

Điều khiển chống rung cho cầu trục ba chiều bằng phương pháp Hybrid Shape

Vibration suppression control for three – Dimension overhead crane by Hybrid Shape approach

Tưởng Xuân Thường, Dương Minh Đức, Nguyễn Tùng Lâm
Trường ĐHBK Hà Nội

e-Mail: tuongxuanthuong@gmail.com; duc.duongminh@hust.edu.vn;
lam.nguyentung@hust.edu.vn

Tóm tắt

Hiện tượng dao động xảy ra đối với hầu hết các máy móc hệ thống sản xuất trong công nghiệp, làm ảnh hưởng xấu đến năng suất và chất lượng của sản phẩm, gây mất an toàn trong sản xuất và lãng phí nguồn năng lượng. Bài báo này giới thiệu phương pháp Hybrid Shape, một phương pháp đơn giản và hiệu quả để giảm đáng kể hoặc loại bỏ hoàn toàn dao động. Bằng cách dựa vào các thông số của đối tượng điều khiển và của mô hình dao động, phương pháp Hybrid Shape có nhiệm vụ thiết kế bộ điều khiển vừa có thể đảm nhận vai trò quan trọng trong điều khiển đối tượng đến vị trí mong muốn, vừa đảm bảo loại bỏ dao động. Bài báo này cũng chứng minh tính đúng đắn của phương pháp Hybrid Shape khi áp dụng trên mô hình cầu trục 3 chiều có chiều dài dây không thay đổi. Kết quả của phương pháp này là vị trí của cầu trục được điều khiển chính xác đến vị trí mong muốn, đồng thời làm giảm dao động của tải trọng một cách nhanh nhất. Qua đó có thể thấy phương pháp Hybrid Shape hoàn toàn có thể được ứng dụng trong thực tế.

Từ khóa: cầu trục 3D, chống rung, Hybrid Shape.

Abstract:

Vibration occurs in almost of machines in the production systems in the industry, affect adversely the productivity and quality of products, become unsafe in manufacturing, and wasted energy resources. This paper introduces a Hybrid Shape method, which is a simple method and effective to significantly reduce or completely eliminate vibration. By relying on the parameters of the object and oscillate model, Hybrid Shape method is responsible for designing the controller, which takes on an important role in the control object to the desired location and reduces oscillation. This paper also demonstrated the correctness of the method by applying Hybrid Shape on 3D Overhead crane model rope length unchanged. The result of this method is to derive the position of the crane to the desired location, while reducing the payload fluctuations. Therefore, we can see Hybrid Shape method completely can be applied in the actual production.

Keywords: 3D overhead crane, vibration suppression, Hybrid Shape.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
ξ		Hệ số tắt dần
ω_n	Rad/s	Tần số dao động riêng

Chữ viết tắt

FFT	Fast Fourier Transform
-----	------------------------

1. Đặt vấn đề

Hầu hết các máy móc thường không có cấu tạo cứng tuyệt đối. Do đó, thường xuyên xuất hiện những dao động khi máy móc hoạt động. Những dao động này sẽ tắt dần, tuy nhiên nếu như dao động xảy ra trong một thời gian dài và với biên độ đủ lớn sẽ dẫn đến giảm năng suất và chất lượng của sản phẩm, gây lãng phí nguồn năng lượng.

Cầu trục 3D là một trong những hệ thống được sử dụng rất rộng rãi trong công nghiệp, phục vụ cho công tác vận chuyển và nâng hạ hàng hóa có khối lượng lớn tại các bến cảng, nhà xưởng.

Khi mà khối lượng hàng hóa cần bốc xếp ngày càng lớn thì kích thước của cầu trục ngày càng tăng lên, để đáp ứng việc vận chuyển hàng hóa một cách nhanh chóng và linh hoạt là một vấn đề ngày càng trở lên khó khăn. Thực tế, việc điều khiển cầu trục 3D thường được tiến hành bằng tay nên không tránh khỏi những dao động trong quá trình di chuyển. Với khối lượng hàng hóa lớn, cộng với những dao động này sẽ gây ảnh hưởng to lớn đến sự vận hành ổn định, sự an toàn cho con người cũng như hàng hóa. Do đó cần thiết phải có một phương pháp điều khiển giúp cầu trục 3D di chuyển nhanh chóng, chính xác, an toàn, tiết kiệm, đồng thời phải khử được dao động của tải trọng trong quá trình di chuyển.

Hiện nay, có nhiều phương án điều khiển chống rung cho cầu trục 3D. Phương án thứ nhất, đó là sử dụng cấu trúc tiền định - feedforward như là phương pháp command shaping [1]. Các phương pháp này sử dụng một bộ điều khiển vị trí để điều khiển chính xác vị trí của xe con, đồng thời sử dụng một bộ điều khiển feedforward để khử dao động của tải trọng. Hai bộ điều khiển này thiết kế độc lập với nhau. Phương án thứ hai, đó là sử dụng cấu trúc phản hồi – feedback

[3-9] với các thuật toán điều khiển như PD mở rộng, các thuật toán thông minh như fuzzy, mạng nơ ron, thuật toán trượt và kết hợp một số thuật toán. Các phương pháp này có ưu điểm là xem xét cầu trục dưới dạng cấu trúc phi tuyến gần với thực tế. Tuy nhiên nhược điểm chính của các phương pháp này là cần phải có cảm biến đo rung lắc và thuật toán điều khiển phức tạp.

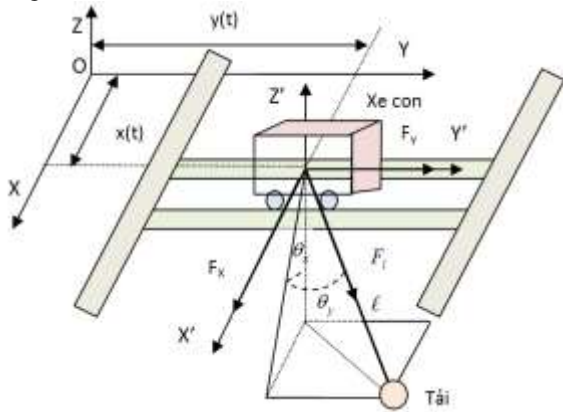
Bài báo này giới thiệu phương pháp Hybrid Shape [10] và ứng dụng phương pháp này cho điều khiển chống rung lắc của cầu trục. Đây là một phương pháp đơn giản và hiệu quả trong việc chống rung cho cầu trục 3D. Phương pháp Hybrid Shape là một dạng đặc biệt của phương án feedforward, tuy nhiên bộ điều khiển làm nhiệm vụ triệt tiêu dao động của tải trọng được lồng ghép vào bên trong vòng điều khiển vị trí của xe con. Thêm vào đó, phương pháp này xem xét đến việc tối ưu thời gian thực hiện chuyển động và xem xét đồng thời việc chống rung lắc và điều khiển chính xác vị trí của xe con.

Nội dung của bài báo này gồm các phần như sau:

- Phần 2 trình bày về mô hình động lực học của cầu trục 3D
- Phần 3 trình bày nội dung phương pháp Hybrid Shape.
- Phần 4 trình bày về nhận dạng mô hình dao động.
- Phần 5 trình bày kết quả mô phỏng bằng Matlab và Simulink.
- Phần 6 bao gồm kết luận và hướng phát triển trong tương lai.

2. Mô hình động lực học cầu trục 3D

Mô hình cầu trục 3D gồm một xe con để nâng hạ hàng hóa, chạy được theo hai phương vuông góc với nhau. Xe con được chuyển động bởi hai lực đẩy được tạo ra bởi hai động cơ được gắn ở đầu mỗi trục O_x và O_y . Ngoài ra còn có một động cơ để kéo tời nâng hạ vật nặng. Mô hình động lực học của cầu trục 3D được xây dựng như ở [2].



H.1 Mô hình của cầu trục ba chiều.

Vị trí của tải trọng trong hệ tọa độ cố định OXYZ là (x_m, y_m, z_m) , trong đó:

$$x_m = x + l \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$y_m = y + l \sin \theta_y$$

$$z_m = -l \cos \theta_x \cos \theta_y$$

Gọi K là động năng của hệ và P là thế năng của hệ thì ta có:

$$K = \frac{1}{2} (M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{m}{2} v_m^2$$

$$P = mgl(1 - \cos \theta_x \cos \theta_y)$$

trong đó: M_x, M_y là khối lượng của cầu trục theo hai phương x, y và M_l là khối lượng của bộ phận nâng hạ tải trọng và m, v_m là khối lượng và tốc độ của tải trọng, g là gia tốc trọng trường.

$$v_m^2 = \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2$$

$$= \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{l}^2 + l^2 \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x^2 + l^2 \dot{\theta}_y^2$$

$$+ 2(\sin \theta_x \cos \theta_y \dot{l} + l \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - l \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{x}$$

$$+ 2(\sin \theta_y \dot{l} + l \cos \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{y}$$

Hàm Lagrange L và hàm tổn hao F được xác định như sau:

$$L = K - P = \frac{1}{2} (M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2)$$

$$+ \frac{m}{2} v_m^2 + mgl(\cos \theta_x \cos \theta_y - 1)$$

$$F = \frac{1}{2} (D_x \dot{x}^2 + D_y \dot{y}^2 + D_l \dot{l}^2)$$

trong đó: D_x, D_y, D_l là các hệ số ma sát nhớt

Phương trình Lagrange của hệ là:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \text{ với } i = 1, \dots, 5$$

trong đó: Q_i là các lực suy rộng của các lực không thế.

Hệ phương trình động lực học của cầu trục 3D là:

$$(M_x + m) \ddot{x} + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \ddot{\theta}_x - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{\theta}_y + m \sin \theta_x \cos \theta_y \ddot{l} + D_x \dot{x} + 2m \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x \dot{l} - 2m \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{l} \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x^2 \quad (1)$$

$$- 2ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_y^2 = f_x$$

$$ml^2 \cos^2 \theta_y \ddot{\theta}_x + ml \cos \theta_x \cos \theta_y \ddot{x} + 2ml \cos^2 \theta_y \dot{l} \dot{\theta}_x \quad (2)$$

$$- 2ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y + mgl \sin \theta_x \cos \theta_y = 0$$

$$(M_y + m) \ddot{y} + ml \cos \theta_y \ddot{\theta}_y + m \sin \theta_y \ddot{l} + D_y \dot{y} \quad (3)$$

$$+ 2m \cos \theta_y \dot{l} \dot{\theta}_y - ml \sin \theta_y \dot{\theta}_y^2 = f_y$$

$$ml^2 \ddot{\theta}_y + ml \cos \theta_y \ddot{y} - ml \sin \theta_x \sin \theta_y \ddot{x} + 2ml \dot{l} \dot{\theta}_y \quad (4)$$

$$+ ml^2 \cos \theta_y \sin \theta_y \dot{\theta}_x^2 + mgl \cos \theta_x \sin \theta_y = 0$$

$$(M_l + m) \ddot{l} + m \sin \theta_x \cos \theta_y \ddot{x} + m \sin \theta_y \ddot{y} + D_l \dot{l} \quad (5)$$

$$- ml \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x^2 - ml \dot{\theta}_y^2 - mg \cos \theta_x \cos \theta_y = f_l$$

trong đó: f_x, f_y, f_l là các lực tác dụng vào xe con.

Mô hình động lực học của cầu trục 3D được viết gọn như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{F} \quad (6)$$

trong đó: \mathbf{q} là véc tơ trạng thái, \mathbf{F} là lực tác dụng, $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ là ma trận khối lượng, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ là ma trận ly tâm Coriolis, \mathbf{D} là ma trận giảm chấn nhớt, $\mathbf{G}(\mathbf{q})$ là véc tơ lực trọng trường.

$$\mathbf{q} = [x \quad y \quad l \quad \theta_x \quad \theta_y]^T; \quad \mathbf{F} = [f_x \quad f_y \quad f_l \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & 0 & m_{25} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 & 0 \\ m_{41} & 0 & 0 & m_{44} & 0 \\ m_{51} & m_{52} & 0 & 0 & m_{55} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ 0 & 0 & c_{23} & 0 & c_{25} \\ 0 & 0 & 0 & c_{34} & c_{35} \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ 0 & 0 & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = [0 \quad 0 \quad g_3 \quad g_4 \quad g_5]^T$$

$$m_{11} = M_x + m \quad m_{13} = m_{31} = m \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$m_{22} = M_y + m \quad m_{23} = m_{32} = m \sin \theta_y$$

$$m_{33} = M_l + m \quad m_{14} = m_{41} = ml \cos \theta_x \cos \theta_y$$

$$m_{44} = ml^2 \cos^2 \theta_y \quad m_{15} = m_{51} = -ml \sin \theta_x \sin \theta_y$$

$$m_{55} = ml^2 \quad m_{25} = m_{52} = ml \cos \theta_y$$

Thành phần khác không của ma trận ly tâm Coriolis là:

$$c_{13} = m \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - m \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y$$

$$c_{14} = m \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{l} - ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$-ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y$$

$$c_{15} = -m \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{l} - ml \cos \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$-ml \sin \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_y$$

$$c_{23} = m \cos \theta_y \dot{\theta}_y; c_{43} = ml \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$c_{25} = m \cos \theta_y \dot{l} - ml \sin \theta_y \dot{\theta}_y; c_{44} = ml \cos^2 \theta_y \dot{l}$$

$$-ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$c_{34} = -ml \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x; c_{45} = -ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$c_{35} = -ml \dot{\theta}_y; c_{53} = ml \dot{\theta}_y$$

$$c_{54} = ml^2 \cos \theta_y \sin \theta_y \dot{\theta}_x; c_{55} = mll$$

Thành phần khác không của véc tơ lực trọng trường là:

$$g_3 = -mg \cos \theta_x \cos \theta_y$$

$$g_4 = mgl \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$g_5 = mgl \cos \theta_x \sin \theta_y$$

Bài báo này xét đến mô hình cầu trục 3D có chiều dài dây không đổi, do vậy phương trình (5) được bỏ qua. Xe con chuyển động được theo hai phương X và Y là nhờ chuyển động quay được tạo ra bởi các động cơ được gắn ở đầu mỗi trục, hai động cơ này sẽ được điều khiển chính xác vận tốc bởi các driver đảm bảo triệt tiêu các nhiễu xen kênh và phi tuyến nên hai phương trình (1), (3) cũng được bỏ qua. Do vậy mô hình động lực học của cầu trục 3D chỉ còn xét hai phương trình (2), (4) liên quan giữa truyền động của xe con và dao động của tải trọng. Nhiệm vụ thiết kế bây giờ sẽ là đảm bảo cho hai góc của tải trọng nhanh chóng bị tắt dần.

Mô hình động lực học của cầu trục 3D có chiều dài dây không đổi được viết gọn lại như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (7)$$

trong đó: \mathbf{q} là véc tơ trạng thái, \mathbf{u} là véc tơ tín hiệu đầu vào, các ma trận $\mathbf{M}(\mathbf{q}), \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \mathbf{D}(\mathbf{q}), \mathbf{G}(\mathbf{q})$ được xác định như sau:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ 0 & m_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$$

trong đó:

$$m_{11} = ml^2 \cos^2 \theta_y; \quad m_{22} = ml^2$$

Thành phần khác không của ma trận ly tâm Coriolis là:

$$c_{11} = -ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_y$$

$$c_{12} = -ml^2 \sin \theta_y \cos \theta_y \dot{\theta}_x$$

$$c_{21} = ml^2 \cos \theta_y \sin \theta_y \dot{\theta}_x$$

Thành phần khác không của véc tơ lực trọng trường là:

$$g_1 = mgl \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$g_2 = mgl \cos \theta_x \sin \theta_y$$

$$d_{11} = ml \cos \theta_x \cos \theta_y$$

$$d_{21} = -ml \sin \theta_x \sin \theta_y$$

$$d_{22} = ml \cos \theta_y$$

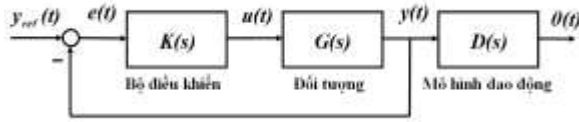
3. Phương pháp Hybrid Shape

3.1 Cấu trúc của bộ điều khiển Hybrid Shape

Phương pháp Hybrid Shape là một phương pháp để điều khiển chính xác vị trí đồng thời khử dao động, trong đó các thành phần của bộ điều khiển được thiết kế trên miền thời gian (thời gian xác lập, độ quá điều chỉnh, sai lệch tĩnh, hạn chế tín hiệu điều khiển) và

miền tần số (độ dự trữ biên độ, độ dự trữ pha, tần số dao động riêng, nhiễu tần số cao).

Cấu trúc điều khiển của phương pháp Hybrid Shape như sau:



H.2 Sơ đồ cấu trúc hệ thống

trong đó: $y_{ref}(t)$ là quỹ đạo đặt của xe con [m]

$y(t)$ là quỹ đạo thực của xe con [m]

$\theta(t)$ là góc quay của tải trọng [rad]

$e(t)$ là sai lệch của quỹ đạo thực so với quỹ đạo đặt

$u(t)$ là điện áp điều khiển [V]

Bộ điều khiển Hybrid Shape có dạng như sau:

$$K(s) = \prod_{i=1}^n K_i(s) \quad (8)$$

trong đó, thành phần thứ nhất là bộ điều khiển PID để điều khiển chính xác vị trí của xe con. Thành phần thứ hai là bộ lọc thông thấp để lọc nhiễu tần số cao và thành phần thứ ba là bộ lọc Notch để khử tần số dao động riêng của hệ.

Thành phần thứ nhất là bộ điều khiển PID có hàm truyền đạt như sau:

$$K_1(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (9)$$

với K_p là thành phần khuếch đại, K_I là thành phần tích phân và K_D là thành phần vi phân.

Bộ điều khiển PID hoạt động theo nguyên lý hồi tiếp, có nhiệm vụ đưa sai lệch $e(t)$ của hệ thống về giá trị không, sao cho quá trình quá độ thỏa mãn các yêu cầu cơ bản về chất lượng.

Tuy nhiên không phải mọi trường hợp ứng dụng đều phải sử dụng cả ba thành phần nói trên. Chẳng hạn bản thân đối tượng điều khiển đã có thành phần tích phân thì trong bộ điều khiển ta không cần thêm thành phần tích phân thì mới làm cho sai lệch tĩnh bằng không. Khi hệ thống thay đổi tương đối chậm và bản thân bộ điều khiển không cần phải phản ứng thật nhanh với sự thay đổi của sai lệch $e(t)$ thì ta không nhất thiết phải sử dụng thành phần vi phân.

Thành phần thứ hai là bộ lọc thông thấp có hàm truyền đạt như sau:

$$K_2(s) = \frac{1}{T_I s + 1} \quad (10)$$

với T_I là hằng số thời gian của bộ lọc thông thấp [s].

Bộ lọc thông thấp dùng để triệt tiêu các tín hiệu nhiễu có tần số lớn hơn $1/T_I$.

Với góc pha âm trong toàn dải tần số nên khâu lọc thông thấp rất dễ gây trễ pha và làm chậm đáp ứng của hệ thống.

Thành phần thứ ba là khâu lọc Notch có hàm truyền đạt như sau:

$$K_3(s) = \frac{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

Bộ lọc Notch dùng để triệt tiêu tần số dao động riêng ω_n của hệ. Khi hệ số tắt dần ξ càng nhỏ thì độ sâu về mặt biên độ của đồ thị bode càng giảm, nghĩa là biên độ của tín hiệu càng bị giảm đi nhiều.

3.2 Vấn đề tối ưu hóa bộ điều khiển Hybrid Shape

3.2.1 Các điều kiện chặn

Trong quá trình thiết kế tối ưu hóa bộ điều khiển Hybrid Shape, thì các tham số của bộ điều khiển được thiết kế phải đảm bảo không vi phạm các điều kiện chặn dưới đây. Nếu các tham số của bộ điều khiển sau khi thiết kế mà vi phạm ít nhất một trong các điều kiện chặn này thì được áp dụng và ta phải tiến hành các vòng lặp tiếp theo để tối ưu hóa bộ điều khiển Hybrid Shape. Các điều kiện chặn bao gồm:

(i) Hàm truyền của bộ điều khiển và hệ kín phải là các hàm bền, nghĩa là tất cả các điểm cực của hàm truyền của bộ điều khiển $K(s)$ và hàm truyền của hệ kín $G_k(s)$ phải nằm bên trái trục ảo. Khi đó, hệ thống sẽ được ổn định.

$$\text{Re}\{r_k\} < 0; \text{Re}\{r_{cl}\} < 0 \quad (12)$$

$$K_p, K_I, K_D > 0; T_I > 0$$

trong đó: K_p, K_I, K_D là các tham số của bộ điều khiển PID.

$\text{Re}\{r_k\}, \text{Re}\{r_{cl}\}$ là phần thực của các điểm cực của $K(s)$ và $G_k(s)$.

(ii) Hàm truyền đạt của bộ điều khiển Hybrid Shape phải có biên độ nhỏ hơn 0 [dB] tại tần số $\omega_0 = 314$ [rad/s] ($f = 50$ [Hz]) để tránh bị ảnh hưởng bởi dao động của nguồn điện.

$$|K(\omega_0)| < 0 \text{ [dB]} \quad (13)$$

(iii) Tín hiệu điện áp điều khiển $u(t)$ phải có biên độ không được vượt quá ± 10 [V].

$$\max|u| < 10 \text{ [V]} \quad (14)$$

(iv) Độ quá điều chỉnh O_s phải có biên độ không được vượt quá 10^{-3} [m].

$$\max(O_s) < 10^{-3} \text{ [m]} \quad (15)$$

(v) Bộ điều khiển phải triệt tiêu được tần số dao động riêng của hệ, tức là phải có biên độ nhỏ hơn 0 [dB] tại tần số dao động riêng ω_n của hệ.

$$|K(\omega_n)| < 0 \text{ [dB]} \quad (16)$$

3.2.2 Hàm tối ưu hóa

Bài báo này sử dụng thuật toán di truyền [11], [12] để tìm các tham số tối ưu của bộ điều khiển Hybrid Shape.

Trong mỗi vòng lặp tính toán tối ưu, nếu nghiệm của bài toán vi phạm vào một trong các điều kiện chặn ở

trên thì ngay lập tức hàm phạt J_p sẽ tăng thêm một giá trị w rất lớn ($w = 10^8$). Hàm phạt J_p dùng để loại bỏ các trường hợp làm cho hệ kín không ổn định như là có độ quá điều chỉnh lớn, điện áp điều khiển lớn hơn mức cho phép, không triệt tiêu được dao động riêng và nhiễu tần số cao. Do đó, hàm phạt J_p có tác dụng làm cho các nghiệm nhanh chóng hội tụ đến giá trị tối ưu nhất của bài toán chống rung. Sau đó, vòng lặp này sẽ ngay lập tức bị ngắt để chuyển sang vòng lặp tiếp theo. Quá trình này cứ thế lặp lại liên tục cho đến khi các tham số của bộ điều khiển Hybrid Shape được thỏa mãn.

Ở phương pháp Hybrid Shape thì bộ tham số cần tối ưu là $\{K_p, K_I, K_D, T_I\}$ và hàm tối ưu hóa J được định nghĩa như sau:

$$J = T_s + J_p \quad (17)$$

trong đó: T_s là thời gian xác lập

$$T_s = \min \left\{ t \mid |y_{ref} - y(t + \sigma)| < \varepsilon, \quad \sigma \geq 0 \right\} \text{ với } \varepsilon = 10^{-3}$$

$$J_p = w_1 + w_2 + \dots + w_i + \dots$$

y là vị trí thực của xe con ở thời gian t

y_{ref} là vị trí đặt của xe con

4. Nhận dạng dao động

Phương pháp Hybrid Shape được thiết kế khi biết được tần số dao động riêng của rung động. Do vậy, trước khi tối ưu hóa bộ điều khiển Hybrid Shape thì ta cần phải xác định được tần số dao động riêng của hệ. Một hệ thống tuyến tính dao động bậc bất kỳ đều có thể biểu diễn được dưới dạng tổng của các dao động bậc hai có hàm truyền đạt như sau:

$$D(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (18)$$

trong đó: k là hệ số khuếch đại, ω là tần số dao động và ξ là hệ số tắt dần ($0 < \xi < 1$).

Tần số dao động của hệ thống được xác định dựa vào việc phân tích đặc tính biên độ sự thay đổi của góc quay của tải trọng trên miền tần số. Bài báo này ta sử dụng thuật toán FFT để phân tích đặc tính tần số của dao động.

Các bước tìm tần số dao động riêng của hệ thống như sau:

Bước 1: Xác định các góc quay của tải trọng.

Bước 2: Phân tích FFT để biểu diễn đặc tính tần số của dao động.

Bước 3: Xác định các điểm cực đại cục bộ có biên độ đáng kể trong phân tích FFT. Các tần số dao động riêng cần tìm chính là các tần số tương ứng với các điểm cực bộ đó.

5. Kết quả mô phỏng

5.1 Các tham số mô phỏng

Để kiểm chứng bộ điều khiển được đề xuất và tính toán bài báo tiến hành mô phỏng trên Matlab &

Simulink với thời gian trích mẫu là 0.001 [s] và các thông số kỹ thuật như sau:

Bảng 1 Giá trị các tham số của cầu trục 3D

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Gia tốc trọng trường	g	9.81 [m s ⁻²]
Khối lượng tải trọng	m	0.5[kg]
Chiều dài dây treo	l	0.3[m]

Giả sử hàm truyền đạt của đối tượng xe con gồm hai khâu có dạng khâu tích phân quán tính bậc nhất theo hai chiều chuyển động và độc lập với nhau như sau:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (19)$$

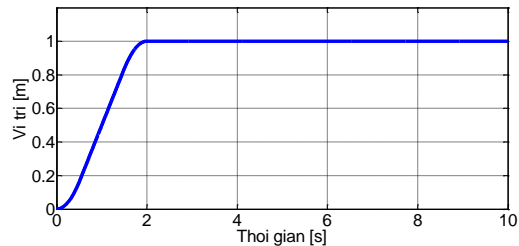
trong đó: T_m (s) là hằng số thời gian và K_m (m/sV) là hệ số khuếch đại. Các tham số này được cho như Bảng 1, trong đó tốc độ lớn nhất V_{max} (m/s) và gia tốc lớn nhất A_{max} (m/s²) trên mỗi trục X, Y.

Bảng 2 Các tham số của đối tượng điều khiển

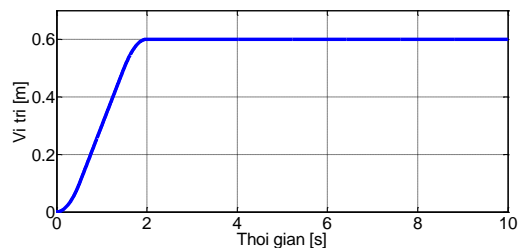
	K_m	T_m	V_{max}	A_{max}
Trục X	0.1670	0.0130	0.8	2.0
Trục Y	0.0838	0.0089	0.5	1

5.2 Nhận dạng dao động

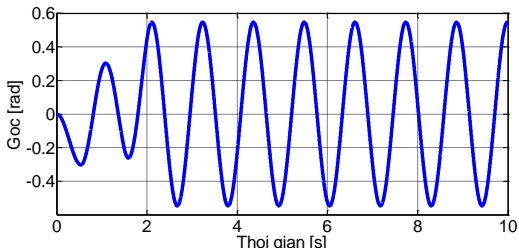
Kích thích tín hiệu đầu vào của mô hình cầu trục 3D có chiều dài dây không đổi lần lượt là u_1 và u_2 như hình H.3 và hình H.4, ta nhận được các đồ thị dao động của tải trọng như hình H.5 và hình H.6.



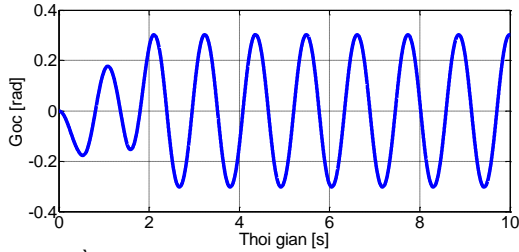
H.3 Đồ thị tín hiệu u_1



H.4 Đồ thị tín hiệu u_2

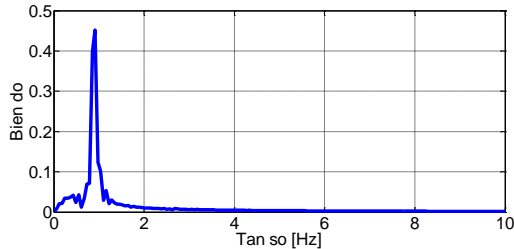


H.5 Đồ thị dao động theo trục X

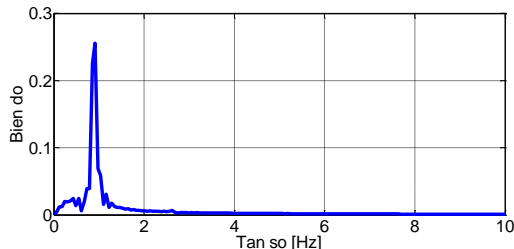


H.6 Đồ thị dao động theo trục Y

Tiến hành phân tích FFT từ kết quả đồ thị dao động của tải trọng như hình H.7 và hình H.8, ta xác định được một tần số dao động riêng duy nhất của hệ là $\omega = 5.75$ [rad/s] (với $f = 0.915$ [Hz]).



H.7 Đồ thị phân tích FFT của dao động theo trục X



H.8 Đồ thị phân tích FFT của dao động theo trục Y

5.3 Kết quả mô phỏng của phương pháp Hybrid Shape

Bài báo này so sánh kết quả mô phỏng của bộ điều khiển Hybrid Shape với bộ điều khiển PID.

Bộ điều khiển Hybrid Shape được thiết kế riêng cho từng trục chuyển động X và Y, trong đó các tham số được thiết kế như bảng 3, bộ lọc Notch có $\omega_n = 5.75$ [rad/s] và $\xi = 0.0001$.

Bảng 3 Giá trị hàm tối ưu và các tham số của bộ điều khiển trên mỗi trục

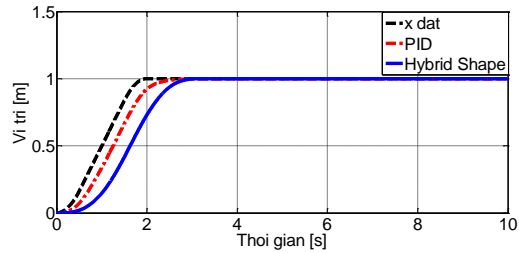
	$J = T_s$	K_p	K_I	K_D	T_I
Trục X	3.032	9.55	0.001	0.001	0.031
Trục Y	3.072	17.8	0.001	0.002	0.057

Bộ điều khiển PID dùng để so sánh với bộ điều khiển Hybrid Shape có các tham số được thiết kế riêng cho từng trục như bảng 4.

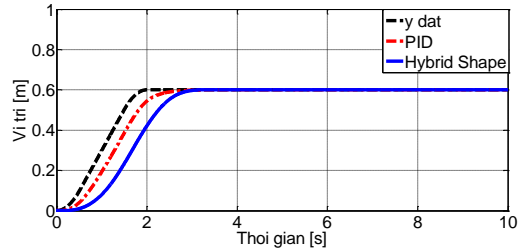
Bảng 4 Các tham số của bộ điều khiển PID trên mỗi trục

	$J = T_s$	K_p	K_I	K_D
Trục X	3.032	23.11	0.037	0.701
Trục Y	3.072	41	0.054	0.989

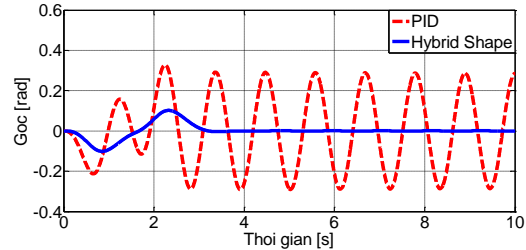
Kết quả so sánh vị trí của xe con theo từng trục X, Y được chỉ ra trên hình H.9 và H.10. Kết quả so sánh dao động của tải trọng theo từng trục X, Y được chỉ ra trên hình H.11 và H.12.



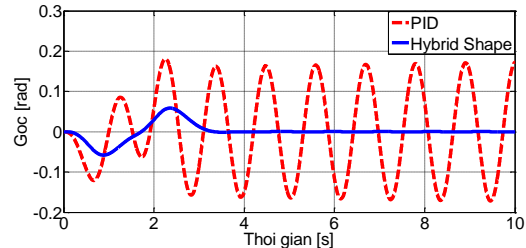
H.9 So sánh vị trí của xe con theo trục X



H.10 So sánh vị trí của xe con theo trục Y

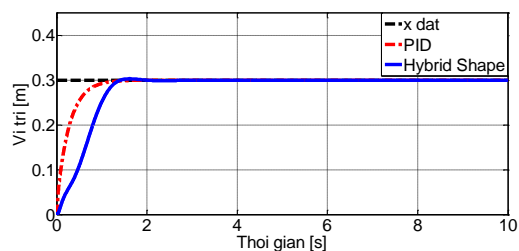


H.11 So sánh dao động của tải trọng theo trục X

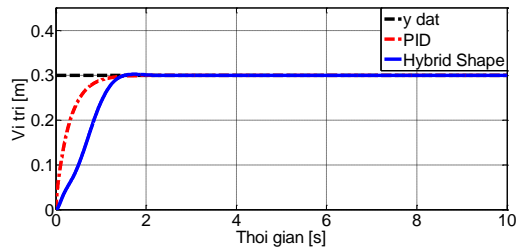


H.12 So sánh dao động của tải trọng theo trục Y

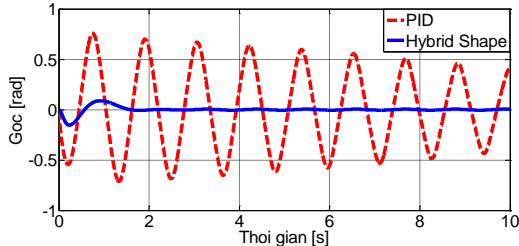
Bài báo này cũng so sánh kết quả đạt được của hai bộ điều khiển trên nhưng áp dụng cho quỹ đạo đặt trên mỗi trục X, Y có dạng là một tín hiệu bước nhảy, mục đích là để khuếch đại hiện tượng dao động của tải trọng. Kết quả so sánh vị trí của xe con theo từng trục X, Y được chỉ ra trên hình H.13 và H.14. Kết quả so sánh dao động của tải trọng theo từng trục X, Y được chỉ ra trên hình H.15 và H.16.



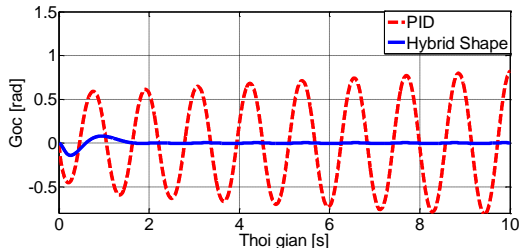
H.13 So sánh vị trí của xe con theo trục X



H.14 So sánh vị trí của xe con theo trục Y



H.15 So sánh dao động của tải trọng theo trục X



H.16 So sánh dao động của tải trọng theo trục Y

6. Kết luận và hướng phát triển

Dựa vào các kết quả so sánh giữa bộ điều khiển Hybrid Shape và bộ điều khiển PID, ta thấy bộ điều khiển PID giúp điều khiển chính xác vị trí của xe con nhưng khi xe con chuyển động thì gây ra dao động lớn của tải trọng, trong đó biên độ dao động theo trục X và trục Y có sự khác nhau là do quỹ đạo đặt khác nhau. Bên cạnh đó phương pháp Hybrid Shape cho kết quả tốt hơn hẳn, vừa điều khiển chính xác vị trí của xe con mà không gây ra dao động của tải.

Phương pháp Hybrid Shape xem xét việc thiết kế bộ điều khiển trên cả miền thời gian (sai lệch tĩnh, thời gian xác lập, độ quá điều chỉnh, hạn chế tín hiệu điều khiển) và miền tần số (độ dự trữ biên độ, độ dự trữ pha và tần số dao động) có tác dụng đảm bảo điều khiển chính xác vị trí của xe con, đồng thời triệt tiêu dao động dư của tải trọng. Tuy nhiên việc bổ sung thêm các bộ lọc tần số đã gây trễ pha cho hệ thống. Chính vì vậy, bài báo này đã sử dụng thuật toán di truyền để tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển. Kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển cầu trục 3D có chiều dài dây không đổi bằng phương pháp Hybrid Shape có hiệu quả rõ rệt trong việc chống rung lắc cho tải trọng.

Có thể thấy đây là một phương pháp có tính ứng dụng cao trong thực tiễn, không chỉ đối với riêng cầu trục 3D mà còn hiệu quả đối với nhiều các hệ thống khác như chống rung cho bình rót chất lỏng, cánh tay robot. Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ là điều khiển chống

rung cho cầu trục 3D có tính đến tham số chiều dài dây thay đổi.

Tài liệu tham khảo

- [1] Singhose, William. "Command shaping for flexible systems: A review of the first 50 years." International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 10.4 (2009), pp. 153-168.
- [2] R. M. T. Raja Ismail, M. A. Ahmad, M. S. Ramli, F. R. M. Rashidi, "Nonlinear Dynamic Modelling and Analysis of a 3-D Overhead Gantry Crane System with System Parameters Variation", IJSSST, Vol.11, No. 2, pp. 9-16.
- [3] Y. Fang, W. E. Dixon, E. Zergeroglu, and D. M. Dawson, "Nonlinear coupling control laws for a 3-DOF overhead crane system", Proceedings of 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA, December 2001, pp. 3776-3771.
- [4] Y. Fang, E. Zergeroglu, W. E. Dixon, and D. M. Dawson, "Nonlinear Coupling Control Laws for an Underactuated Overhead Crane System", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, No. 3, September 2003, pp. 418-423.
- [5] Dongkyoung Chwa, "Nonlinear Tracking Control of 3-D Overhead Cranes Against the Initial Swing Angle and the Variation of Payload Weight", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 4, July 2009, pp. 876-883.
- [6] Dragan AntićZoran, Jovanović, Staniša Perić, Saša Nikolić, Marko Milojković, Miloš Milošević, "Anti-Swing Fuzzy Controller Applied in a 3D Crane System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL.55, NO.11, November 2008.
- [7] Belkheir Benhellal, Mustapha Hamerlain, Rachid Ouiguini, Yacine Rahmani "Decoupled Adaptive Neuro-Fuzzy Sliding Mode Control Applied in a 3D Crane System", Journal of Electrical Engineering, 2014.
- [8] Yang, Jung Hua, "On the Adaptive Tracking Control of 3-D Overhead Crane Systems", INTECH Open Access Publisher, 2009.
- [9] NAIF B.ALMUTAIRI and MOHAMED ZRIBI (2009), "Sliding Mode Control of a Three-dimensional Overhead Crane", Journal of Vibration and Control, Publications Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, pp. 1679-1730.
- [10] K. Yano, T. Toda and K.Terashima (2001), "Sloshing Suppression Control of Automatic Pouring Robot by Hybrid Shape Approach", Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida USA, December 4-7, 2001, pp. 1328-1333.
- [11] Rahul malhotra, Narinder Singh and Yaduvir Singh (2001), "Genetic Algorithms: Concepts, Design for Optimization of Process

Controllers”, *Computer and Information Science*, Vol. 4, No. 2, March 2011, pp. 39-54.

- [12] Rajeshwar Prasad Srivastava (1992), “*Use of Genetic Algorithms for Optimization in Digital Control of Dynamic Systems*”, Association for Computing Machinery, pp. 219-224.



Trương Xuân Thường sinh năm 1991. Anh nhận bằng kỹ sư về Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST) năm 2014. Từ năm 2014 đến nay anh là học viên ngành Kỹ thuật Điều khiển và Tự động hóa của trường Đại học Bách Khoa Hà Nội (HUST). Hướng nghiên cứu chính là điều khiển chống rung.



Dương Minh Đức sinh năm 1979. Anh tốt nghiệp Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2002 chuyên ngành Tự động hóa. Từ tháng 11 năm 2002 anh làm giảng viên tại bộ môn Tự động hóa Công nghiệp, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Anh nhận bằng thạc sỹ và tiến sỹ kỹ thuật lần lượt các năm 2005 và 2008 tại Đại học Công nghệ Toyohashi, Nhật Bản. Các hướng nghiên cứu chính của anh gồm có điều khiển song phương, điều khiển chống rung và robot phục hồi chức năng.



Nguyễn Tùng Lâm tốt nghiệp Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2005 chuyên ngành Tự động hóa. Anh nhận bằng thạc sỹ tại Học viện Công nghệ Châu Á, Thái Lan và bằng tiến sỹ tại Đại học Tây Úc lần lượt các năm 2007 và 2014. Hiện tại anh là giảng viên bộ môn Tự động hóa Công nghiệp, Đại học Bách Khoa Hà Nội. Lĩnh vực nghiên cứu chính của anh là điều khiển phi tuyến và các hệ linh hoạt.