

# Điều Khiển Mờ cho Hệ Cản Trục 2D: Mô Phỏng và Thực Nghiệm

## Fuzzy Control for Gantry Crane 2D: Simulation and Experiment

Hoàng Lê Đức Minh, Phan Tấn Lực, Trần Quang Phi, Vũ Thành Trung, Trần Bảo Sơn, Nguyễn Minh Trình, Nguyễn Đăng Khanh, Nguyễn Long Thành, Lê Quang Huy, Nguyễn Việt Anh

Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Tp. Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: Hoàng Lê Đức Minh, E-mail: 17141105@student.hcmute.edu.vn

**Tóm tắt:** Hệ cản trục 2D hay “gantry crane” là hệ một vào nhiều ra (SIMO-single input multi output) được sử dụng nhiều trong cả thực tế và trong học thuật. Với một hệ thống không có thông số mô hình cụ thể như đối tượng này, nhóm tác giả tiến hành xây dựng và áp dụng giải thuật điều khiển mờ như một giải pháp khả dĩ cho đối tượng chưa rõ thông số và có cấu trúc SIMO. Bên cạnh việc phân tích vì sao bộ điều khiển (BĐK) mờ là phù hợp cho đối tượng này so với các BĐK khác, nhóm tác giả cũng chứng minh tính khả thi của giải thuật này trên mô phỏng Matlab/ Simulink. Bên cạnh đó, chúng tôi tiến hành xây dựng một mô hình thực nghiệm cản trục 2D thông qua board điều khiển STM32F4. Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy sự hiệu quả của giải thuật mờ. Các quy luật về tinh chỉnh mờ cũng được nhóm tác giả khảo sát dựa trên mô hình này.

**Từ khóa :** điều khiển mờ; hệ cản trục 2D; hệ thống SIMO; STM32F4

**Abstract:** 2D crane or gantry crane is a SIMO system which is commonly applied in both reality and academy. With a model which has un-known system parameters, we build and apply a fuzzy controller as a solution for this model, which has unknown system parameters and SIMO structure. Beside analysis on the need of using fuzzy controller instead of other controllers, we prove the ability of this algorithm on Matlab/Simulink. Moreover, we build an experimental model of 2D crane through control board STM32F4. Experimental results also show the effectiveness of fuzzy algorithm. Rules of calibration fuzzy controllers are examined on this model.

**Keywords:** 2D-crane 2D; fuzzy control; SIMO system; STM32F4

### 1. Đặt vấn đề

Cản trục 2D được ứng dụng trong thực tế rất rộng rãi, đặc biệt là trong vận chuyển hàng hóa ở các bến tàu cảng (Hình 1). Do đó, bài toán điều khiển vị trí và chống dao động tải cho đối tượng này mang tính hàn lâm và thực tế cao. Giải thuật kinh điển PID đã được thực hiện thành công ở mô hình này [1]. Tuy vậy, việc tinh chỉnh thông số PID khi điều khiển mô hình này là rất khó khăn. Điều này là do bộ điều khiển PID vốn có

cấu trúc SISO nên khi được đem áp dụng cho hệ MIMO under-actuated như hệ cản trục 2D thì được ghép nối thành các khối PID khác nhau. Điều này làm cho việc tinh chỉnh PID trở nên khó khăn. Ở nghiên cứu [2], các giải thuật LQR và trượt được thực hiện trên đối tượng cản trục 2D. Tuy nhiên, các kết quả chỉ được thực hiện trên mô phỏng. Ngoài ra, các giải thuật LQR và trượt là những giải thuật được thiết kế dựa trên phương trình toán học chính xác của hệ thống. Bên cạnh đó, để các giải thuật

trên được thiết kế thành công, các thông số mô hình hệ thống cũng phải được xác định chính xác. Điều này là rất khó khăn trong việc vận hành mô hình thực nghiệm.

Trong việc điều khiển cần trục thực tế, kinh nghiệm của người vận hành đóng một vai trò rất quan trọng. Điều này phù hợp với việc áp dụng BDK mờ (fuzzy control – FC). Đây là giải thuật điều khiển áp dụng kỹ thuật thông minh để bắt chước hoạt động của một chuyên gia. Ở tài liệu [3], [4], một số tác giả đã thực hiện việc kết nối hai khối điều khiển mờ đơn giản để tránh việc tạo ra một khối mờ quá lớn. Nhóm tác giả trên đã điều khiển thành công đối tượng cần trục 2D trên mô phỏng nhưng chưa có kết quả thực nghiệm nào được trình bày trong nghiên cứu đó. Do đó, kết quả bài báo trên chỉ mang tính lý thuyết.

Trong bài báo này, chúng tôi dựa vào ý tưởng kết nối các BDK mờ ở tài liệu [3]. Tuy nhiên, thay vì sử dụng hàm liên thuộc gồm 5 hàm ở mỗi biến trạng thái thì chúng tôi chỉ áp dụng 3 hàm liên thuộc. Từ đó, các BDK mờ được áp dụng cho cần trục 2D cũng đơn giản hơn. Từ đó, bên cạnh việc vẫn thực hiện được điều khiển đối tượng trên ở mô phỏng, nhóm cũng áp dụng thành công trên mô hình thực để tạo kết quả thực nghiệm so với chỉ ở lý thuyết ở tài liệu [3].

## 2. Mô hình hóa hệ thống cần trục

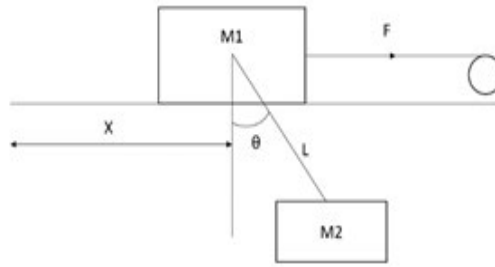
Mô hình gồm 1 thiết bị di chuyển trên thanh ngang. Trên thiết bị này, một dây treo tải được sử dụng để nâng/hạ tải

(Hình 1). Thiết bị này di chuyển qua lại trên thanh để vận chuyển tải từ vị trí này sang vị trí khác. Như vậy, tín hiệu điều khiển là tín hiệu điện áp cấp cho động cơ để thiết bị di chuyển. Ngõ ra cần điều khiển là vị trí thiết bị đó (cũng là vị trí tải). Nếu việc ổn định sao cho dao động tải là ít nhất và khi tải đến đúng vị trí cần nâng/hạ thì dao động dây treo hoặc thiết bị treo trở về 0 thì hệ trở thành một hệ SIMO. Như vậy, ta có thể xấp xỉ hệ như một hệ con lắc [5]. Nhưng, khác với con lắc ngược (inverted pendulum - IP) trên xe, trong hệ cần trục 2D, dây treo tải và tải lại hướng xuống so với con lắc ngược hướng lên. Do đó, các giải thuật đã áp dụng cho hệ IP hoàn toàn có thể áp dụng được cho hệ cần trục 2D.



**Hình 1.** Cần trục 2D trong công nghiệp

Ở Hình 2, hệ cần trục 2D là hệ thống có xe (m1) được nối với tải (m2) thông qua sợi dây có chiều dài (L). Xe được tác động lực F theo hướng bên phải được nối vào động cơ. Khi động cơ xoay sẽ kéo hoặc đẩy xe (M1) làm xe di chuyển đột ngột tạo ra sự chênh lệch góc  $\theta$  giữ M2 so với phương thẳng đứng.



**Hình 2.** Mô hình toán hệ cần trục 2D

Theo sự chuyển đổi của hệ IP trên xe [5], hệ phương trình động lực học của hệ cần trục 2D được viết như sau :

$$\ddot{x} = \frac{F - B\dot{x} - m_2(-l\sin(\theta)\ddot{\theta} + \dot{x} + l\cos(\theta)\dot{\theta})}{m_1 + m_2} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-glm_2 \sin(\theta) - lm_2\dot{x}\cos(\theta)}{I + l^2m_2} \quad (2)$$

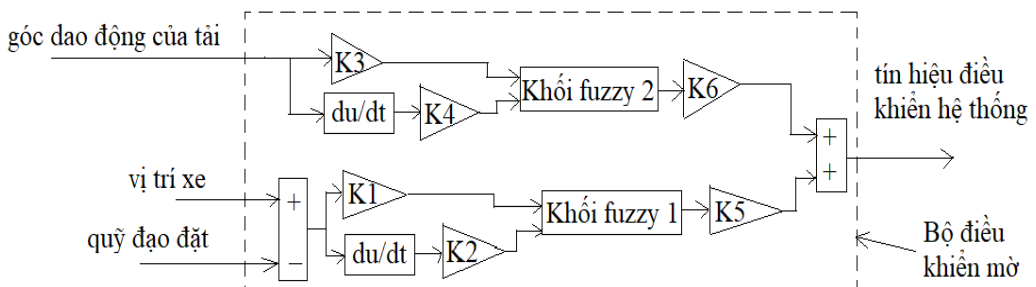
Trong đó:  $\theta$  là góc lệch của tải so với phương thẳng đứng (rad);  $x(t)$  là vị trí của xe (m);  $m_1$  là khối lượng của xe (kg);  $m_2$  là khối lượng của tải (kg);  $l$  là độ dài sợi dây (m);  $g$  là gia tốc trọng trường (m/s<sup>2</sup>);  $F$  là lực tác động do động cơ tạo ra (Nm).

**Bảng 1.** Thông số của hệ thống

Kí hiệu	Giá trị	Mô tả	
$m_1$	1	Khối lượng của xe	kg
$m_2$	0.2	Khối lượng tải	kg
$l$	0.2	Chiều dài đoạn nối từ xe đến vật	m
$I$	0.00072	Moment quán tính	kg.m <sup>2</sup>
$g$	9.81	Gia tốc trọng trường	m/s <sup>2</sup>
$B$	0.63	Hệ số ma sát xe	N/m/s

### 3. Mô hình hóa hệ thống cần trục

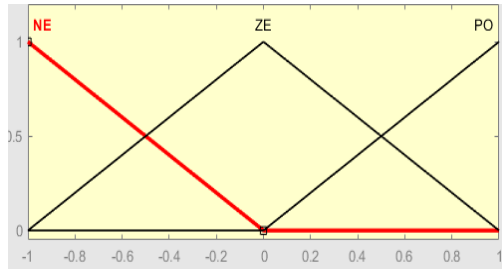
Cấu trúc điều khiển mờ áp dụng cho hệ thống được thể hiện ở Hình 3.



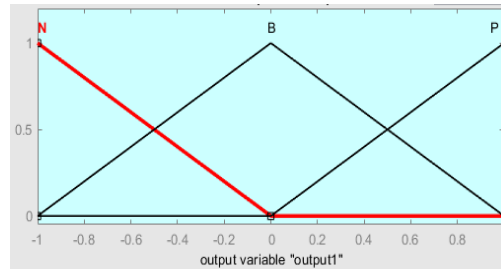
**Hình 3.** Cấu trúc điều khiển mờ cho hệ cần trục 2D

Thiết lập hai khối Fuzzy dùng để điều khiển góc và vị trí. Các khối fuzzy có ngõ vào và ngõ ra từ -1 đến 1, trước đó sẽ được nhân với hệ số tiền và hậu xử lý để làm cho hệ thống ổn định. Các khối tiền xử lý và hậu xử lý ở Hình 3 được chọn thông qua thử sai để được bộ thông

số điều khiển phù hợp. Việc chọn tiền xử lý, hậu xử lý và các luật mờ tương ứng với kinh nghiệm chuyên gia trong việc thiết kế BDK mờ. Cách lựa chọn luật mờ được chúng tôi lựa chọn dựa vào kinh nghiệm điều khiển và thể hiện ở Bảng 2 và 3.



**Hình 4.** Hàm liên thuộc ngõ vào (đã được chuẩn hóa)



**Hình 1.** Hàm liên thuộc ngõ ra (đã được chuẩn hóa)

**Bảng 2.** Luật mờ Fuzzy góc

STT	$\theta$	$\Delta\theta$	u
1	NE	NE	P
2	ZE	NE	P
3	PO	NE	B
4	NE	ZE	B
5	ZE	ZE	B
6	PO	ZE	B
7	NE	PO	B
8	ZE	PO	N
9	PO	PO	N

**Bảng 3.** Luật mờ Fuzzy vị trí

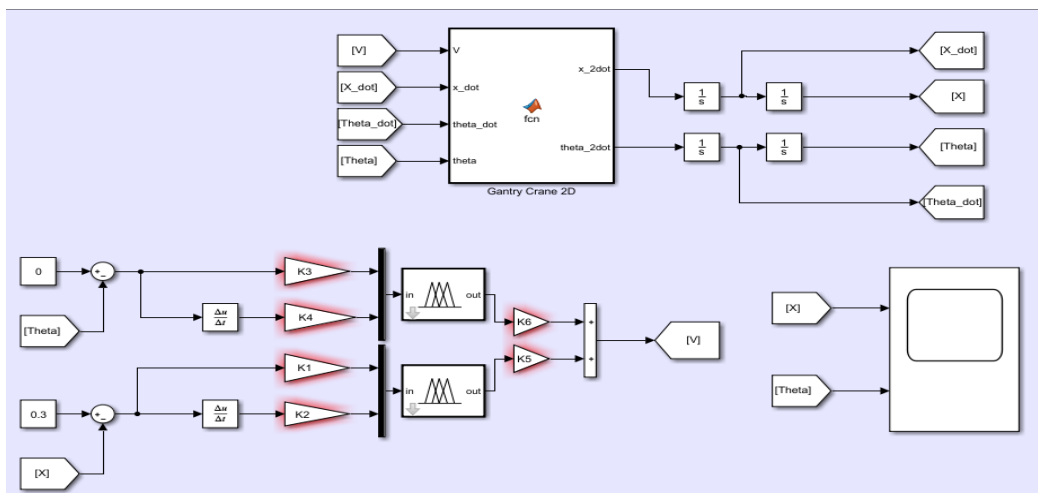
STT	x	$\Delta x$	u
1	NE	NE	B
2	ZE	NE	B
3	PO	NE	P
4	NE	ZE	N
5	ZE	ZE	B
6	PO	ZE	P
7	NE	PO	N
8	ZE	PO	B
9	PO	PO	B

#### 4. Mô phỏng

Ta đặt các biến trạng thái như sau:

$$x_1 = x; x_2 = \dot{x}; x_3 = \theta; x_4 = \dot{\theta} \quad (3)$$

Ở mô phỏng, tín hiệu điều khiển được chọn là lực tác động vào xe. Chúng tôi chỉ áp dụng hệ phương trình trạng thái (1), (2) để thể hiện hệ cần trục 2D trên mô phỏng. Ta có thông số mô hình được chọn ở Bảng 1.



**Hình 6.** Mô phỏng Fuzzy trên Matlab/Simulink hệ cần trục 2D

Các thông số tiền xử lý và hậu xử lý được chọn thông qua phương pháp thử sai (trial-and-error tests) như sau:

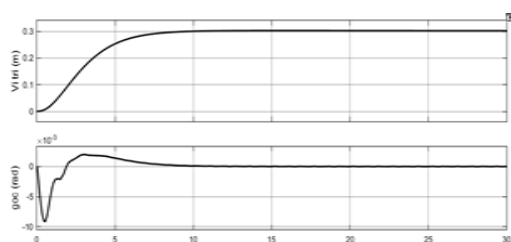
$$\begin{aligned} K1=2.8; K2=10; K3=50; \\ K4=20; K5=5; K6=8 \end{aligned} \quad (4)$$

Giá trị vị trí đặt được chọn là 30cm

Trường hợp 1: Cho giá trị ban đầu của biến trạng thái hệ thống là

$$x1 = 0; x2 = 0; x3 = 0; x4 = 0 \quad (5)$$

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 7.



**Hình 7.** Kết quả mô phỏng với biến trạng thái ban đầu ở (5)

Thời gian xác lập của xe : 7.5 s

Thời gian xác lập của tải : 8.2 s

Sai số xác lập của xe : 0.4 cm

Sai số xác lập của tải : 0.00002 rad

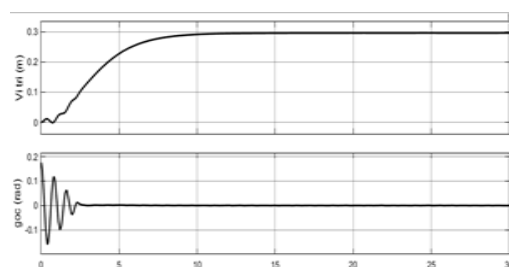
Nhận xét: ta nhận thấy BDK mờ đã điều khiển thành công hệ cần trục với vị trí xe đã di chuyển đến giá trị mong muốn (nhưng vẫn còn khuyết điểm là tồn tại

sai số xác lập là 0.4 cm) sau tầm 8 giây. Góc dao động của tải cũng được triệt tiêu sau tầm 8 giây.

Trường hợp 2: Nếu chọn giá trị biến trạng thái ban đầu khác đi và tải lệch đi so với vị trí thẳng đứng, ta chọn

$$x1 = 0; x2 = 0; x3 = \pi/18; x4 = 0 \quad (5)$$

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 8.



**Hình 8.** Kết quả mô phỏng với biến trạng thái ban đầu ở (6)

Thời gian xác lập của xe : 9.8 s

Thời gian xác lập của tải : 3.2 s

Sai số xác lập của xe : 0.38 cm

Sai số xác lập của tải : 0.0001 rad

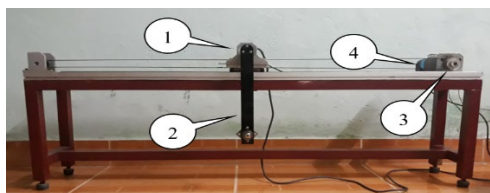
Nhận xét: Ta thấy, với giá trị ban đầu khác đi nhiều, BDK mờ vẫn cho kết quả điều khiển ổn định được hệ thống. Tuy nhiên, sai số xác lập của xe vẫn chưa được cải thiện.

## 5. Thực nghiệm

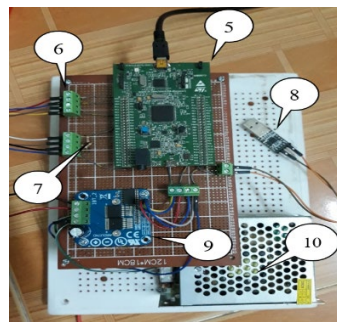
### 5.1. Mô hình thực nghiệm

Trong nghiên cứu [6], một khảo sát so sánh giữa 2 giải thuật PID và fuzzy đã được thực hiện trên cả mô phỏng và thực nghiệm và đều cho kết quả điều khiển thành công trên mô hình cần trục 2D. Tuy nhiên, BDK được xây dựng trong các mô hình này đều dựa trên DSP TMS320F28335 có giá thành cao (trên 5 triệu VND) và không còn được Windows hỗ trợ (do vi xử lý này phải sử dụng trên chip 32 bit trong khi hiện nay, chỉ có chip 64 bit hoạt động). Do đó, việc khảo sát các giải thuật trên ở các vi xử lý rẻ tiền hơn, thông dụng cho học đường hơn là cần thiết và cần được phát triển. Do đó, ở phần thực nghiệm này, chúng tôi sử dụng board STM32F4 để vừa tận dụng được sự hỗ trợ của Matlab/Simulink, vừa đạt được tốc độ xử lý cao ở mức chấp nhận được

Để kiểm chứng kết quả mô phỏng, chúng tôi xây dựng mô hình thực nghiệm như ở Hình 9 và Hình 10. Tín hiệu điều khiển được chọn là điện áp cấp cho động cơ vì thông số mô hình là không xác định chính xác được.



**Hình 9.** Phần cơ khí của mô hình



**Hình 10.** Phần điện của mô hình

Giải thích các khối trong Hình 9 và Hình 10.

1. Thành phần xe của hệ
2. Thành phần tải của hệ và rotary encoder
3. Động cơ NISCA
4. Rotary encoder 1
5. Vi điều khiển STM32F4
6. Cổng kết nối Encoder1
7. Cổng kết nối Encoder2
8. CP2102
9. Cầu H arduino IBT-2
10. Nguồn tổ ong 12V

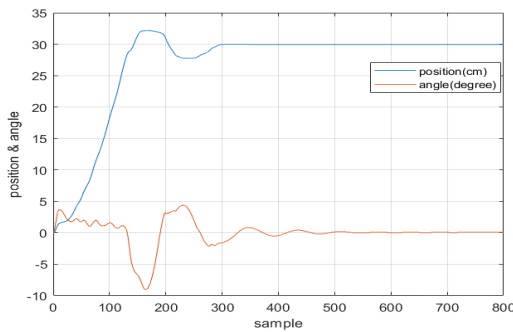
### 5.2. Kết quả thực nghiệm

Thí nghiệm (TN) 1: Các thông số tiền xử lý và hậu xử lý được lựa chọn thông qua phương pháp thử sai như sau:

$$\begin{aligned} K1=0.35; K2=0.01; K3=0.4; \\ K4=0.01; K5=60; K6=40 \end{aligned} \quad (6)$$

và vị trí đặt 30cm

Với thông số điều khiển ở (7), các kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 11 và Hình 12.



**Hình 11.** Kết quả TN1

Thời gian xác lập của xe: 3 s

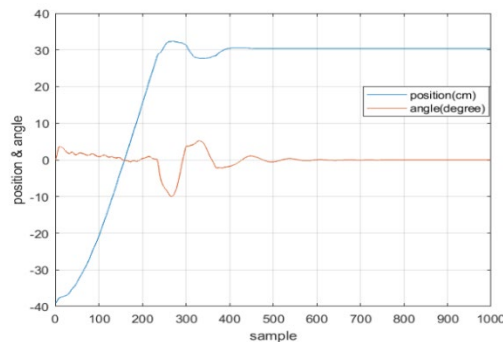
Thời gian xác lập của tải: 4.8 s

Sai số xác lập của xe: 0.04 cm

Sai số xác lập của tải: 0.09 độ

Nhận xét: BDK mờ với thông số tiền/hậu xử lí ở (7) đã điều khiển thành công đối tượng cần trục trên thực nghiệm. Như vậy, bước đầu, việc áp dụng giải thuật trên ở thực nghiệm là phù hợp để thực hiện các khảo sát kế tiếp

TN 2: thông số điều khiển ở (7) vẫn được sử dụng nhưng ta chọn vị trí ban đầu -39 cm và vị trí đặt 30cm.



**Hình 12.** Kết quả TN2

Thời gian xác lập của xe: 3.8 s

Thời gian xác lập của tải: 5.6 s

Sai số xác lập của xe: 0.4 cm

Sai số xác lập của tải: 0.09 rad

Nhận xét: Khi chọn vị trí ban đầu rất xa giá trị đặt, BDK mờ vẫn đảm bảo việc điều khiển thành công. Thời gian xác lập

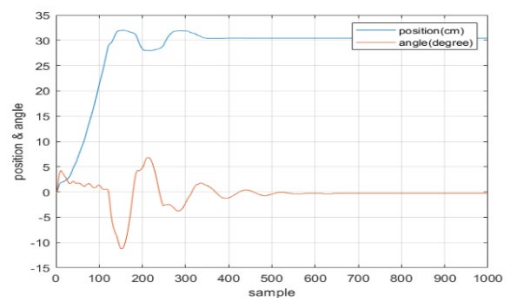
là dài hơn so với ở thí nghiệm 1. Như vậy, khoảng hoạt động của BDK mờ được xác định là rộng, phù hợp cho các thí nghiệm tiếp theo về kiểm chứng thông số điều khiển.

TN 3: Ta tiến hành tăng thông số K1 so với thí nghiệm 1, các thông số điều khiển khác được giữ nguyên

$$K1=0.4; K2=0.01; K3=0.4; \quad (7)$$

$$K4=0.01; K5=60; K6=40$$

và vị trí đặt 30cm như ở thí nghiệm 1. Ta có kết quả thực nghiệm ở Hình 13.



**Hình 13.** Kết quả TN3

Thời gian xác lập của xe: 3.5 s

Thời gian xác lập của tải: 5.2 s

Sai số xác lập của xe: 0.04 cm

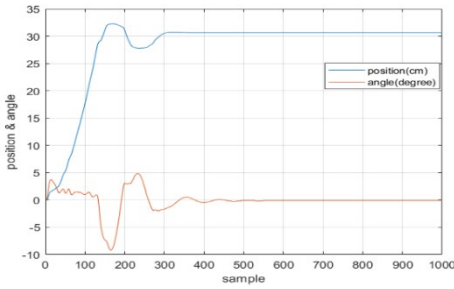
Sai số xác lập của tải: 0.27 độ

Nhận xét: Với K1 tăng quá mức, tương ứng với việc chú trọng quá mức vào vị trí xe thì đã gây ra dao động đối với hệ thống. Thời gian xác lập ở TN3 là lớn hơn đáng kể so với TN1. Sai số xác lập vị trí xe là không đổi nhưng sai số xác lập của góc tải là lớn hơn. Như vậy, việc hiệu chỉnh K1 tăng lớn là khá nhạy cảm, dễ làm hệ thống kém chất lượng hơn dù chủ đích là muốn điều khiển tốt hơn vị trí xe.

**TN 4:** Với thông số điều khiển có K3 giảm so với thí nghiệm 1, các thông số khác được giữ nguyên như sau

$$\begin{aligned} K1=0.35; K2=0.01; K3=0.45; \\ K4=0.01; K5=60; K6=40 \end{aligned} \quad (8)$$

và vị trí đặt 30cm như ở TN 1, ta có kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 14.



**Hình 14.** Kết quả TN 4

Thời gian xác lập của xe: 3 s

Thời gian xác lập của tải: 5 s

Sai số xác lập của xe: 0.64 cm

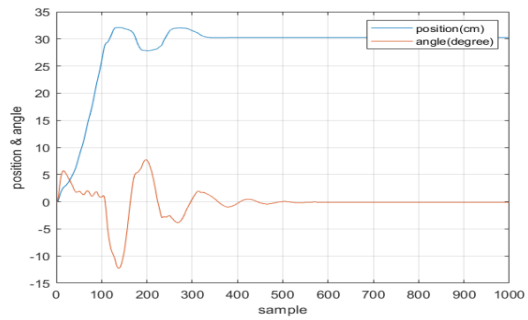
Sai số xác lập của tải: 0.09 độ

**Nhận xét:** với việc giảm K3, tương ứng với việc ít quan tâm đến dao động của tải, kết quả cho thấy thời gian xác lập của vị trí không thay đổi so với TN1. Tuy nhiên, thời gian xác lập của tải có dài hơn. Như vậy, việc ít quan tâm đến dao động của tải có gây ảnh hưởng xấu là làm thời gian xác lập tải có dài hơn.

**TN5:** Với thông số K5 được giảm so với ở TN1, các thông số khác giữ nguyên, các thông số điều khiển được chọn là

$$\begin{aligned} K1=0.35; K2=0.01; K3=0.4; \\ K4=0.01; K5=70; K6=40 \end{aligned} \quad (9)$$

và vị trí đặt 30cm, kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 15.



**Hình 15.** Kết quả TN5

Thời gian xác lập của xe: 3.4 s

Thời gian xác lập của tải: 5 s

Sai số xác lập của xe: 0.24 cm

Sai số xác lập của tải: 0.09 rad

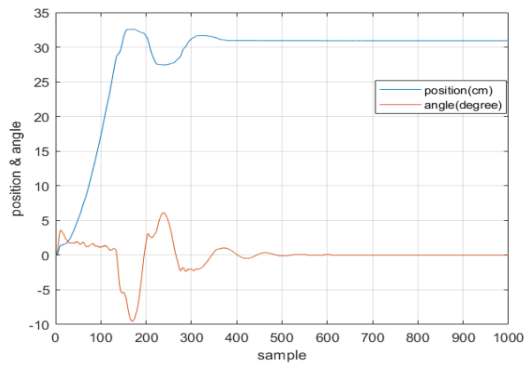
**Nhận xét:** Khi K5 bị giảm so với TN1, tương ứng với tín hiệu điều khiển của động cơ điều khiển xe ít được quan tâm, ta nhận thấy sai số xác lập của xe là nhiều hơn hẳn (so với TN1). Đồng thời, thời gian xác lập của vị trí xe cũng dài hơn. Do xe chưa ổn định nên góc tải cũng không được điều khiển tốt với thời gian xác lập của tải tương ứng cũng bị kéo dài. Điều này cho thấy việc điều khiển xe là quan trọng vượt trội so với việc điều khiển dao động tải. Khi điều khiển, việc ổn định vị trí xe nên được đặt trọng tâm cao hơn việc điều khiển dao động tải. Tuy nhiên, với một bộ thông số FC phù hợp cho vị trí xe thì thông số BDK mờ cho tải nên được quan tâm (khi so sánh việc chỉnh K3 ở TN4).

**TN6:** Với K6 được tăng so với ở TN1, các thông số điều khiển được giữ nguyên như sau

$$\begin{aligned} K1=0.35; K2=0.01; K3=0.4; \\ K4=0.01; K5=60; K6=50 \end{aligned} \quad (10)$$

và vị trí đặt 30cm (giống TN1), ta có kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 16.





**Hình 16.** Kết quả TN6

Thời gian xác lập của xe : 3.8 s

Thời gian xác lập của tải : 5.1 s

Sai số xác lập của xe : 0.9 cm

Sai số xác lập của tải : 0.09 rad

**Nhận xét:** Khi K6 được tăng so với TN1, tương ứng với việc hậu xử lý điều khiển ngõ ra chống dao động tải được quan tâm, thời gian xác lập và sai số xác lập của vị trí xe bị kéo dài ra (so với TN1). Điều này là phù hợp với lý thuyết khi việc tăng cường điều khiển biến trạng thái này là việc giảm điều khiển tương biến trạng thái khác. Tuy nhiên, việc tăng trọng tâm điều khiển tải cũng không làm tốt hơn thời gian xác lập của tải.

### 5.3. Nhận xét

Thông qua thực nghiệm, BDK mờ mà nhóm tác giả thiết kế đã điều khiển thành công mô hình cần trục 2D. Tuy nhiên, việc lựa chọn thông số điều khiển vẫn còn phải dựa vào thử sai. Việc hiệu chỉnh thông số mờ vẫn còn chịu ảnh hưởng qua lại lẫn nhau giữa các biến trạng thái. Thông qua quá trình thực nghiệm, việc hiệu chỉnh điều khiển vị trí xe là quan trọng hơn so với hiệu chỉnh chất lượng của góc tải.

## 6. Kết luận

Thông qua bài báo, nhóm tác giả đã đề nghị một phương pháp điều khiển mờ kết hợp gồm hai bộ mờ nhỏ để điều khiển riêng biệt góc dao động của tải và vị trí xe thay vì dùng 81 luật như ở [6]. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, BDK mờ được sử dụng trong bài báo hoạt động thành công trong việc điều khiển vị trí xe và chống dao động tải cho hệ thống trên. Tuy nhiên, việc hiệu chỉnh thông số điều khiển vẫn còn gặp khó khăn cho việc ảnh hưởng qua lại giữa các biến trạng thái nên phương pháp thử sai vẫn là phương pháp chính trong bài báo này. Thông qua kết quả thực nghiệm, việc điều khiển đối tượng cần trục 2D, vị trí xe là quan trọng hơn tải. Do đó, thông số điều khiển mờ nên được chú tâm hơn so với điều khiển chống dao động tải.

### Lời cảm ơn

Nhóm nghiên cứu xin chân thành gửi lời cảm ơn đến TS. Nguyễn Văn Đông Hải (email: hainvd@hcmute.edu.vn, phòng TN Điều khiển tự động –C205, Khoa Điện-điện tử, Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM) đã hỗ trợ thiết bị, nơi làm việc, hướng dẫn lý thuyết, chỉnh sửa bài báo khoa học để nhóm nghiên cứu hoàn thành được công trình này.

### Tài liệu tham khảo

- [1] Hussien, S. Y. S., Jaafar, H. I., Ghazali, R., and Razif, N. R. A., “The Effects of Auto-Tuned Method in PID and PD Control Scheme for Gantry Crane System”, *International Journal of Soft*

- Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-4 Issue-6, 6: 121-125, 2015.
- [2] Stefan Bruins, “Comparison of Different Control Algorithms for a Gantry Crane System”. Journal of Intelligent Control and Automation, pp. 68-81, 2010.
- [3] Chengyuan Chang, Shiwei Hsu, Kuohung Chiang, “A practical fuzzy controllers scheme of overhead crane”, Volum 3, Issue 3, pp 266-270, Journal of Control Theory and Applications, 2005.
- [4] Lifu Wang, Hongbo Zhang, Zhi Kong, “Anti-swing Control of Overhead Crane Based on Double Fuzzy Controllers”, The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015-CCDC), pp. 981-986, 2015.
- [5] Huỳnh Thái Hoàng, “Hệ thống điều khiển thông minh”, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TP.HCM, 2014.
- [6] Nguyen Van Dong Hai, Nguyen Thien Van, Nguyen Minh Tam, “Ứng dụng giải thuật mờ và PID trong điều khiển cần trục”. Journal of Technical Education Science No.44A, 2017.

**Ngày nhận bài: 24/1/2023**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 21/3/2023**

**Ngày chấp nhận đăng: 24/3/2023**