

Điều khiển cầu trục kết hợp chống rung lắc và tránh vật cản

Control of Overhead crane in consideration of anti-sway and obstacle

Lê Mạnh Quý, Nguyễn Đức Minh, Dương Minh Đức, Nguyễn Tùng Lâm, Ngô Văn An
 Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

e-Mail: manhquy1992@gmail.com, ducminh216@gmail.com,
duc.duongminh@hust.edu.vn, lam.nguiventung@hust.edu.vn, vananktcn@gmail.com

Tóm tắt:

Cầu trục ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp để phục vụ cho việc vận chuyển hàng hóa. Nhưng các vấn đề về sự rung lắc tự nhiên của tải lại gây ảnh hưởng đến an toàn, sự hiệu quả khi vận chuyển. Hơn thế nữa, trong một số trường hợp trong không gian hoạt động của cầu trục có vật cản, yêu cầu đưa ra là phải có phương pháp điều khiển cầu trục sao cho cầu trục (hay tải trọng) giảm rung lắc và tránh được vật cản qua đó đảm bảo được sự an toàn, hiệu quả trong quá trình hoạt động của cầu trục. Trong nội dung bài báo sẽ trình bày việc kết hợp bộ điều khiển PD mở rộng giúp giảm sự rung lắc và thiết kế quỹ đạo đặt tránh vật cản cho cầu trục. Các kết quả được minh chứng bằng mô phỏng trên nền Matlab-Simulink.

Abstract:

Overhead crane is widely used in industry to transport of heavy loads. But the natural swing angle of crane payload affects to operation in safety and efficiency. Moreover, in some cases there exists obstacles in operation space that have to avoid. In this paper the combination of the PD extension controller to reduce swing angle and obstacle avoidance trajectory design is presented. The effectiveness of the proposed approach is shown by simulation in Matlab-Simulink.

Từ khóa: cầu trục, chống rung lắc, bộ điều khiển PD mở rộng, tránh vật cản

Keywords: Overhead crane, anti swing, PD extension controller, obstacle avoidance

Ký hiệu:

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
H, C, F, G		Các ma trận của phương trình động lực học.
m_r, m_c, m_p	kg	Khối lượng của giàn, xe con và tải trọng.
J	kg.m ²	là momen quán tính của hệ.
g	m/s ²	gia tốc trọng trường.

f_x, f_y	N	lực tác động vào hệ theo hai phương X và Y dọc theo quỹ đạo lực f
L	m	Chiều dài dây nối giữa cầu trục và tải,

1. Giới thiệu chung

Cầu trục là thiết bị nâng - hạ được sử dụng rộng rãi trong các phân xưởng, nhà máy và hải cảng, giúp nâng - hạ hay vận chuyển hàng hóa với khối lượng và kích thước lớn góp phần giảm sức lao động, cải thiện và nâng cao năng suất sản xuất. Cầu trục được vận hành chủ yếu bằng động cơ điện nên được sử dụng rộng rãi trong các nhà máy công nghiệp, nhà máy thép, thủy điện cũng như dân dụng... Với điều kiện làm việc khắc nghiệt như nhiều bụi, độc hại, nguy hiểm,... nên vai trò của cầu trục là rất quan trọng đối với hoạt động sản xuất và an toàn lao động. Với tầm quan trọng của cầu trục nên việc điều khiển cầu trục hoạt động hiệu quả, đạt hiệu suất cao nhất cũng rất được quan tâm. Có nhiều đề tài nghiên cứu tìm hiểu, nghiên cứu các phương pháp điều khiển cầu trục như sử dụng bộ điều khiển dạng PD kinh điển và bình phương năng lượng [1]. Phương pháp này có ưu điểm là khối lượng tính toán không quá lớn tuy nhiên chất lượng điều khiển chưa được tốt. Một số nghiên cứu khác sử dụng các điều khiển mờ, mạng nơron hay điều khiển thích nghi [6-8]. Khi sử dụng các phương pháp này thì chất lượng điều khiển đã được cải thiện tốt hơn tuy nhiên khối lượng tính toán lại tương đối lớn và khá phức tạp. Trong các phương pháp điều khiển được xem xét, bộ điều khiển PD mở rộng [5] có khối lượng tính toán và số lượng thông số điều khiển không lớn nhưng cho ta kết quả điều khiển có chất lượng tốt với thời gian quá độ nhỏ, độ chính xác cao và bền vững với độ bất định của hệ thống.

Trong quá trình vận hành của cầu trục có thể sẽ xuất hiện vật cản trong không gian hoạt động của cầu trục mà các phương pháp trên đều chưa xét tới khả năng tránh vật cản của cầu trục. Khả năng tránh vật cản của cầu trục đã được xem xét trong [9]. Tuy nhiên việc điều khiển cầu trục được lý tưởng hóa bằng việc coi các thành phần chuyển động theo các phương của cầu trục là tuyến tính và độc lập với nhau.

Bài báo này sẽ xem xét việc sử dụng bộ điều khiển PD mở rộng [5] để điều khiển mô hình cầu trục có tính phi tuyến để giảm rung lắc, đồng thời kết hợp với phương pháp thiết kế quỹ đạo để có thể điều khiển

cầu trục tránh vật cản trong không gian hoạt động. Nội dung của bài báo bao gồm các phần sau: phần 2 trình bày mô hình toán học cho cầu trục; phần 3 trình bày điều khiển dạng PD mở rộng và đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số bộ điều khiển tới chất lượng điều khiển. Chương 4 giải thích thuật toán thiết kế quỹ đạo tránh vật cản và sử dụng quỹ đạo tránh vật cản thiết kế được là quỹ đạo đặt cho cầu trục với bộ điều khiển PD mở rộng. Các nhận xét và kết luận được trình bày ở phần 5.

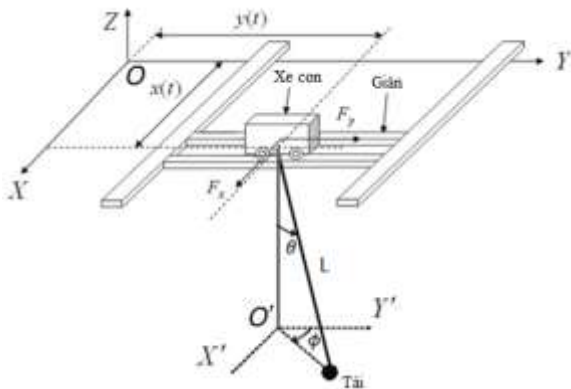
2. Mô hình toán học của cầu trục

Mô hình cầu trục được xem xét với hệ trục tọa độ OXYZ như trong Hình 1, trong đó giàn chuyển động theo trục OX, xe con chuyển động theo trục OY và tải trọng chuyển động theo trục OZ. Các góc đặc trưng cho sự rung lắc của tải là θ và ϕ được xác định như trong hình vẽ.

Trong phạm vi nghiên cứu của đề tài này ta xét trường hợp L không đổi trong quá trình hoạt động của hệ thống.

Sử dụng phương trình Lagrange có thể thu được phương trình động lực học của cầu trục như sau [1]:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{F} \quad (1)$$



H.1: Mô hình cầu trục

Trong đó:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix}; \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{31} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & H_{13} & H_{14} \\ 0 & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & 0 \\ H_{41} & H_{42} & 0 & H_{44} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & C_{13} & C_{14} \\ 0 & 0 & C_{23} & C_{24} \\ 0 & 0 & 0 & C_{34} \\ 0 & 0 & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix}$$

$$H_{11} = m_p + m_c + m_r; \quad H_{13} = m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi$$

$$H_{14} = m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi; \quad H_{22} = m_p + m_c;$$

$$H_{23} = m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi; \quad H_{24} = -m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi$$

$$H_{31} = m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi; \quad H_{32} = m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi$$

$$H_{33} = m_p \cdot L^2 + J;$$

$$H_{41} = m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi; \quad H_{42} = -m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi;$$

$$H_{44} = m_p \cdot L^2 \cdot \sin^2 \theta + J$$

$$C_{13} = -m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \dot{\theta} + m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot \dot{\phi}$$

$$C_{14} = m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot \dot{\theta} - m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \dot{\phi}$$

$$C_{23} = -m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \dot{\theta} - m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi \cdot \dot{\phi}$$

$$C_{24} = -m_p \cdot L \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi \cdot \dot{\theta} - m_p \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \cdot \dot{\phi}$$

$$C_{34} = -m_p \cdot L^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\phi};$$

$$C_{43} = m_p \cdot L^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\phi}; \quad C_{44} = m_p \cdot L^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta}$$

$$G_{31} = m_p \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta$$

Từ (1) ta có:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}(\mathbf{q})^{-1} \cdot (\mathbf{F} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q})) \quad (2)$$

$$\text{Đặt: } \ddot{\mathbf{r}} = \frac{1}{\det(\mathbf{H})} \cdot (\mathbf{P}\mathbf{f} + \mathbf{W}) \quad (3)$$

Trong đó:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}; \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix}; \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}$$

$$P_{11} = H_{22} \cdot H_{33} \cdot H_{44} - H_{23} \cdot H_{32} \cdot H_{44} - H_{24} \cdot H_{33} \cdot H_{42}$$

$$P_{12} = H_{13} \cdot H_{32} \cdot H_{44} + H_{14} \cdot H_{33} \cdot H_{42}$$

$$P_{21} = H_{23} \cdot H_{31} \cdot H_{44} + H_{24} \cdot H_{33} \cdot H_{41};$$

$$P_{22} = H_{11} \cdot H_{33} \cdot H_{44} - H_{13} \cdot H_{31} \cdot H_{44} - H_{14} \cdot H_{33} \cdot H_{41}$$

$$W_1 = -P_{11} \cdot V_{11} - P_{12} \cdot V_{21} - (-H_{22} \cdot H_{13} \cdot H_{44} + H_{13} \cdot H_{42} \cdot H_{24}$$

$$- H_{14} \cdot H_{23} \cdot H_{42}) \cdot (V_{31} + G_{31}) - (-H_{32} \cdot H_{13} \cdot H_{24}$$

$$- H_{14} \cdot H_{22} \cdot H_{33} + H_{14} \cdot H_{23} \cdot H_{32}) \cdot V_{41}$$

$$W_2 = -P_{21} \cdot V_{11} - P_{22} \cdot V_{21} - (-H_{11} \cdot H_{23} \cdot H_{44} - H_{13} \cdot H_{41} \cdot H_{24} + H_{14} \cdot H_{23} \cdot H_{41}) \cdot (V_{31} + G_{31}) - (-H_{11} \cdot H_{33} \cdot H_{24} + H_{13} \cdot H_{31} \cdot H_{24} - H_{14} \cdot H_{23} \cdot H_{31}) \cdot V_{41}$$

3. Thuật toán điều khiển PD mở rộng

Mục đích của việc xây dựng thuật toán điều khiển là điều khiển cầu trục đến vị trí mong muốn, đồng thời góc lệch giữa tải và phương thẳng đứng hội tụ về 0.

Đặt $\mathbf{e} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_d = [x - x_d \quad y - y_d]^T = [x_e \quad y_e]^T$ với \mathbf{r}_d là vị trí đặt của xe cầu. Theo [5] ta có bộ điều khiển PD mở rộng:

$$F = \left(\frac{P}{\det(H)} \right)^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -k_e^2 \cdot \mathbf{e} - 2k_e \cdot \dot{\mathbf{e}} - \frac{W}{\det(H)} \\ + \ddot{\mathbf{r}}_d + \begin{bmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \end{bmatrix} \cdot f \end{pmatrix}$$

với k_e là hằng số dương, f được xác định bởi:

$$f = \left\{ \kappa [k_\theta \cdot \theta + 2 \cdot \dot{\theta}] + (k_\theta \cdot \theta + 2 \cdot \dot{\theta}) \cdot (\sin^2 \theta + k_\theta \cdot \dot{\theta}^2) \right\} \times \left| \begin{matrix} \sin \phi \cdot (-\ddot{x}_d + 2k_e \cdot \dot{x}_e + k_e^2 \cdot x_e) + \\ \cos \phi \cdot (-\ddot{y}_d + 2k_e \cdot \dot{y}_e + k_e^2 \cdot y_e) \end{matrix} \right| + \kappa [k_\theta \cdot \theta + 2 \cdot \dot{\theta}] \cdot \left| \frac{k_\theta \cdot \dot{\theta}}{\sqrt{a}} \right| + (k_\theta \cdot \theta + 2 \cdot \dot{\theta}) + L \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta}^2$$

với: k_θ là hệ số dương, $\bar{a} = \left(\frac{m_p \cdot L \cdot \cos \theta}{m_p, L^2 + J} \right)^2$

$\kappa(x)$ là hàm được xác định:

$$\kappa(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x) & \text{khi } |x| \geq \gamma(t) \\ \sin\left(\frac{x}{\gamma(t)} \cdot \frac{\pi}{2}\right) & \text{khi } |x| < \gamma(t) \end{cases}$$

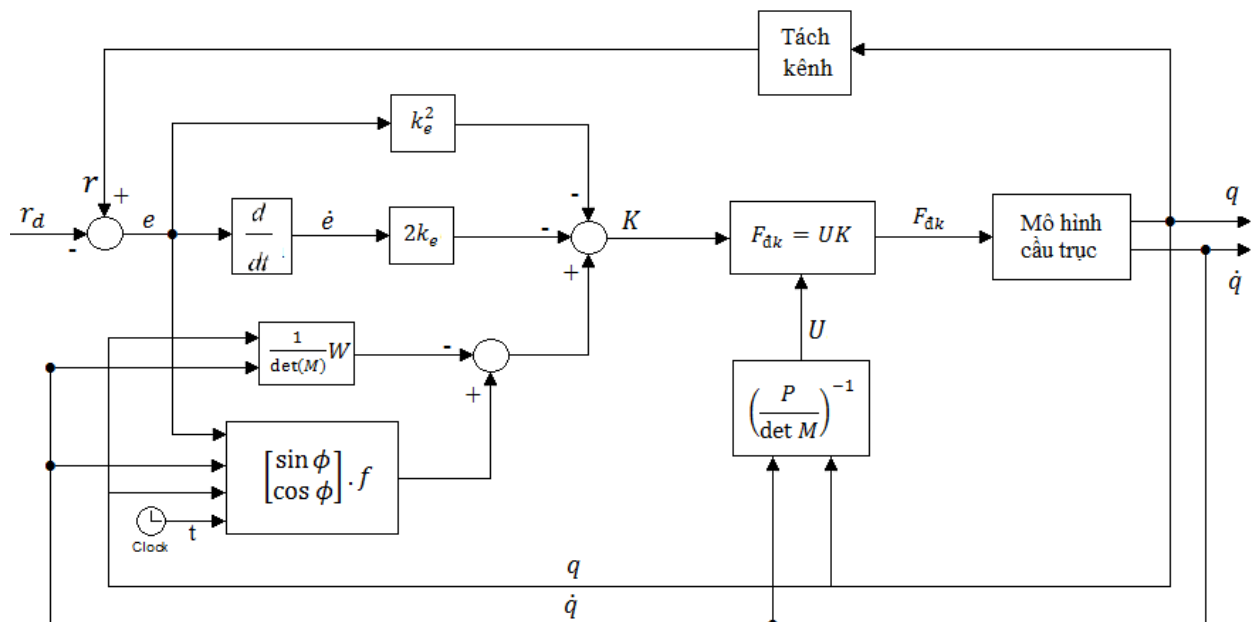
Hàm $\gamma(t)$ được xác định bởi: $\gamma(t) = \frac{1}{\alpha + \beta \cdot e^{-\alpha t}}$;

Trong đó α, β, γ là các hệ số, $0 \leq \gamma(t) \ll 1, t \geq 0$

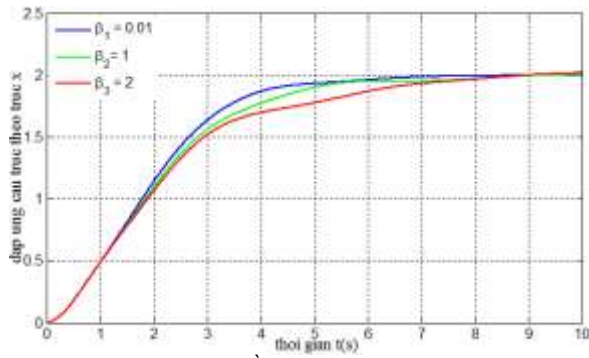
Các tham số của bộ điều khiển gồm $\alpha, \beta, \gamma, k_\theta$ và k_e .

Việc chứng minh tính ổn định và bền vững của bộ điều khiển có thể xem chi tiết trong [5].

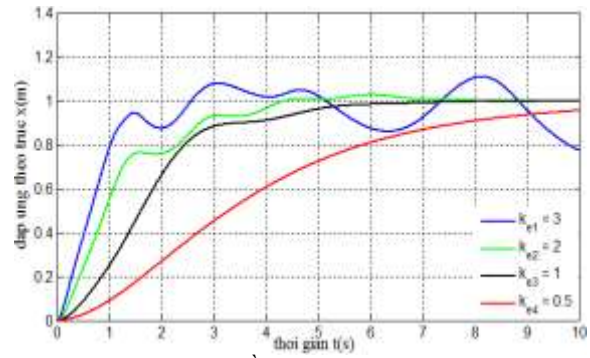
Một trong những vấn đề khi sử dụng một bộ điều khiển là lựa chọn giá trị các tham số của bộ điều khiển. Để có được sự lựa chọn hợp lý, bài báo thực hiện việc đánh giá ảnh hưởng của các tham số điều khiển tới chất lượng hệ thống. Trong các tham số điều khiển thì tham số β và k_e ảnh hưởng tới chất lượng điều khiển một cách rõ ràng nhất, vì vậy trong phạm vi bài báo này mô phỏng đánh giá sự ảnh hưởng của 2 tham số này tới chất lượng điều khiển.



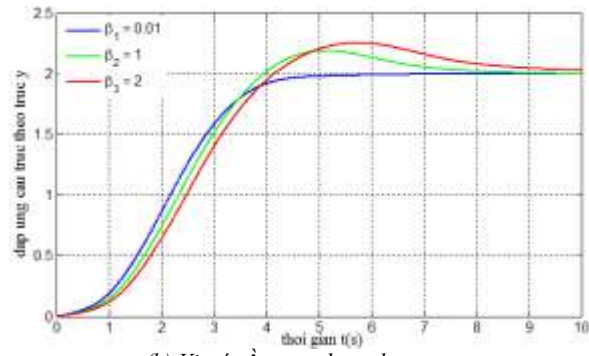
H.2: Sơ đồ khối bộ điều khiển PD mở rộng



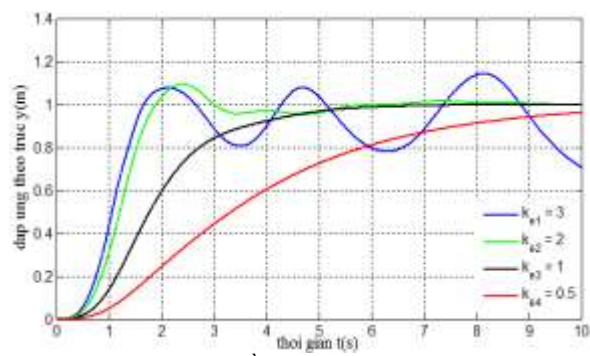
(a) Vị trí cầu trục theo phương x



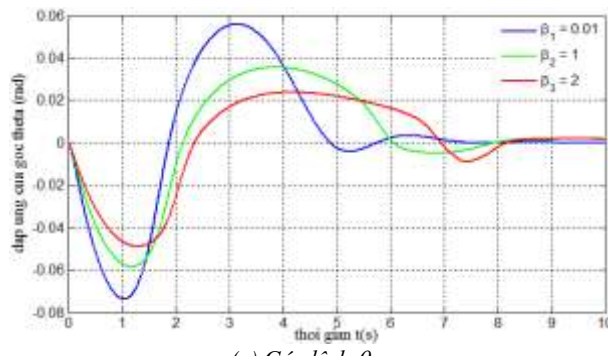
(a) Vị trí cầu trục theo phương x



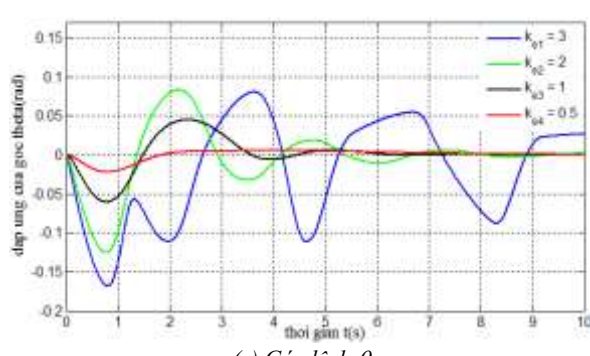
(b) Vị trí cầu trục theo phương y



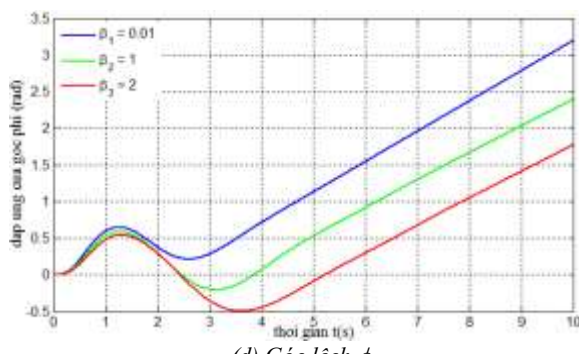
(b) Vị trí cầu trục theo phương y



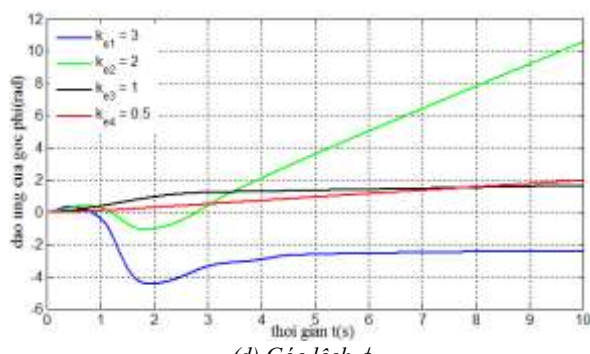
(c) Góc lệch θ



(c) Góc lệch θ



(d) Góc lệch ϕ



(d) Góc lệch ϕ

H.3: Các đáp ứng của cầu trục khi giá trị tham số β thay đổi

H.4: Các đáp ứng của cầu trục khi giá trị tham số k_e thay đổi

Hình 3 và hình 4 thể hiện đáp ứng của hệ thống với sự thay đổi tương ứng của thông số β và k_e . Có thể nhận thấy các tham số điều khiển β và k_e ảnh hưởng lớn đến sự ổn định của hệ thống, đặc biệt là tham số k_e . Khi tăng β sẽ gây tăng độ quá điều chỉnh trong điều khiển vị trí và tăng thời gian hội tụ về 0 của góc θ .

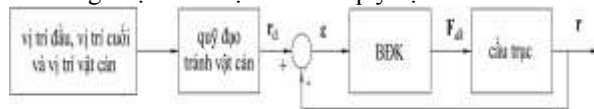
Khi điều chỉnh tham số β nhỏ dần (tiến dần về 0) thì hệ thống có động học tốt hơn, góc θ hội tụ về 0 nhanh hơn. Tuy nhiên việc điều chỉnh giá trị β bị ràng buộc bởi điều kiện $0 \leq \gamma(t) \ll 1$ nên không thể chọn giá trị quá bé hay bằng 0.

Tham số điều khiển k_e tác động khá lớn đến độ ổn định của cầu trục. Khi k_e lớn thì cầu trục có thể mất ổn định. Khi giảm k_e xuống thì cầu trục mới hoạt động ổn định, và k_e càng nhỏ thì biên độ và thời gian dao động của cầu trục càng thấp. Tuy nhiên việc giảm giá trị k_e làm tăng thời gian quá độ của hệ thống. Do đó cần lựa chọn giá trị k_e sao cho cân bằng giữa việc dập tắt rung lắc và tốc độ chuyển động của cầu trục.

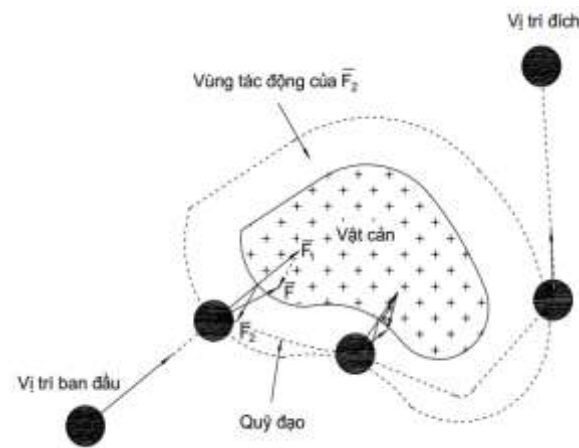
4. Điều khiển cầu trục tránh vật cản

Trong quá trình hoạt động của cầu trục có thể sẽ xuất hiện các vật cản trong không gian làm việc. Nhiệm vụ của người thiết kế điều khiển cầu trục là phải tránh được vật cản. Trong phạm vi của đề tài này ta xét trường hợp vị trí và hình dạng của vật cản là có thể xác định được.

Để điều khiển cầu trục tránh vật cản ta sẽ tiến hành xây dựng quỹ đạo chuyển động tránh vật cản, sau đó sẽ đưa quỹ đạo đó làm tín hiệu đặt cho hệ thống đã được điều khiển chống rung. Do việc điều khiển trực tiếp tải trọng là tương đối khó khăn nên ta sẽ điều khiển tải trọng thông qua việc điều khiển xe con của cầu trục. Việc này là hoàn toàn chấp nhận được do cầu trục đã được điều khiển chống rung lắc, do đó và sai khác giữa vị trí tải trọng và xe con là không đáng kể hoặc có thể xác định được sai khác tối đa để đưa vào ràng buộc cho việc thiết kế quỹ đạo.



H.5: Sơ đồ khối điều khiển cầu trục tránh vật cản



H.6: Hình vẽ mô tả phương pháp tránh vật cản

Để điều khiển xe con vừa di chuyển về vị trí đích và vừa tránh vật cản trong quá trình chuyển về đích, sử dụng ý tưởng điều khiển robot tránh vật cản trong [2]. Để tránh vật cản, xe con sẽ bị một lực $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$,

trong đó \mathbf{F}_1 là lực kéo xe con về vị trí đích và \mathbf{F}_2 là lực đẩy xe con ra xa khỏi vật cản.

Hàm \mathbf{F}_1 được chọn có dạng là bộ điều khiển PD:

$$\mathbf{F}_1 = -k_p \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_d) - k_v \cdot \dot{\mathbf{r}}$$

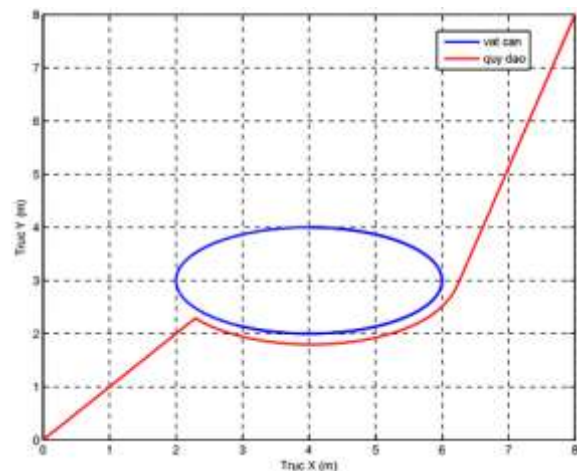
trong đó k_p, k_v là các hệ số dương, \mathbf{r} là vectơ vị trí hiện tại và \mathbf{r}_d là vectơ vị trí đích.

Hàm \mathbf{F}_2 được lựa chọn có dạng sau:

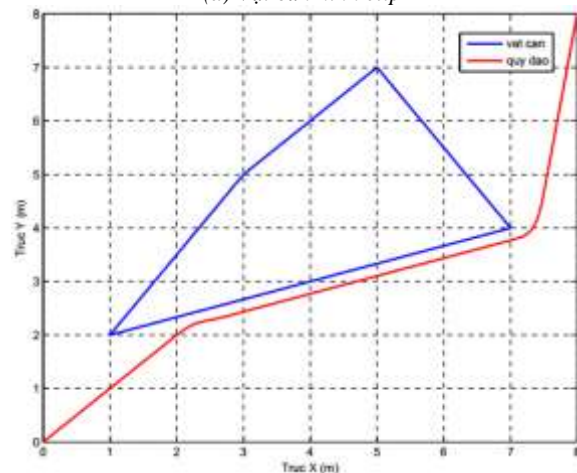
$$\mathbf{F}_2 = \begin{cases} 0 & \text{khi } \rho > \rho_0 \\ \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}} & \text{khi } \rho \leq \rho_0 \end{cases}$$

$$\text{với } \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial x} & \frac{\partial \rho}{\partial y} \end{bmatrix}^T$$

trong đó ρ là khoảng cách giữa xe con và vật cản, ρ_0 giới hạn vùng chịu tác động của vật cản và là hằng số, η là hằng số.



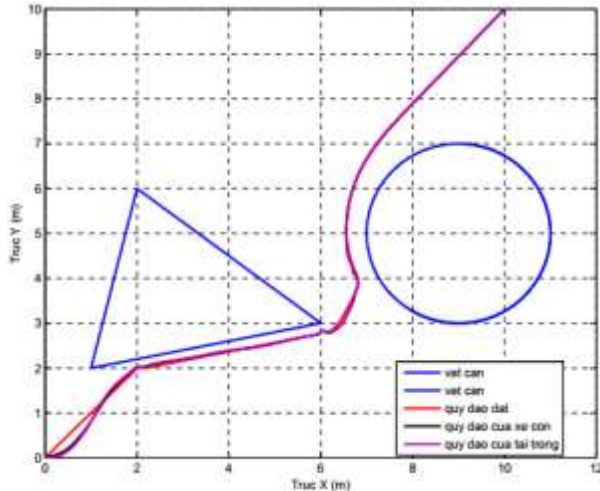
(a) Vật cản hình elip



(b) Vật cản hình đa giác

H.7: Quỹ đạo tránh vật cản đối với 1 số dạng vật cản
Để xây dựng được quỹ đạo của xe con từ lực tác động vừa được xây dựng ở trên, động học của xe con xấp xỉ với khâu tích phân- quán tính bậc 1 có đáp ứng quá độ

phù hợp với đáp ứng cầu trục với bộ điều khiển PD mở rộng. Giải phương trình vi phân với đầu vào là lực tác động vào xe con sẽ thu được quỹ đạo tránh vật cản mong muốn. Hình 7 và 8 biểu diễn quỹ đạo tránh vật cản của cầu trục trong một vài trường hợp khác nhau. Có thể thấy quỹ đạo được xây dựng đã đáp ứng được yêu cầu tránh được vật cản và luôn giữ khoảng cách ρ_0 xác định với vật cản. Quỹ đạo trơn, không có sự đứt đoạn.



H.8: Đáp ứng của cầu trục khi tránh vật cản

Từ hình 8 có thể thấy rằng cầu trục bám theo quỹ đạo đã đặt sẵn cầu trục đã tránh được vật cản. Quỹ đạo của xe con và tải trọng bám với quỹ đạo đặt. Hai quỹ đạo này gần như không có sự khác biệt do có sự điều khiển vị trí và chống rung của bộ điều khiển PD mở rộng, điều này có nghĩa là hệ cầu trục đã chống rung tốt trong khi chuyển động để tránh vật cản. Tại những thời điểm đầu và khi quỹ đạo đặt đổi hướng chuyển động ta thấy quỹ đạo của xe con và tải trọng bị trễ so với quỹ đạo đặt là do hệ thống có quán tính nên gây ra hiện tượng trên, trong phạm vi bài báo này ta không đề cập đến cách giải quyết vấn đề trên.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày việc kết hợp điều khiển phi tuyến cầu trục với quỹ đạo tránh vật cản. Phương pháp điều khiển phi tuyến được lựa chọn ở đây là PD mở rộng. Các ảnh hưởng của các thông số bộ điều khiển đến đáp ứng của hệ đã được xem xét và đánh giá. Thuật toán thiết kế quỹ đạo tránh vật cản cũng đã được trình bày và áp dụng cho cầu trục. Quỹ đạo tránh vật cản đã được sử dụng làm tín hiệu đặt cho hệ thống và kết quả mô phỏng đã cho thấy sự hiệu quả của sự kết hợp này. Trong tương lai, việc thực thi thuật toán điều khiển trên thiết bị thực tế sẽ được triển khai, ngoài ra thuật toán thiết kế quỹ đạo cũng sẽ được cải tiến và mở rộng.

Tài liệu tham khảo:

[1] 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.

- [2] Oussama Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulator and Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, Vol.5, No.1, Spring 1986, pp. 90-98.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] Akihiro Kaneshige, Yudai Kawasaki and Satoshi Ueki, Shunsuke Nagai, "Development of an Autonomous Mobile Overhead Traveling Crane with on-line Obstacle Recognition and Path-Planning Based on Obstacle Information-The Design of a Transfer Control System in Consideration of Oscillating Control-" 2nd International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA 2013)
- [10] Hassan K. Khalil, *Nonlinear System*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2002.
- [11] R. Lozano, I.Fantoni, and D. J. Block, "Stabilization of the inverted pendulum around its homoclinic orbit", *Systems & Control Letters*, vol. 40, pp. 197-204, 2000.



Lê Mạnh Quý, sinh năm 1992 là sinh viên ngành tự động hóa công nghiệp, trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

của Viện Điện, HUST. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế và thực hiện các hệ thống đo lường, điều khiển,



Nguyễn Đức Minh, sinh năm 1992 là sinh viên ngành tự động hóa công nghiệp, trường Đại học Bách khoa Hà Nội.



Dương Minh Đức sinh năm 1979. Anh tốt nghiệp Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2002 chuyên ngành Tự động hóa. Từ tháng 11-2002 anh làm giảng viên tại bộ môn Tự động hóa Công nghiệp, trường ĐHBK 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.



Ngô Văn An sinh năm 1986. Anh nhận bằng Kỹ sư Điều khiển tự động tại trường ĐH Kỹ thuật công nghiệp Thái Nguyên năm 2010. Từ năm 2011 đến nay là giảng viên của Bộ Cơ điện tử, ĐH Kỹ thuật công nghiệp, ĐH Thái Nguyên. Hiện anh là học viên cao học