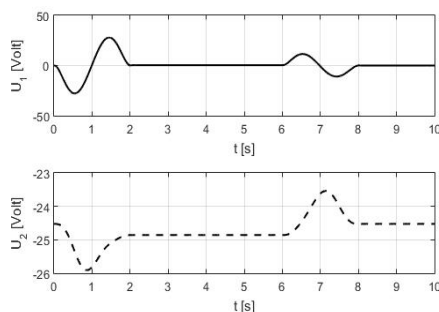
Hình 5. Đồ thị gia tốc của tải theo thời gian



Hình 6. Đồ thị chuyển động của xe con và chiều dài dây theo thời gian



Hình 7. Đồ thị chuyển động của tải theo thời gian



Hình 8. Đồ thị điện áp trên hai động cơ dẫn của cầu trục theo thời gian

6. KẾT LUẬN

Bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho cầu trục hệt dẫn động dựa trên động lực học ngược và liên kết servo đã được trình bày và triển khai mô phỏng thành công. Với phương pháp trình bày trong bài báo này, ta có thể điều khiển chuyển động cho cầu trục đảm bảo tải bám theo quỹ đạo thiết kế và chuyển động lắc không xuất hiện khi tải đến vị trí đích. Điều này sẽ làm tăng hiệu quả khi khai thác cầu trục. Tất nhiên, để áp dụng được phương pháp đề xuất ở đây, ta cần có mô hình động lực chính xác cùng với các thông số của hệ. Việc triển khai kiểm nghiệm thực tế là một trong các mục tiêu trong thời gian tới. ❖

Ngày nhận bài: 13/6/2022

Ngày phản biện: 24/6/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Văn Khang; *Động lực học hệ nhiều vật*. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2017.
- [2]. Abdel-Rahman, E.M., Nayfeh, A. H., Masoud, Z. N. (2003); *Dynamics and Control of Cranes: a Review*. Journal of Vibration and Control, 9, pp. 863-908.
- [3]. Almutairi, N. B., & Zribi, M. (2009); *Sliding mode control of a three-dimensional overhead crane*. Journal of Vibration and Control, 15(11), pp. 1679-1730.
- [4]. Chang, C. (2007); *Adaptive fuzzy controller of the overhead cranes with nonlinear disturbance*. IEEE Trans. Industrial Informatics, 3(2), pp. 164-172.
- [5]. Chwa, D. (2009); *Nonlinear tracking control of 3-D overhead cranes against the initial swing angle and the variation of payload weight*. IEEE Trans. Control Systems Technology, 17(4), pp. 876-883.
- [6]. Dong, Y., Wang, Z., Feng, Z., Wang, D., & Fang, H. (2008); *Energy based control of a class of underactuated mechanical systems*. Congress on Image and Signal Processing. Vol. 3, pp. 139 - 143.
- [7]. Fang, Y., Ma, B., Wang, P., & Zhang, X. (2012); *A motion planning-based adaptive control method for an underactuated crane system*. IEEE Trans.

- Control Systems Technology, 20(1) pp. 241–248.
- [8]. Fang, Y., Dixon, W. E., Dawson, D. M., & Zergeroglu E. (2003); *Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 8(3), pp.418-423.
- [9]. Hua, Y. J. & Shine, Y. K. (2007); *Adaptive coupling control for overhead crane systems*. Mechatronics 17, pp. 143–152.
- [10]. Lee, H. H., Liang, Y., & Segura, D. (2006); *A sliding mode anti-swing trajectory control for overhead cranes with high speed load hoisting*. Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, vol. 128, pp. 842-845.
- [11]. Fantoni, I., Lozano, R., & Spong, M. W. (2000); *Energy based control of the Pendubot*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, pp. 725-729,.
- [12]. Li, E., Liang, Z. Z., Hou, Z. G., & Tan, M. (2009); *Energy-based balance control approach to the ball and beam system*. Int. Journal of Control, 82(6), pp. 981–992.
- [13]. Nguyen Quang Hoang, Soon-Geul Lee, Jae-Jun Kim, Byung Soo Kim; *Simple energy-based controller for a class of underactuated mechanical systems*. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014.
- [14]. Liu, D., Yi, J., Zhao, D., & Wang, W. (2005); *Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane*. Mechatronics, 15(5), pp. 505–522.
- [15]. Omara, H. M., & Nayfeh, A. H. (2005); *Gantry cranes gain scheduling feedback control with friction compensation*. Journal of Sound and Vibration, 281, pp. 1–20.
- [16]. Park, H., Chwa, D., and Hong, K.S. (2007); *A feedback linearization control of container cranes: varying rope length*. Int. Journal of Control, Automation, and Systems, 5(4), pp. 379-387.
- [17]. Park, M. S., Chwa, D., & Hong, S. K. (2008); *Antisway tracking control of overhead cranes with system uncertainty and actuator nonlinearity using an adaptive fuzzy sliding-mode control*. IEEE Trans. Industrial Electronics, 55(11), pp. 3972–3984.
- [18]. Sun, N., Fang, Y., Zhang X., & Yuan, Y. (2012); *Transportation task-oriented trajectory planning for underactuated overhead cranes using geometric analysis*. IET Control Theory & Applications, 6(4), pp. 1410-1423.
- [19]. Tuan, L. A., Kim, G.H., Kim, M. Y., & Lee, S. G. (2012); *Partial feedback linearization control of overhead cranes with varying cable lengths*. Int. Journal of Precision Engineering and Manufacturing (SCIE), 13(4), pp. 501-507.
- [20]. Zhang, X., Gao, B., & Chen, H. (2005); *Nonlinear controller for a gantry crane based on partial feedback linearization*. Int. Conference on Control and Automation (ICCA), pp. 1074-1078.
- [21]. Tuan Anh Le, Sang-Chan Moon, Won Gu Lee, Soon-Geul Lee (2013); *Adaptive Sliding Mode Control of the Overhead Crane with Varying Cable Length*. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 27(3), pp. 885~893.
- [22]. Le Anh Tuan, V. H. Dang, ByungSoo Kim, Sang-Chan Moon, Soon-Geul Lee (2013); *Partial Feedback Linearization Control of the Three Dimensional Overhead Crane*. Int. Journal of Control, Automation and Systems, DOI: 10.1007/s12555-012-9305-z 11(4), Aug. 2013 (to be published).
- [23]. Wojciech Blajer, Robert Seifried, Krzysztof Kołodziejczyk; *Servo-constraint realization for underactuated mechanical systems*. Article in Archive of Applied Mechanics. February 2015. DOI: 10.1007/s00419-014-0959-2.
- [24]. R. Altmann, J. Heiland; *Simulation of multibody systems with servo constraints through optimal control*. Multibody Syst Dyn (2017) 40:75–98. DOI 10.1007/s11044-016-9558-z.
- [25]. Wojciech Blajer, Krzysztof Kołodziejczyk; *Dynamics and control of rotary cranes executing a load prescribed motion*. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 44, 4, pp. 929-948, Warsaw 2006.
- [26]. Svenja Otto, Robert Seifried; *Real-time trajectory control of an overhead crane using servo-constraints*. Multibody Syst Dyn, DOI 10.1007/s11044-017-9569-4, Springer Science+Business Media Dordrecht 2017.
- [27]. Yinping Yang; *Numerical methods for the inverse dynamics simulation of underactuated mechanical systems*. Scientific publishing, 2017.
- [28]. Reichl Stefan; *Inverse dynamics and trajectory tracking of underactuated multibody systems*. Dissertation, TU Wien, 2011.
- [29]. Baumgarte J. (1972); *Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamical Systems*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1, pp. 1-16.