

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ju-Hwan Cha, Myung-II Roh, Kyu-Yeul Lee (), “*Dynamic Response Simulation of a Heavy Cargo Suspended by a floating crane Based on Multibody System Dynamics*”, *Ocean Engineering* 37, pp. 1273-1291. 2010
- [2] G.F. Clauss, M. Vannahme, K. Ellermann, E. Kreuzer (2000), “Subharmonic Oscillations of Moored Floating Cranes”, *Offshore Technology Conference 11953*, pp.1-8.
- [3] Bùi Khắc Gày, *Nghiên cứu khảo sát động lực học của cần trục*, Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Hà Nội. 1998
- [4] Keum-Shik Hong, Quang Hieu Ngo (2012), “*Dynamics of the container crane on a mobile harbor*”, *Ocean Engineering* 53, pp.16-24.
- [5] Đinh Văn Phong, *Phương pháp số trong cơ học*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội. 1999
- [6] R.J. Henry, Z.N. Masoud, A.H. Nayfeh and D.T. Mook, “Cargo Pendulation Reduction on Ship-Mounted Cranes Via Boom-Luff Angle Actuation,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, pp.1253-1264, 2001.
- [7] C.-M. Chin, A. H. Nayfeh and D. T. Mook, “Dynamics and Control of Ship-Mounted Cranes,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, pp.891-904, 2001.
- [8] K. Ellermann, E. Kreuzer, and M. Markiewicz,” Nonlinear Dynamics of Floating Cranes,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 27, pp. 107–183, 2002.
- [9] K. Ellermann and E. Kreuzer, “Nonlinear Dynamics in the Motion of Floating Cranes,” *Multibody System Dynamics*, vol. 9, pp. 377–387, 2003.
- [10] Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh and D. T. Mook, “Cargo Pendulation Reduction of Ship-Mounted Cranes,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 35, pp. 299–311, 2004.
- [11] Y. Al-Sweiti and D. Soeffker, “Modelling and control of an elastic ship-mounted crane using variable-gain model-based controller,” *Multi-body Dynamics*, vol. 220, pp. 239-255, 2006.
- [12] Y. Al-Sweiti and D. Söffker, “Cargo pendulation suppression of ship cranes with elastic booms,” *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 13, no. 6, pp. 503-529, 2007.
- [13] Y. Al-Sweiti and D. Söffker, “Modeling and Control of an Elastic Ship-mounted Crane Using Variable Gain Model-based Controller,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, no. 5, pp. 657–685, 2007.

Người phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Thường; TS. Cao Đức Thiệp

**THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VI PHÂN - TỈ LỆ HỒI TIẾP TUYẾN TÍNH HÓA
CHO CẦN TRỤC CONTAINER GẮN TRÊN TÀU**
DESIGN OF A PROPORTIONAL - DERIVATIVE FEEDBACK
LINERIZATION CONTROLLER FOR A SHIP - MOUNTED CONTAINER CRANE

TS. LÊ ANH TUẤN

Khoa Cơ khí, Trường ĐHHH Việt Nam

Tóm tắt

Chúng tôi xây dựng hai bộ điều khiển cho hệ thống cần container gắn trên tàu dựa trên sự phối hợp của ba kỹ thuật điều khiển: Hồi tiếp tuyến tính hóa, trượt, và vi phân-tỉ lệ (PD). Các nhiễu gồm độ đàn nhót của nước biển, độ đàn hồi của cáp treo, kích động của sóng biển gây ra chuyển động của tàu được kể đến đầy đủ trong quá trình thiết kế. Bộ điều khiển được thiết kế để thực hiện đồng thời bốn nhiệm vụ: Điều khiển xe con chuyển động chính xác đến vị trí yêu cầu, nâng hoặc hạ container chính xác, giảm dao động dọc và giảm lắc ngang container. Công trình gồm hai phần: Phần này tập trung xây dựng mô hình toán và thiết kế bộ điều khiển PD hồi tiếp tuyến tính hóa (PDTTH). Phần thứ hai thiết kế bộ điều khiển PD trượt sẽ được trình bày trong bài báo tiếp theo.

Abstract

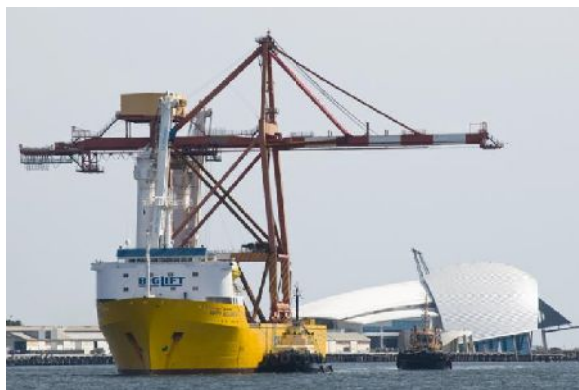
We construct two controllers for the container cranes based on the combination of feedback linearization, sliding mode, and proportional-derivative (PD) control. The disturbances composed of viscoelasticity of sea water, elasticity of suspended wire rope, and sea-excited motions of ship are fully considered. The controllers simultaneously conduct four duties: tracking the trolley to reference, lifting the container to desired cable length, reducing the axial container oscillation and container swing. This study consists of two parts. This part focuses on modelling and PD feedback linearization control. The second part representing PD sliding mode control will be introduced in the next paper.

Key words: control, ship-mounted crane, wave excitation.

1. Giới thiệu chung

Được xếp vào nhóm máy trục kiểu cầu, cần cầu container được sử dụng rộng rãi trong các cảng biển để nâng chuyển container. Nhiều cảng lớn trên thế giới hiện nay là cảng sông, ví dụ: cảng Shanghai (Trung Quốc), cảng Rotterdam (Hà Lan). Trong trường hợp cảng sông có luồng vào hẹp và nông, những tàu container siêu trọng, ví dụ: Tàu container 18.000 TEU, không thể vào cảng được. Khi đó, hàng hóa được chuyển tải ở ngoài phao số không. Cần cầu container gắn trên tàu (hình 1) được trang bị để nâng và chuyển container từ tàu lớn sang tàu nhỏ hơn. Sau đó, các tàu nhỏ sẽ chuyển container vào cảng nội địa để bốc dỡ.

Nghiên cứu về động lực học và điều khiển cần trục container gắn trên tàu chưa được quan tâm nhiều. Messineo và Serrani [1] đề xuất một bộ điều khiển thích nghi cho cần trục container đặt trên phao nổi trong trường hợp tải bị nhúng hoàn toàn trong nước. Erneux và Nagy [2] phân tích ổn định phi tuyến của cần trục container sử dụng kỹ thuật hồi tiếp trễ. Masoud và AH Nayfeh [3] phát triển một mô hình toán mới của cần cầu container khi xem container là một vật rắn treo trên bốn nhánh cáp cứng. Mô hình trên được đơn giản hóa thành mô hình con lắc kép. Luật điều khiển hồi tiếp trễ được áp dụng vào mô hình này để giảm lắc container. NA Nayfeh và Baumann [4] đã giải để tìm nghiệm giải tích của mô hình con lắc kép bằng phương pháp đa thang. Thúc đẩy bởi các nghiên cứu của nhóm AH Nayfeh [3, 4], chúng tôi xây dựng hai bộ điều khiển phi tuyến bền vững với các điểm cải tiến sau đây: (i) Khác với các công trình của AH Nayfeh và cộng sự [3,4] mà ở đó cần trục container gắn trên nền cứng với cáp cứng, công trình này thiết kế hai bộ điều khiển trong trường hợp tàu được xem là vật rắn treo trên nền nước đàn nhớt và cáp nâng hàng được xem là dây đàn hồi. (ii) Trong khi các công trình của nhóm AH Nayfeh [3, 4] thiết kế bộ điều khiển hồi tiếp trễ để giảm lắc container, chúng tôi sử dụng hai kỹ thuật điều khác (điều khiển trượt và hồi tiếp tuyến tính hóa) để thiết kế hai bộ điều khiển bền vững.



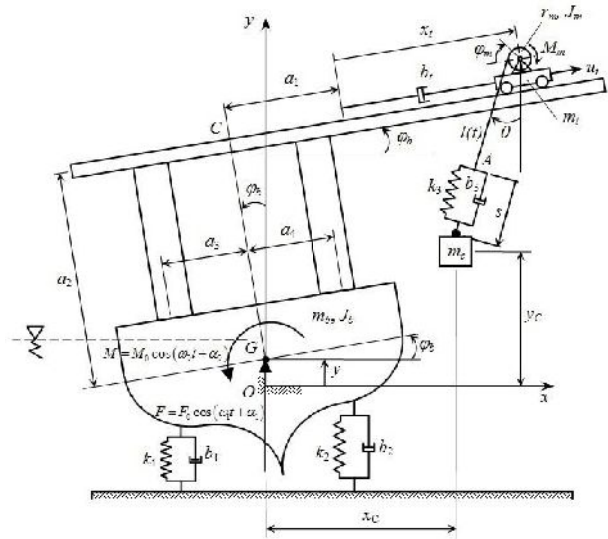
Hình 1. Cần trục container gắn trên tàu

Là hệ hệt dẫn động, cần trục container gắn trên tàu có hai tín hiệu vào gồm lực kéo xe con và mô men quay tời nâng hạ container. Hai tín hiệu này dẫn động bốn biến trạng thái gồm chuyển vị của xe con, chuyển động nâng hạ container, lắc container, và dao động của container dọc cáp. Dựa trên mô hình toán có kể đến sự đàn nhớt của nước biển, sự đàn hồi của cáp nâng, sự kích thích của sóng, hai bộ điều khiển được phân tích và thiết kế bằng các kỹ thuật điều khiển khác nhau. Hồi tiếp tuyến tính hóa từng phần và điều khiển trượt được áp dụng để dẫn động xe con và nâng container trong khi thành phần tỉ lệ - vi phân (PD) dùng để giảm lắc và giảm dao động dọc của container. Phối hợp các thành phần điều khiển nói trên, ta nhận được hai bộ điều khiển có tên: bộ điều khiển PD hồi tiếp phi tuyến và bộ điều khiển PD trượt. Ảnh hưởng của nhiễu ngoài gồm độ đàn hồi của cáp, đàn nhớt của nước biển, và kích thích của sóng được cân nhắc đầy đủ trong quá trình thiết kế các bộ điều khiển.

2. Mô hình toán

Xét hệ cần trục container gắn trên tàu có mô hình vật lý như hình 2. Hệ động lực có hai vật rắn gồm thân tàu (m_b, J_b) và tang quán cáp cơ cấu nâng (J_m, r_m), và hai chất điểm gồm khối lượng xe con m_t và khối lượng container m_c . Giả sử tàu đứng trên nền nước đàn nhớt đặc trưng bởi độ cứng (k_1, k_2) và các phần tử cản (b_1, b_2). Cáp nâng được xem như là dây đàn hồi đặc trưng bởi liên kết đàn hồi k_3 và phần tử cản b_3 . Hệ có sáu bậc tự do gồm chuyển động xe con $q_1 = x_t$, chuyển động quay của tời $q_2 = \varphi_m$, chuyển động lắc container $q_3 = \theta$, dao động dọc container trên cáp $q_4 = s$, dao động thẳng đứng của tàu $q_5 = y$, và lắc tàu $q_6 = \varphi_b$. Như thế,

$\mathbf{q} = [x_t \ \varphi_m \ \theta \ s \ y \ \varphi_b]^T$ là véc tơ mô tả các tọa độ suy rộng. Các lực ngoài tác dụng lên hệ gồm lực u_t để kéo xe con chuyển động và mô men M_m dùng để quay tời cơ cấu nâng.



Hình 2. Mô hình vật lý cần trục container gắn trên nền đàn hồi

2.1. Phương trình vi phân chuyển động

Hệ phương trình vi phân chuyển động đã được thiết lập trong [5] có dạng

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{U} \tag{1}$$

với $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = [m_{ij}]$ là ma trận khối lượng đối xứng, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [c_{ij}]$ là ma trận cản, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = [g_j]$ là véc tơ trọng lực ($i, j = 1 \div 6$), $\mathbf{U} = [u_1 = u_t \ u_2 = M_m \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ là véc tơ tín hiệu vào. Các phần tử của ma trận và véc tơ nói trên xem thêm trong [5]. Tính chất động lực của hệ được mô tả bằng hệ phương trình vi phân phi tuyến (1) mà ở đó hai thành phần lực ngoài $\mathbf{U} = [u_1 \ u_2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ được sử dụng để điều khiển sáu biến trạng thái $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$.

2.2. Kích thích động học của sóng biển

Giả sử tàu bị kích thích tuần hoàn bởi sóng biển điều hòa, chuyển động bình ổn của tàu gồm dao động theo phương thẳng đứng và lắc tàu quanh khối tâm được mô tả bằng các hàm điều hòa

$$y = Y_0 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \tag{2}$$

và

$$\varphi_b = -\Phi_0 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \tag{3}$$

với Y_0, Φ_0 là biên độ dao động, α_1 và α_2 là các pha đầu, ω_1 và ω_2 là các tần số cưỡng bức điều hòa. Thay kích thích động học (2 và (3) vào hệ động lực (1) dẫn đến phương trình giảm bậc của chuyển động gây ra bởi sóng

$$\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \widehat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \widehat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \widehat{\mathbf{F}} \quad (4)$$

với $\widehat{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = [m_{kl}]$, $\widehat{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [c_{kl}]$, $\widehat{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = [g_l]$, $\widehat{\mathbf{F}} = [f_l]$, $\mathbf{q} = [x_l \ \varphi_m \ \theta \ s]^T = [q_l]$, ($k, l = 1 \div 4$)

Các phần tử của véc tơ lực $\widehat{\mathbf{F}}$ được xác định bởi

$$f_1 = u_t + m_{15}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{16}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{16}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1)$$

$$f_2 = M_m + m_{25}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{26}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{26}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1)$$

$$f_3 = m_{35}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{36}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{36}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1)$$

$$f_4 = m_{45}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{46}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{46}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1)$$

Dưới tác dụng của kích thích động học (2) và (3), tàu dao động điều hòa với hai tần số cưỡng bức ω_1, ω_2 như là các đáp ứng xác lập. Nếu không có tín hiệu điều khiển tốt, dao động cưỡng bức của tàu dẫn đến sự lắc lớn của container và chuyển động không ổn định của xe con.

3. Tách hệ động lực

Lực $\widehat{\mathbf{F}}$ trong phương trình (4) gồm hai thành phần: Tín hiệu điều khiển (u_t, M_m) và kích thích điều hòa với tần số của sóng (ω_1, ω_2). Ta đi thiết kế các luật điều khiển (u_t, M_m) để dẫn các biến trạng thái $\mathbf{q} = [x_l \ \varphi_m \ \theta \ s]^T$ ổn định tiệm cận đến các giá trị xác lập $\mathbf{q}_d = [x_d \ \varphi_d \ 0 \ 0]^T$. Mô hình toán (4) cho thấy cần trục-tàu là hệ hạt dẫn động. Hai tín hiệu điều khiển (u_t, M_m) dẫn động trực tiếp trạng thái chủ động $\mathbf{q}_a = [x_l \ \varphi_m]^T$. Góc lắc và dao động dọc container đặc trưng bởi trạng thái bị động $\mathbf{q}_u = [\theta \ s]^T$ được điều khiển gián tiếp thông qua các ràng buộc hình học. Hệ động lực (4) được tách ra thành hai hệ con như sau

$$\widehat{\mathbf{M}}_{11}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \widehat{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \widehat{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) = \widehat{\mathbf{F}}_c + \widehat{\mathbf{F}}_{er1} \quad (5)$$

$$\widehat{\mathbf{M}}_{21}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{M}}_{22}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_u + \widehat{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \widehat{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) = \widehat{\mathbf{F}}_{er2} \quad (6)$$

với,

$$\widehat{\mathbf{M}}_{11}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{13} & m_{14} \\ 0 & m_{24} \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{M}}_{21}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{31} & 0 \\ m_{41} & m_{42} \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{M}}_{22}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} m_{33} & 0 \\ 0 & m_{44} \end{bmatrix},$$

$$\widehat{\mathbf{C}}_{11}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{C}}_{12}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{13} & 0 \\ c_{23} & 0 \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{31} & c_{32} \\ c_{41} & 0 \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} c_{33} & 0 \\ c_{43} & c_{44} \end{bmatrix},$$

$$\widehat{\mathbf{G}}_1(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} g_3 \\ g_4 \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{F}}_{er2} = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{F}}_c = \begin{bmatrix} u_t \\ M_m \end{bmatrix}, \widehat{\mathbf{F}}_{er1} = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_6 \end{bmatrix},$$

$$f_5 = m_{15}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{16}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{16}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1),$$

$$f_6 = m_{25}Y_0\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) - m_{26}\Phi_0\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \alpha_2) - c_{26}Y_0\omega_1 \cos(\omega_1 t + \alpha_1).$$

Chú ý rằng $\widehat{\mathbf{M}}_{22}(\mathbf{q})$ là ma trận xác định dương, phương trình (6) được viết lại

$$\ddot{\mathbf{q}}_u = \widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q}) \left[\widehat{\mathbf{F}}_{ex2} - \left\{ \widehat{\mathbf{M}}_{21}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{C}}_{21}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \widehat{\mathbf{C}}_{22}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \widehat{\mathbf{G}}_2(\mathbf{q}) \right\} \right] \quad (7)$$

Thay phương trình (7) vào phương trình (5) dẫn tới hệ động lực giảm bậc

$$\overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}_a + \overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \widehat{\mathbf{F}}_c + \widehat{\mathbf{F}}_{ex1} - \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{F}}_{ex2} \quad (8)$$

với $\overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q}), \overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}), \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ xem thêm trong [5].

Xem \mathbf{q}_a là tín hiệu ra, động lực học chủ động (8) được viết lại

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \overline{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{q}) \left\{ \widehat{\mathbf{F}}_c + \widehat{\mathbf{F}}_{ex1} - \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{F}}_{ex2} - \overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a - \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u - \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) \right\} \quad (9)$$

4. Bộ điều khiển PD hồi tiếp tuyến tính hóa

Chúng tôi đề xuất một bộ điều khiển phi tuyến sử dụng kỹ thuật hồi tiếp tuyến tính hóa kết hợp với tác động vi phân - tỉ lệ. Cấu trúc của bộ điều khiển gồm hai thành phần: Thành phần hồi tiếp tuyến tính hóa dùng để dẫn động xe con và nâng container (đặc trưng bởi \mathbf{q}_a). Trong khi đó, thành phần PD dùng để ổn định tiệm cận trạng thái bị động \mathbf{q}_u gồm góc lắc và dao động dọc của container trên cáp. Gọi $\mathbf{e}_a = \mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad} = \begin{bmatrix} (x_t - x_d) & (\varphi_m - \varphi_d) \end{bmatrix}^T$ và $\mathbf{e}_u = \mathbf{q}_u = \begin{bmatrix} \theta & s \end{bmatrix}^T$ là các sai số dẫn với x_d và φ_d là các giá trị tham chiếu. Ta thiết kế cấu trúc điều khiển để ổn định tiệm cận trạng thái chủ động \mathbf{q}_a . Để triệt tiêu thành phần phi tuyến trong vế phải của phương trình (9), ta đặt \mathbf{V}_a là tín hiệu điều khiển quy đổi sao cho động lực học chủ động (9) trở thành

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = \mathbf{V}_a \quad (10)$$

Để ổn định tiệm cận sai số dẫn \mathbf{e}_a , điều khiển hồi tiếp trạng thái quy đổi được chọn như sau

$$\mathbf{V}_a = -2\lambda\dot{\mathbf{q}}_a - \lambda^T\lambda\mathbf{e}_a = -2\lambda\dot{\mathbf{q}}_a - \lambda^T\lambda(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) \quad (11)$$

dẫn đến phương trình mạch kín

$$\ddot{\mathbf{e}}_a + 2\lambda\dot{\mathbf{e}}_a + \lambda^T\lambda\mathbf{e}_a = \mathbf{0} \quad (12)$$

Rõ ràng, nghiệm $\mathbf{e}_a = \mathbf{e}_a(0)\exp(-\lambda t)$ của phương trình (12) ổn định tiệm cận với mọi ma trận dương $\lambda > \mathbf{0}$. Ở đây, $\lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2)$ là các hệ số điều khiển dương. Thành phần điều khiển hồi tiếp trạng thái tổng quát để ổn định \mathbf{q}_a bây giờ được xác định

$$\widehat{\mathbf{F}}_c = \overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{F}}_{ex2} - \widehat{\mathbf{F}}_{ex1} - \overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \left\{ 2\lambda\dot{\mathbf{q}}_a + \lambda^T\lambda(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad}) \right\} \quad (13)$$

Để giảm lắc và giảm dao động dọc của container, thành phần tỉ lệ - vi phân

$$\widehat{\mathbf{F}}_{pd} = \mathbf{K}_p\mathbf{q}_u + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{q}}_u \quad (14)$$

cần được thêm vào cấu trúc điều khiển (13). Cấu trúc của bộ điều khiển PD hồi tiếp tuyến tính hóa để ổn định tiệm cận cả trạng thái chủ động \mathbf{q}_a và trạng thái bị động \mathbf{q}_u bây giờ được xác định

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{F}}_e = & \overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) + \widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{F}}_{er2} - \widehat{\mathbf{F}}_{er1} \\ & - \overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\left\{2\lambda\dot{\mathbf{q}}_a + \lambda^T\lambda(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad})\right\} - \overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})(\mathbf{K}_p\mathbf{q}_u + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{q}}_u) \end{aligned} \quad (15)$$

với $\mathbf{K}_p = \text{diag}(K_{p1}, K_{p2})$ và $\mathbf{K}_d = \text{diag}(K_{d1}, K_{d2})$ là các ma trận hệ số điều khiển, được xác định bằng phương pháp thử đúng dần (Trial and error), đây là những ma trận đường chéo dương. Bộ điều khiển hồi tiếp phi tuyến (15) gồm ba thành phần, mỗi thành phần có một nhiệm vụ cụ thể: Thành phần $\overline{\mathbf{C}}_1(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_a + \overline{\mathbf{C}}_2(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}_u + \overline{\mathbf{G}}(\mathbf{q})$ dùng để khử chuyển động tự do. Thành phần $(\widehat{\mathbf{M}}_{12}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{M}}_{22}^{-1}(\mathbf{q})\widehat{\mathbf{F}}_{er2} - \widehat{\mathbf{F}}_{er1})$ dùng để khử kích thích điều hòa của sóng biển. Sau cùng, các thành phần $\overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\left\{2\lambda\dot{\mathbf{q}}_a + \lambda^T\lambda(\mathbf{q}_a - \mathbf{q}_{ad})\right\}$ và $\overline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})(\mathbf{K}_p\mathbf{q}_u + \mathbf{K}_d\dot{\mathbf{q}}_u)$ lần lượt dùng để ổn định các trạng thái \mathbf{q}_a và \mathbf{q}_u của hệ.

5. Kết luận

Chúng tôi đã xây dựng một mô hình toán mới cho cần trục container gắn trên tàu có kể đến sự đàn hồi của cáp thép, sự đàn nhớt của nước biển, và kích thích của sóng. Chúng tôi cũng đã thiết kế thành công một luật điều khiển dựa trên hồi tiếp tuyến tính hóa và vi phân – tỉ lệ. Kết quả mô phỏng số để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển này đồng thời thiết kế thêm một bộ điều khiển khác sẽ được trình bày trong bài báo tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Messineo and A. Serrani, "Offshore crane control based on adaptive external models," *Automatica*, vol. 45, no. 11, pp. 2546-2556, 2009.
- [2] T. Erneux and T. K. Nagy, "Nonlinear stability of a delayed feedback controlled container crane," *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, no. 5, pp. 603-616, 2007.
- [3] Z. N. Masoud and A. H. Nayfeh, "Sway reduction on container cranes using delayed feedback controller," *Nonlinear Dynamics*, vol. 34, no. 3-4, pp.347-358, 2003.
- [4] Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh, and D. T. Mook, "Cargo pendulation reduction of ship-mounted cranes," *Nonlinear Dynamics*, vol. 35, no. 3, pp. 299-311, 2004.
- [5] Tuan LA, Cuong HM, Lee SG, Nho LC, and Moon K. Nonlinear feedback control of container crane mounted on elastic foundation with flexibility of suspended cable. *Journal of Vibration and Control*, Published online before print on November 24, 2014, DOI: 10.1177/1077546314558499.

Người phản biện: TS. Nguyễn Mạnh Thường; TS. Cao Đức Thiệp

TÍNH TOÁN DAO ĐỘNG XOẮN TỰ DO CỦA THANH THÀNH MỎNG TỰA TRÊN CÁC GỐI CỨNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIẢI PHÓNG LIÊN KẾT TRUNG GIAN CALCULATING THE FREE TORSIONAL VIBRATION OF CONTINUOUS BEAMS WITH THIN-WALLED CROSS-SECTION BY INTERMEDIATE SUPPORT RELEASE METHOD

TS. TRẦN NGỌC AN, ThS. LÊ TÙNG ANH
Khoa Công trình, Trường ĐHHH Việt Nam

Tóm tắt

Dao động xoắn có vai trò quan trọng như dao động uốn trong tính toán cầu treo dây văng và dây võng. Trong bài báo này, các tác giả trình bày phương pháp giải phóng liên kết trung gian để tính toán dao động xoắn tự do của thanh thành mỏng tựa trên các gối cứng.

Abstract

Torsional vibration plays an important role as bending vibration in calculating the cable-stayed bridges and suspension bridges. In this paper, the authors present the