

# Giải thuật chống lắc tích hợp hệ thống vision cho cầu trục container

Nguyễn Quốc Chí, Nguyễn Tiến Khang

**Tóm tắt**— Trong nghiên cứu này, một giải pháp điều khiển nhằm tự động hóa cần cầu container được đề xuất. Mục tiêu điều khiển bao gồm điều khiển vị trí cho xe đẩy (trolley) và khử dao động của tải. Trong đó, giải thuật PID (Proportional Integral Derivative) được sử dụng cho điều khiển vị trí và giải thuật PD được sử dụng cho điều khiển khử dao động. Giải pháp điều khiển này sử dụng tín hiệu hồi tiếp của góc lắc của tải được thu thập từ hệ thống vision. Giải pháp dùng hệ thống vision nhằm khắc phục khó khăn kỹ thuật khi lắp đặt các cảm biến vị trí thông thường (encoder, potention metter) lên hệ thống cần cầu container trong thực tế. Mô phỏng và thực nghiệm đã được thực hiện nhằm kiểm chứng tính khả thi của giải pháp điều khiển được đề nghị.

**Từ khóa**— Điều khiển cần cầu container, bám đối tượng, khử dao động, tự động hóa cảng.

## 1 GIỚI THIỆU

Những ngày nay, khoảng 90% hàng hóa được đóng trong các container và hơn 200,000,000 TEU (twenty-foot equivalent unit) được chuyên chở trên thế giới thông qua các cảng trong năm 2015 [1]. Ở Việt Nam, khoảng 11,000 đến 12,000 TEU đã được vận chuyển trong năm 2015 [2].

Các cầu trục dùng để bốc dỡ container giữ vai trò quyết định đảm bảo năng suất cho cảng. Do vậy, tốc độ xếp dỡ của các cầu trục container và (như một hệ quả) ảnh hưởng lên chi phí vận chuyển cũng như mức tiêu hao năng lượng và khí thải. Một điều lưu ý rằng, hầu hết hiệu suất làm

việc của các cầu trục container hiện nay phụ thuộc vào trình độ vận hành và kinh nghiệm của các công nhân. Khó khăn lớn nhất mà những công nhân vận hành gặp phải là vấn đề dao động của thùng container trong quá trình xếp dỡ. Khi xuất hiện dao động của container, người vận hành bằng kinh nghiệm và khả năng quan sát sẽ thực hiện các thao tác để khử dao động. Do đó, khử dao động của container xuất hiện trong quá trình vận chuyển một cách nhanh nhất và tự động hóa thao tác khử dao động này sẽ làm tăng hiệu quả sử dụng của các cầu trục.

Hệ thống cầu trục được chia làm 3 phần chính: Phần khung chính, xe con (trolley), và spreader (ngáng), như trong Hình 1. Hệ spreader và container được treo với trolley thông qua các nhánh dây cáp, do vậy khi trolley di chuyển, hệ spreader và container sẽ có chuyển động lắc như một hệ con lắc thuận. Để nâng cao năng suất vận chuyển container, trolley mang container phải ngắn thời gian cho mỗi chu kỳ bốc dỡ container sẽ càng lớn gây mất an toàn cho hệ thống xung quanh phạm vi làm việc của cầu trục. Chúng ta biết rằng khi năng suất tăng thì độ an toàn giảm và ngược lại. Theo báo cáo [3], có đến 30% thời gian trong vận chuyển các container là dùng để khử chuyển động lắc của container. Vì vậy, cần phải có các biện pháp nhằm triệt tiêu góc lắc trong quá trình di chuyển tốc độ cao của cầu trục.



Hình 1. Cấu tạo cơ bản của cầu trục.

*Bài nhận ngày 12 tháng 10 năm 2016, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 07 tháng 02 năm 2017.*

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ của đề tài mã số T-CK-2016-01.

Nguyễn Quốc Chí giảng dạy tại Trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 268 Lý Thường Kiệt Q. 10, Việt Nam (e-mail: nqchi@hcmut.edu.vn)

Nguyễn Tiến Khang đã tốt nghiệp Trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 268 Lý Thường Kiệt Q. 10, Việt Nam (e-mail: khangbachkhoa1992@gmail.com).

Các biện pháp để khử chuyển động lắc của hệ spreader được chia làm hai loại chính: bán tự động [4-6] và tự động hoàn toàn [7-11]. Giải pháp bán tự động là trang bị cho cầu trục một hệ thống giám sát với nhiệm vụ là giúp cho người vận hành ra quyết định để đạt được khả năng thực thi tốt hơn của cầu trục. Hệ thống này cũng có thể hỗ trợ tự động vận hành dưới sự giám sát của người điều khiển. Giải pháp này được áp dụng phổ biến vì tính đơn giản. Tuy nhiên, độ chính xác không cao và tính hiệu quả phụ thuộc vào khả năng quan sát và xử lý của người vận hành. Giải pháp tự động là trang bị cho cầu trục một hệ thống có thể thay thế hoàn toàn người vận hành. Hầu hết các phương pháp điều khiển bao gồm tự động hoặc bán tự động đã được phát triển đều đòi hỏi phải đo được chuyển động lắc của container. Một điểm đáng lưu ý là việc cầu trục thường làm việc trong những môi trường khắc nghiệt là một trở ngại lớn trong việc triển khai các nghiên cứu vào thực tế vì các cảm biến vị trí thông thường (ví dụ như: encoder và potention metter) không thể lắp đặt vào cầu trục. Do vậy, một số sản phẩm công nghiệp cho tác động khử lắc được phát triển dựa trên nền tảng là hệ thống vision được sử dụng để đo các dịch chuyển của container có thể kể ra như sau: Smart Crane [12], TMEIC [13], và Mircoview & Linzhi [14].

Có thể thấy rằng giải pháp tích hợp hệ thống điều khiển sử dụng hệ thống vision như là một bộ cảm biến là một giải pháp có tính khả thi cao được các nhà nghiên cứu [6, 8, 15, 16] cùng các hãng công nghiệp quan tâm và phát triển. Tuy nhiên, khoảng cách giữa nghiên cứu và ứng dụng trong thực tiễn vẫn còn lớn. Trong thực tế các bộ điều khiển sử dụng trong nghiên cứu như input shaping [17], feedback control [18], feedback control sử dụng giải thuật xử lý ảnh phức tạp (vector code correlation) chưa khả thi để ứng dụng trong thực tế [19,20]. Có 2 nguyên nhân cần phải khắc phục. Lý do thứ nhất là độ phức tạp của các giải thuật ảnh hưởng đến tính bền vững của bộ điều khiển. Với một bộ điều khiển quá phức tạp sử dụng với chế độ tự động hoàn toàn, một sự cố xảy ra với các thiết bị cảm biến sẽ dẫn tới những chuyển động ngoài dự tính của người vận hành. Lý do thứ hai là hầu hết các bộ điều khiển này chưa thể cung cấp đáp ứng tốt như người vận hành có kỹ năng cao. Do vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất một giải pháp điều khiển có tính bền vững để đóng góp cho hướng cải tiến các bộ điều khiển cầu trục theo chế độ tự động.

Chúng tôi đề nghị một bộ điều khiển có thể hoạt

động tự động điều khiển vị trí và khử lắc cho cầu trục. Giải thuật PID sẽ được sử dụng cho điều khiển vị trí của cầu trục và giải thuật PD cho khử dao động sẽ được thiết kế. Việc sử dụng hai giải thuật PID và PD nhằm hướng đến triển khai ứng dụng trong thực tế vì độ tin cậy cũng như khả năng có thể triển khai được trong các phần cứng thông dụng.

## 2 MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CHO HỆ THỐNG CẦN CẦU.

Xem xét cần cầu container được minh họa trong Hình 2. Container được giữ bởi ngàm kẹp container (spreader) và cả hai được liên kết với xe đẩy (trolley) bằng một dây có chiều dài  $l$ . Khối lượng của xe đẩy và tải trọng tương ứng là  $m_t$  và  $m_p$ . Một lực điều khiển  $f_x$  được tác động vào xe đẩy (lực ma sát được bỏ qua). Lực ma sát luôn tồn tại trong thực tế. Tuy nhiên, để xác định các mô hình ma sát và các hệ số ma sát trong mô hình là rất khó khăn. Do vậy, trong nghiên cứu khởi đầu này chúng tôi giả sử ma sát được bỏ qua trong điều kiện là lực cung cấp bởi động cơ là rất lớn (so với lực ma sát) và cần cầu được bảo dưỡng tốt. Trong thực tế, một cần cầu container sử dụng hệ bốn dây cáp để liên kết ngàm kẹp với xe đẩy. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này khởi đầu này, cần cầu container được mô hình hoá là một sợi dây liên kết giữa tải và xe đẩy. Giả thiết rằng chuyển động của xe đẩy và chuyển động lắc của tải cùng nằm trong một mặt phẳng XY. Đặt  $x$  là vị trí xe đẩy trên trục X,  $\theta$  là góc lắc và  $g$  là gia tốc trọng trường.

Động năng  $T$  và thế năng  $U$  của toàn bộ hệ thống được xác định như sau:

$$T = \frac{1}{2} m_t \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{l} \cos \theta - l \dot{\theta} \sin \theta)^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x} + \dot{l} \sin \theta + l \dot{\theta} \cos \theta)^2 \quad (1)$$

$$U = -m_p g l \cos \theta \quad (2)$$

Đặt  $\mathbf{q} = (x, \theta)$  là tọa độ suy rộng tương ứng với lực suy rộng  $\mathbf{f} = (f_x, 0)$ , sử dụng phương trình Euler-Lagrange,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}_i} = \mathbf{f}_i, i = 1, 2, \quad (3)$$

phương trình chuyển động của hệ cầu trục được xây dựng như sau:

$$f_x = (m_t + m_p) \ddot{x} + m_p \ddot{l} \sin \theta + m_p l \ddot{\theta} \cos \theta + 2m_p \dot{l} \dot{\theta} \cos \theta - m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta, \quad (4)$$

$$0 = m_p l \ddot{x} \cos \theta + m_p l^2 \ddot{\theta} + 2m_p \dot{l} \dot{\theta} + m_p g l \sin \theta. \quad (5)$$

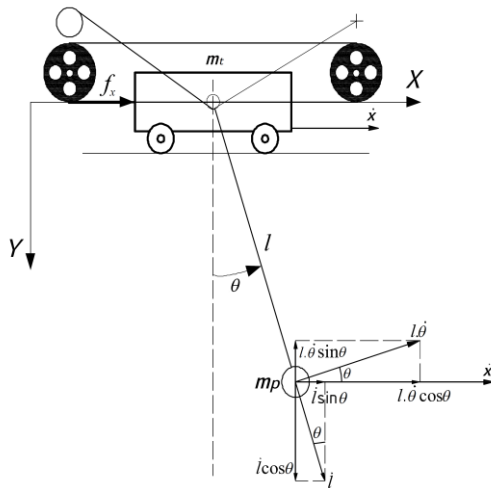
Từ (4) và (5), phương trình hệ thống được viết lại như sau:

$$\ddot{x} = h_1(\dot{\theta}, \theta) + g_1(\theta) f_x, \quad (6)$$

$$\ddot{\theta} = h_2(\dot{\theta}, \theta) + g_2(\theta) f_x, \quad (7)$$

trong đó,

$$h_1(\dot{\theta}, \theta) = \frac{m_p \sin \theta (g \cos \theta + l \dot{\theta}^2 - \ddot{l})}{m_t + m_p \sin^2 \theta}, \quad (8)$$



Hình 2. Phân tích lực hệ cần cầu container.

$$h_2(\dot{\theta}, \theta) = \frac{-(m_p + m_t)g \sin \theta + m_p \ddot{l} \sin \theta \cos \theta}{m_t l + m_p l \sin^2 \theta} - \frac{m_p l \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta}{m_t l + m_p l \sin^2 \theta} - \frac{2l \dot{\theta}}{l}, \quad (9)$$

$$g_1(\theta) = \frac{1}{m_t + m_p \sin^2 \theta}, \quad (10)$$

$$g_2(\theta) = -\frac{\cos \theta}{m_t l + m_p l \sin^2 \theta}. \quad (11)$$

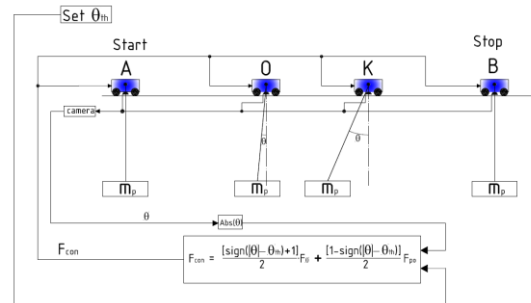
Trong mô hình động lực học được trình bày, chúng tôi chưa xem xét đến động năng quay và ảnh hưởng bởi lực gió bởi vì những lý do sau: (i) Trong thực tế, khi xe đẩy trượt trên ray thì góc quay RPY (roll, pitch, yaw) có xuất hiện. Tuy nhiên, để khử các chuyển động này cần thêm một cơ cấu chấp hành khác với động cơ dẫn động xe đẩy; (ii) Lực gió rất đáng kể tuy nhiên cần một bộ ước lượng để xác định mô hình và thông số của lực gió. Trong phạm vi mục tiêu của nghiên cứu khởi đầu này, chúng tôi xin dừng lại ở mô hình đơn giản nhất và sẽ tiếp tục phát triển ở các nghiên cứu tiếp theo.

### 3 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ VÀ KHỦ DAO ĐỘNG KẾT HỢP.

#### 3.1 Thiết kế giải thuật điều khiển

Trong phần này, một bộ điều khiển vị trí kết hợp với khử dao động sẽ được thiết kế để đạt được các mục tiêu sau: (i) Điều khiển xe đạt được vị trí xd đặt trước; (ii) giữ dao động của tải trong ngưỡng an toàn  $\theta_{th}$  được đặt trước.

Hoạt động của bộ điều khiển này được mô tả trong Hình 3. Xe đẩy được xuất phát từ A và đến vị trí mong muốn là B. Lực tác động vào xe đẩy  $F_{con}$  bao gồm 2 lực: (i) Lực điều khiển vị trí lái xe đẩy từ A đến B là  $F_{po}$ ; (ii) Lực khử dao động  $F_{\theta}$ . Trong khi xe đẩy di chuyển, góc lắc  $\theta$  của tải được quan sát bởi hệ thống vision (sẽ được trình bày trong phần 3.2). Nếu  $|\theta| < \theta_{th}$ , nghĩa là dao động của tải vẫn còn trong ngưỡng an toàn (vị trí O trong Hình 3), lực  $F_{con}$  chỉ bao gồm lực điều khiển vị trí  $F_{po}$ . Khi dao động của tải vượt quá giá trị cho phép  $|\theta| \geq \theta_{th}$ , lực  $F_{po}$  ngừng tác động, xe đẩy được dừng lại để cho lực khử dao động  $F_{\theta}$  đưa giá trị dao động của tải về dưới giá trị cho phép. Sau đó, lực điều khiển vị trí tiếp tục lái xe đẩy đến vị trí yêu cầu B.



Hình 3. Sơ đồ thuật toán quá trình điều khiển.

Công thức tính cho lực  $F_{con}$  như sau:

$$F_{con} = \frac{\text{sgn}(|\theta| - \theta_{th}) + 1}{2} F_{\theta} + \frac{1 - \text{sgn}(|\theta| - \theta_{th})}{2} F_{po}. \quad (12)$$

Trong đó, lực  $F_{po}$  được cho bởi:

$$F_{po} = K_p^{po} e + K_d^{po} \frac{de}{dt} + K_i^{po} \int e dt, \quad (13)$$

với

$$e = x_d - x, \quad (14)$$

và  $K_p^{po}$ ,  $K_d^{po}$ , và  $K_i^{po}$  là các hệ số điều khiển sẽ được xác định một cách thích hợp bằng phương pháp thực nghiệm (trình bày trong phần 4). Giải thuật PID được lựa chọn dựa trên tiêu chí là nhằm giảm độ vọt lố cho xe đẩy khi tiến đến vị trí mong muốn  $x_d$ . Lực khử dao động của xe được tính như

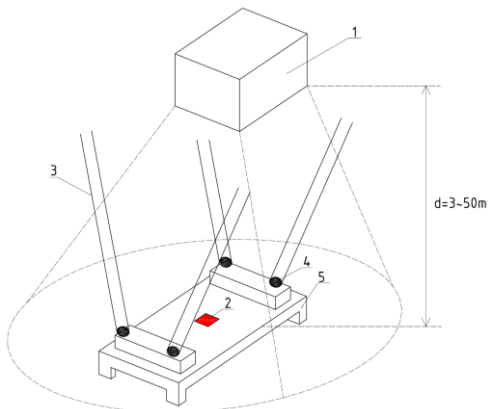
sau:

$$F_{\theta} = -K_p^{\theta} l \sin \theta - K_d^{\theta} d(l \sin \theta) / dt, \quad (15)$$

với  $K_p^{\theta}$  và  $K_d^{\theta}$  là các hệ số điều khiển. Trong đó, luật điều khiển PD đã được sử dụng với tiêu chí là tăng thời gian đưa dao động của tải về không.

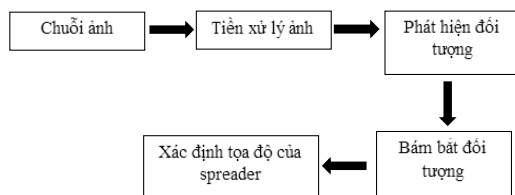
### 3.2 Hệ thống vision cho quan sát góc lắc

Hệ thống vision quan sát góc lắc  $\theta$  được trình bày trong Hình 4. Trong đó một camera được sử dụng để quan sát một đèn hồng ngoại (sau đây được gọi là đối tượng) được gắn trên spreader (nhằm loại bỏ các yếu tố nhiễu sáng vào ban ngoài và thiếu ánh sáng vào ban đêm). Tiến trình thu thập và xử lý dữ liệu của hệ thống camera được trình bày trong Hình 5. Giải thuật phát hiện đối tượng được đề nghị dựa trên cơ sở kết hợp phương pháp optical flow [21] và phương pháp phát hiện đối tượng dựa vào màu sắc. Phương pháp phát hiện đối tượng này sẽ có ưu điểm là hoạt động được trong các trường hợp đối tượng có dải tốc độ chuyển động khá rộng. Sau đó thuật toán theo vết màu (colour-based trackers) [22] sẽ được sử dụng để bám theo đối tượng. Sau khi đối tượng được phát hiện và bám, bộ xử lý sẽ tiến hành phân vùng đối tượng và cung cấp tọa độ của trên frame dưới dạng pixel.



1-Camera; 2-Đèn hồng ngoại (đối tượng camera theo dõi); 3-Dây cáp; 4-Puli; 5-Spreader

Hình 4. Hệ thống vision.



Hình 5. Tiến trình xử lý của hệ thống vision.

Công thức sau đây được dùng để tính tọa độ thực của spreader:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \approx \mathbf{K} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{D} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

Trong đó ma trận thông số nội  $\mathbf{K}$  được cho bởi:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_u & k_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & k_v / \sin \theta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

và ma trận  $\mathbf{D}$  cho bởi

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0}_3^T & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

với ma trận  $\mathbf{R}$  và vector  $\mathbf{T}$  mô tả hướng, vị trí tương đối giữa hệ tọa độ camera và hệ tọa độ cố định. Trong nghiên cứu này  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{R}$ , và  $\mathbf{T}$  được xác định bằng phương pháp thực nghiệm sử dụng Camera Calibration Toolbox for MATLAB. Tọa độ của đối tượng tìm được qua (15) sẽ được dùng để tính độ dịch chuyển theo trục x và trục y,  $a = |X - X_0|$  và  $b = |Y - Y_0|$ . Trong đó,  $(X_0, Y_0)$  là tọa độ của spreader ở vị trí cân bằng, và  $(X, Y)$  là tọa độ của spreader tại thời điểm bị lắc. Trong nghiên cứu này, chúng tôi chỉ xét trường hợp cần cầu chuyển động trong mặt phẳng. Do vậy, góc lắc theo phương X được tính là  $\theta = \arcsin(a/l)$ , trong đó  $l$  là chiều dài của dây treo tải.

## 4 MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM ĐỀ KIỂM CHỨNG GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN.

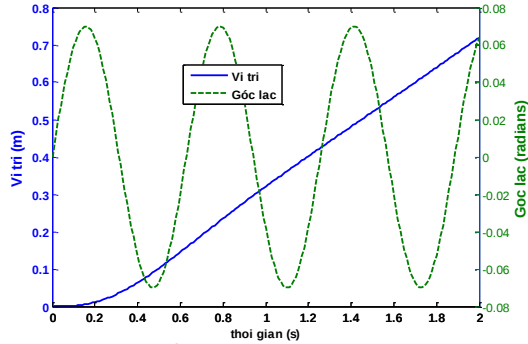
### 4.1 Mô phỏng

Mô phỏng số điều khiển vị trí xe đẩy kết hợp khử lắc cho tải sử dụng MATLAB. Phương trình động lực học hệ thống (6)-(7) được sử dụng để mô phỏng. Số liệu đầu vào của mô phỏng như sau:  $m_p = 2.25$  kg;  $m_t = 20$  kg;  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup>;  $l = 0.5$  m. Trong đó, mô phỏng được chia thành 2 trường hợp: (i) Chỉ có điều khiển vị trí và không có khử lắc với  $F_{con} = 10$  N; (ii) Bộ điều khiển vị trí kết hợp khử lắc với  $F_{con}$  được tính như công thức (11).

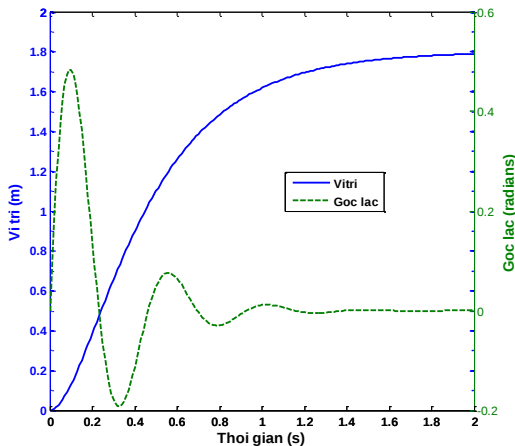
Kết quả được trình bày trong Hình 6 cho thấy: Với lực  $F_{con} = 10$  N không đối sẽ tạo ra dao động với biên độ khá lớn của tải xung quanh vị trí cân bằng ( $\theta_{max} = 0.06$  rad = 4 độ). Mô phỏng hệ thống với  $F_{con}$  được tính theo công thức (11), trong đó công cụ PID tuner trong MATLAB được sử dụng để tìm các hệ số PID tối ưu: (i)  $K_p^{po} = 180$ ,

$K_d^{po} = 51$ , và  $K_i^{po} = 115$  cho điều khiển vị trí của

xe đẩy; (ii)  $K_p^\theta = 150$  và  $K_d^\theta = 115$  cho điều khiển khử dao động của tải. Đáp ứng của hệ thống được mô tả trong Hình 7. Với kết quả là dao động của tải gần như được khử hoàn toàn sau 1 giây (cũng là lúc xe đẩy đạt vị trí cuối cùng).



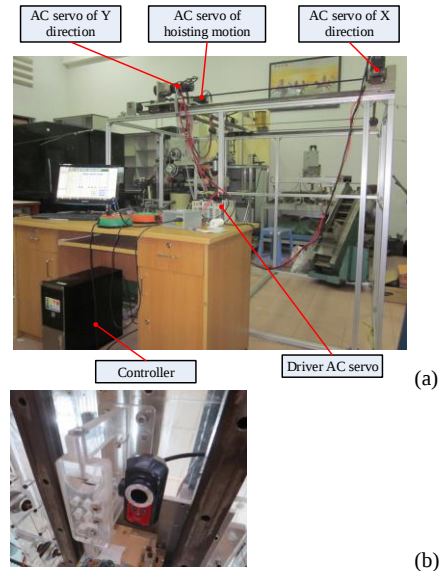
Hình 6. Kết quả mô phỏng với  $F_{con}=10N$ .



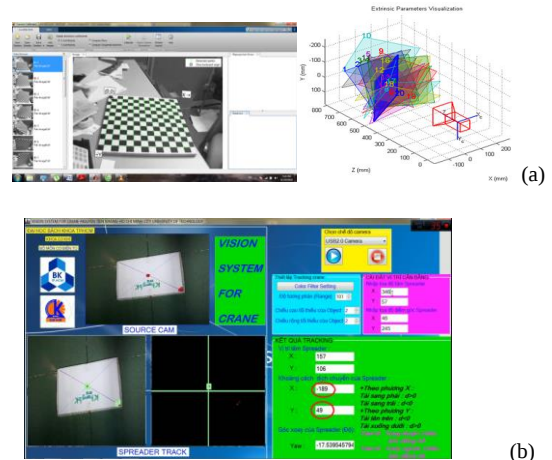
Hình 7. Kết quả mô phỏng với điều khiển PID cho bởi công thức (11).

#### 4.2 Mô phỏng

Trong thực nghiệm, một mô hình cầu trục được xây dựng như trong Hình 8 (a). Hình 8 (b) thể hiện hệ thống vision dùng cho thực nghiệm. Hình 9 (a) mô tả quá trình thực nghiệm nhằm thu được các ma trận và vector K, R, và T (xem (15)-(17)). Trong khi đó Hình 9 (b) cho kết quả của quá trình đo góc sử dụng camera.



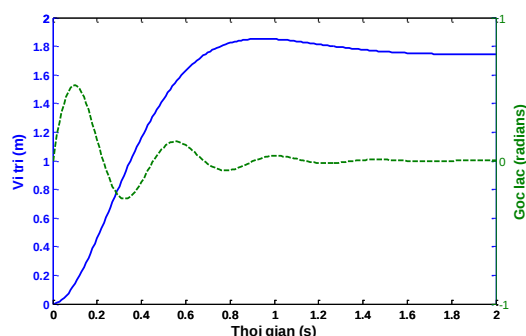
Hình 8. Hệ thống thực nghiệm.



Hình 9. Thực nghiệm đo góc sử dụng hệ thống camera: (a) Hiệu chỉnh các thông số trên camera; (b) Thực nghiệm xác định độ lệch của tải.

Bộ điều khiển kết hợp vị trí và khử lắc được thử nghiệm  $l = 0.5$  m với cùng hệ số điều khiển khi mô phỏng.

Kết quả đáp ứng cho trường hợp  $l = 0.3$  m được trình bày trong Hình 10. Có thể thấy rằng kết quả thực nghiệm đã chứng minh được tính hiệu quả của của giải pháp điều khiển khi hệ thống cầu trục di chuyển với vận tốc xấp xỉ 0.9 m/s nhưng dao động tối đa chỉ là 0.06 rad với thời gian để khử lắc là khoảng 10 giây.



Hình 10. Kết quả thực nghiệm với điều khiển PID cho bởi công thức (11).

Trong thực tế, việc bố trí các camera để đo được các dịch chuyển sẽ gặp phải các vấn đề sau đây: (i) Ở khoảng cách xa việc xác định điểm mốc để nhận dạng các dịch chuyển sẽ bị ảnh hưởng bởi các nhiễu ảnh; (ii) Camera có thể nhầm lẫn đối tượng cần bắt với các đối tượng khác; (iii) Sự khác biệt giữa tọa độ của camera và tọa độ của cần cẩu; và (iv) Trong điều kiện ban đêm hoặc ánh sáng không tốt (quá sáng hoặc quá tối) thì camera sẽ gặp rất nhiều khó khăn trong việc xác định được đối tượng. Trong phạm vi của nghiên cứu này, chúng tôi chưa giải quyết triệt để vấn đề ứng dụng trong điều kiện thực tế vì khó khăn trong kinh phí cũng như phối hợp các đơn vị ứng dụng. Chúng tôi sẽ tiếp tục những vấn đề nêu ra trong những nghiên cứu tiếp nối.

## 5 KẾT LUẬN.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã đề xuất một bộ điều khiển cho điều khiển vị trí và khử lắc cho cầu trục. Các điều khiển PID vị trí và bộ điều khiển PD cho khử dao động đã được thiết kế nhằm hướng tới triển khai ứng dụng trong thực tế vì độ tin cậy cũng như khả năng có thể triển khai được trong các phần cứng thông dụng trong công nghiệp với giá thành chấp nhận được. Một hệ thống vision và các giải thuật xử lý ảnh đã được thiết kế để xác định góc lệch của tải. Hệ thống camera đề xuất nhằm khắc phục khó khăn kỹ thuật khi không thể lắp các cảm biến vị trí thông thường trên các cầu trục container. Các mô phỏng đã được thực nghiệm để kiểm chứng tính hiệu quả của giải pháp điều khiển. Các thực nghiệm đã được tiến hành để kiểm chứng độ chính xác của camera. Thực nghiệm với các trường hợp chiều dài dây khác nhau đã minh họa được tính hiệu quả của bộ điều khiển.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Asariotis, H. Benamara, J. Hoffmann, A. Premti, R. Sanchez, V. Valentine, G. Wilms, "Review of Maritime Transport 2015", UNITED NATION, Geneva, 2015.
- [2]. S. T. T. Lam and H. T. N. Phan, "Bảo cáo ngành Logistics", FPT Securites, 2015.
- [3]. P. A. Ioannou, E. B. Kosmatopoulos, H. Jula, A. Collinge, C.-I. Liu, A. Asef-Vaziri, Ed Dougherty, "Cargo handling technologies final report", Center for Commercial Deployment of Transportation Technologies, University of Southern California, 2000.
- [4]. B. Balachandran, Y.-Y. Lee, "A mechanical filter concept for control of nonlinear crane-load oscillation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 228, No.3, pp. 651-682, 1999.
- [5]. D. Kim, W. Singhose, "Performance studies of human operators driving double-pendulum bridge cranes", *Control Engineering Practice*, Vol. 18, No. 3, pp. 567-576, 2010.
- [6]. K. C. C. Peng, W. Singhose, P. Bhaumik, "Using machine vision and hand-motion control to improve crane operator performance", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, Vol. 42, No. 6, pp. 1496-1503, 2012.
- [7]. Y. Fang, W. E. Dixon, D. M. Dawson, E. Zergeroglu, "Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, No. 3, pp. 418-423, 2003.
- [8]. Y.-S. Kim, H. Shim, H. Yoshihara, N. Fujioka, H. Kasahara, "A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes", *the Proceedings of Industry Applications Conference*, Salt Lake City, USA, 2003, pp. 262-269, 2003.
- [9]. C.-S. Kim, K.-S. Hong, K.-S., "Boundary control of container cranes the perspective of controlling an axially moving string system", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 437-445, 2009.
- [10]. D. 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, pp. 876- 883, 2009.
- [11]. N. Sun, Y. Fang, "Nonlinear tracking control of underactuated cranes with load transferring and lowering: Theory and experimentation", *Automatica*, Vol. 50, No. 9, pp. 2350-2357, 2014.
- [12]. Smart Crane Anti-Sway Crane, <http://www.smartcrane.com/SmartCrane/Welcome.html>.
- [13]. TMEIC, <https://www.tmeic.com/>
- [14]. Microview & LinZhi Image, <http://www.mvlz.com/>.
- [15]. H. Kawai, Y. B. Kim, Y. W. Choi, "Anti-sway system with image sensor for container cranes", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 10, pp. 2757-2765, 2009.
- [16]. P. Hyla, J. Szpytko, "Vision method for rope angle swing measurement for overhead travelling cranes – validation approach", *Activities of Transport Telematics*, Vol. 395, pp. 370-377, 2013.

- [17]. D. T. Ho, H. Nguyen, H. and Q. C. Nguyen, "Input shaping control of an overhead crane", *Proceedings of the 7th Vietnam Conference on Mechatronics*, Bien Hoa, Vietnam, 2014, pp. 303-311.
- [18]. Q. C. Nguyen, H. Q. Le, and K. S. Hong, "Improving control performance of a container crane using adaptive friction compensation", *Proceedings of the 14th International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Korea, Oct. 22-24, pp. 158-162, 2014.
- [19]. H. Kawai, Y. B. Kim, and Y. W. Choi, "Anti-sway system with image sensor for container cranes", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 2757-2765, 2009.
- [20]. Y. Yoshida and H. Tabata, "Visual feedback control of an overhead crane and its combination with time-optimal control", *Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, July 2-5, Xi'an, China, pp. 1114-1119, 2008.
- [21]. D. D. Doyle, A. L. Jennings, and J. T. Black, "Optical flow background estimation for real-time pan/tilt camera object tracking", *Measurement*, Vol. 48, pp. 195-207, 2014.
- [22]. L. Maddalena and A. Petrosino, "A self-organizing approach to background subtraction for visual surveillance applications", *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 17, No. 7, pp. 1168-1177, 2008.

**Nguyễn Quốc Chí** (BE'2002–MS'2006–PhD'2012) là giảng viên Trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh từ năm 2002, trưởng PTN Điều Khiển và Tự Động Hóa-Khoa Cơ Khí từ năm 2014. Tiến sĩ ngành Điều khiển thông minh và Tự động hóa năm 2012. Nghiên cứu sau tiến sĩ của chương trình Marie Curie FP7 tại Đại học Tel Aviv (Israel) 2012-2014. Lĩnh vực nghiên cứu bao gồm Robot công nghiệp, Điều khiển các hệ thống servo, Điều khiển các hệ thống mềm, Điều khiển các hệ thống cầu trục.

**Nguyễn Tiến Khang** (BE'2014) đã tốt nghiệp Trường Đại Học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh ngành Kỹ Thuật Cơ Điện Tử năm 2014. Hiện nay đang vận hành một doanh nghiệp gia đình.

# A vision anti-sway control algorithm for container cranes

**Nguyen Quoc Chi, Nguyen Tien Khang**

Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University – Ho Chi Minh City

**Abstract**— In this paper, a control scheme is proposed for an automated container crane. The proposed control scheme includes position control (for the trolley) and sway control algorithms (for the payload) where PID control is used for position control and PD control is assigned for sway control. The proposed control scheme employs the feedback signal of the sway angle, which is acquired by a vision system. The idea to employ the vision system is to overcome the difficulty in installing a conventional sensor system for measuring the sway angle. Numerical simulations and experiments have been carried out to verify the effectiveness of the proposed control scheme.

**Index Terms**— Container crane control, object tracking, sway suppression, port automation.