

Điều Khiển Mờ cho Hệ Con Lắc Ngược Dẻo trên Xe

Development of a Fuzzy Controller for Flexible Inverted Pendulum on Cart

Lê Thị Hồng Lam* , Lê Trọng Thái Dương, Nguyễn Nhật Tiến, Nguyễn Văn Nguyên Khoa, Nguyễn Hiếu Nghĩa, Võ Thành Đạt, Lê Minh Nhật, Nguyễn Khắc Hoàng Giang, Lưu Duy Thịnh, Lê Đức Trung

Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TPHCM

* lamth@hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài:
14/12/2023

Ngày chấp nhận đăng:
03/3/2024

Keywords: Flexible inverted pendulum, Fuzzy control, stable control, anti-fluctuation.

ABSTRACT

IPC is a popular model in control engineering. However, this system is mainly researched based on the idea that links are completely solid. In this study, a new IPC is presented with flexible pendulum – FIPC and a fuzzy 81-rule algorithm, which is only used for SIMO systems, is applied to this model to control position of cart and do anti-fluctuation of pendulum. Hopefully, our results can support the experimental research of SIMO systems with elastic components in laboratory and widen this direction of study in professional field.

TÓM TẮT

Hệ thống con lắc ngược trên xe (Inverted Pendulum on Cart – IPC) là một hệ thống thông dụng trong điều khiển tự động (ĐKTĐ). Tuy nhiên, việc nghiên cứu khảo sát chủ yếu đối với các khớp là cứng hoàn toàn. Trong nghiên cứu này, một mô hình IPC mới được giới thiệu nhưng với con lắc là thành phần dẻo – hệ thống con lắc ngược dẻo trên xe (flexible IPC - FIPC). Trong nghiên cứu này, một giải thuật mờ 81-luật vốn chỉ được áp dụng cho đối tượng một vào nhiều ra (single input- multi output – SIMO) được ứng dụng cho hệ trên để ổn định vị trí xe tại chỗ và giảm được dao động cho con lắc trên thực nghiệm. Thông qua bài báo này, kết quả nghiên cứu góp phần hỗ trợ cho việc điều khiển thực nghiệm đối tượng SIMO có thành dẻo trong phòng thí nghiệm (PTN), mở rộng hơn hướng nghiên cứu này của chuyên ngành.

Từ khóa: Con lắc ngược dẻo, điều khiển mờ, điều khiển cân bằng, chống dao động.

1. Giới thiệu

IPC hay còn gọi là hệ cart and pole (C&P) là một đối tượng kinh điển trong ĐKTĐ (J. Aracil et al, 2011). Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan đều nằm trong phạm vi giới hạn các thành phần mô hình đều là dạng khớp cứng. Trong thực tế, ngay cả các robot có khớp cứng nhất cũng có độ biến dạng nhất định trong quá trình vận hành mà ta đã bỏ qua. Robot có cấu trúc dẻo là một vấn đề đang rất được quan tâm (A. Jemima et al, 2020). Ứng

dụng dạng robot này rất rộng như: thám hiểm, phẫu thuật, thao tác chi tiết... (H. Hauser, 2023). Tuy vậy, cấu trúc robot dẻo nhiều khớp như vậy là rất phức tạp trong chế tạo. Nó phù hợp với những phòng thí nghiệm (PTN) chuyên dụng. Một hướng đi khác là đơn giản hóa hệ robot dẻo này về dạng quen thuộc, kết hợp với IPC trong nghiên cứu là tạo ra hệ FIPC. Trong hệ mới này, thành phần dẻo chính là con lắc ngược, đã được gắn chốt với xe. Việc điều khiển vị trí xe sao cho ở vị trí mong

muốn được kết hợp với việc điều khiển làm sao cho sự dao động của con lắc đèo được dập tắt nhanh nhất. Trong nghiên cứu (Tang Jiali et al, 2009), cấu trúc FIPC được đề cập. Tuy nhiên, hệ phương trình toán trong mô hình này là rất phức tạp và giải thuật điều khiển không được trình bày. Ngoài ra, trong nghiên cứu trên, kết quả thực nghiệm là không được đề cập đến. Một cách thức đơn giản hóa hệ con lắc ngược đèo được đề cập tới ở nghiên cứu (Nguyễn Minh Tâm và cộng sự, 2020). Trong nghiên cứu trên, một xấp xỉ tương đối góc lệch con lắc ngược đèo về 2 biến trạng thái. Như vậy, với 2 biến trạng thái mới lần lượt mô tả đỉnh của con lắc và góc lệch của đoạn giữa, quá trình chuyển động của con lắc đèo vẫn được mô tả chính xác. Điều này được thể hiện thông qua kết quả thực nghiệm được trình bày ở chính tài liệu trên với giải thuật thông dụng là PID. Một nghiên cứu khác (Trần Ngọc Sơn và cộng sự, 2019), cũng trên mô hình này, giải thuật LQR được điều khiển thành công trên cả mô phỏng và thực nghiệm. Giải thuật LQR là một giải thuật được thiết kế đảm bảo bởi toán học nên việc giải thuật này được thực hiện thành công trên FIPC đã chứng minh sự phù hợp của việc quy đổi mô hình con lắc ngược đèo về dạng xấp xỉ như ở (Nguyễn Minh Tâm và cộng sự, 2020). Với cách thức chuẩn hóa mô hình toán như ở tài liệu (Trần Ngọc Sơn và cộng sự, 2019) và (Nguyễn Minh Tâm và cộng sự, 2020), các giải thuật tuyến tính như LQR và PID đã được thử nghiệm thành công. Tuy vậy, đây là các giải thuật tuyến tính có cấu trúc đơn giản nên việc áp dụng cho các trường hợp đối tượng chưa biết trước mô hình hoặc có cấu trúc phức tạp sẽ không còn phù hợp. Do đó, việc thử nghiệm giải thuật điều khiển có cấu trúc phức tạp hơn như điều khiển phi tuyến hoặc điều khiển thông minh (ĐKTM) là cần thiết. Việc nghiên cứu các giải thuật mới trên đối tượng FIPC là một bước chuẩn bị nền tảng để phát triển các giải thuật phức tạp hơn cho hệ robot đèo.

Giải thuật mờ là dạng ĐKTM phổ biến nhất, dựa vào kinh nghiệm chuyên gia để điều khiển một hệ thống hộp xám hoặc hộp đen. Có nhiều cấu trúc mờ khác nhau, tùy thuộc cách thức quy định ngõ vào/ra và không gian điều khiển của đối tượng. Ở tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2003), một cấu trúc mờ 81-luật được giới thiệu đã áp dụng thành công cho IPC – một đối tượng một vào – nhiều ra (single input multi-out put – SIMO) hai bậc. Cấu trúc này đã trở thành kinh điển và tiếp tục

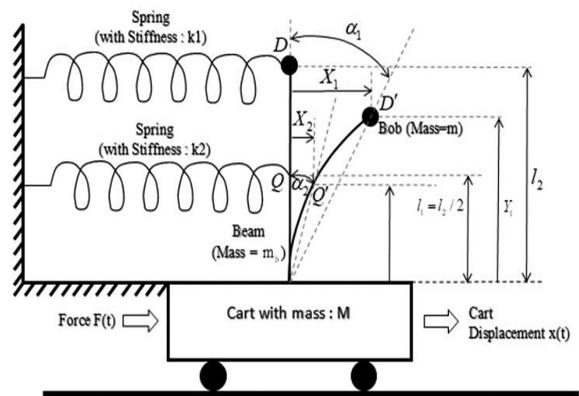
được điều khiển thành công cho các hệ SIMO bậc hai khác như con lắc ngược quay (Lê Thị Thanh Hoàng và cộng sự, 2020), cần trục 2D (Nguyễn Văn Đông Hải và cộng sự, 2017),... Cấu trúc mờ đó vẫn được tiếp tục áp dụng cho đối tượng cần trục tháp và đã được thực nghiệm thành công ở nghiên cứu (Nguyễn Văn Đông Hải và cộng sự, 2022). Tuy vậy, trong các hệ thống trên đều là các hệ thống có khớp cứng, hoàn toàn không có thành phần đèo. Do đó, việc áp dụng thành công cấu trúc mờ cơ bản ở tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2003) cơ bản cho đối tượng FIPC là mới và chưa được thực hiện trước đó.

Trong bài báo này, nhóm tác giả giới thiệu một cấu trúc FIPC thực nghiệm và tiến hành áp dụng giải thuật mờ cơ bản vốn chỉ được áp dụng cho hệ SIMO hai bậc gồm chỉ các khớp cứng ở nghiên cứu (Huỳnh Thái Hoàng, 2003) để áp dụng cho đối tượng FIPC thực nghiệm này. Thông qua việc điều khiển thực nghiệm thành công, các khảo sát về sự thay đổi các khối tiền xử lý và hậu xử lý được thực hiện để xác nhận các lý thuyết hiệu chỉnh là phù hợp với tinh chỉnh tiền và hậu xử lý theo lý thuyết.

2. Mô tả toán học

Trong các nghiên cứu (Nguyễn Minh Tâm và cộng sự, 2020) và (Trần Ngọc Sơn và cộng sự, 2019), mô tả toán học của FIPC được thể hiện ở Hình 1. Các công thức toán học mô tả hệ thống được thể hiện ở (1)-(3).

Hình 1. Mô tả toán học của FIPC



$$\begin{aligned}
 ml_2^2 \ddot{\alpha}_1 + ml_2 \ddot{x} \cos \alpha_1 + ml_2 l_1 \ddot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
 + \frac{k_1 l_2^2 \sin 2\alpha_1}{2} + b_1 l_2^2 \dot{\alpha}_1 - mgl_2 \sin \alpha_1 + \\
 + b_1 l_2 \dot{x} \cos \alpha_1 + b_1 l_2 l_1 \dot{\alpha}_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
 + ml_2 l_1 \dot{\alpha}_2^2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& (m + m_b)l_1^2\ddot{\alpha}_2 + (m + m_b)l_1\dot{x}\cos\alpha_2 + \\
& + ml_2l_1\ddot{\alpha}_1\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + (b_1 + b_2)l_1\dot{x}\cos\alpha_2 + \\
& + (b_1 + b_2)l_1^2\dot{\alpha}_2 + b_1l_2l_1\dot{\alpha}_1\cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \\
& - ml_2l_1\dot{\alpha}_1^2\sin(\alpha_1 - \alpha_2) + (k_2l_1^2\sin 2\alpha_2)/2 + \\
& - m_bgl_1\sin\alpha_2 = 0
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
& (M + m_b + m)\ddot{x} + \\
& + (m + m_b)l_1(\ddot{\alpha}_2\cos\alpha_2 - \dot{\alpha}_2^2\sin\alpha_2) + \\
& + ml_2(\ddot{\alpha}_1\cos\alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2\sin\alpha_1) + \\
& + (b_1 + b_2 + b_3)\dot{x} + (b_1 + b_2)l_1\dot{\alpha}_2\cos\alpha_2 + \\
& + b_1l_2\dot{\alpha}_1\cos\alpha_1 = F
\end{aligned} \tag{3}$$

Trong đó, M (kg) là khối lượng xe; m_b (kg) là khối lượng thanh con lắc (đồng chất); m (kg) là khối lượng vật nặng; l_1 (m) là một nửa chiều dài thanh con lắc; l_2 (m) là chiều dài thanh con lắc; k_1 (N/m) và k_2 (N/m) lần lượt là độ cứng (đéo) của thanh con lắc và của vật nặng (thể hiện ở Hình 1); b_1 (kgm²), b_2 (kgm²), b_3 (kgm²) lần lượt là hệ số ma sát của vật nặng, thanh con lắc đéo và xe; g (m/s²) là gia tốc trọng trường; α_1 (rad) và α_2 (rad) lần lượt là góc lệch của đoạn giữa thanh con lắc và góc lệch của vật nặng so với phương thẳng đứng.

Trong mô tả này, dựa vào α_1 và α_2 , trạng thái của con lắc ngược đéo được thể hiện. Hệ phương trình (1)-(3) thể hiện một cấu trúc một vào – nhiều ra (single input – multi output – SIMO). Ở đây, ngõ vào là lực tác động vào xe, ngõ ra là x , α_1 , α_2 (3 ngõ ra).

Nếu giả sử thanh có độ đéo nhất định nhưng vẫn đủ cứng để α_1 và α_2 là cùng dương hoặc cùng âm, đồng thời, ta giả sử khi không dao động thì thanh con lắc và vật nặng cùng đứng yên hướng lên do góc thanh được gắn chặt với xe, ta có thể giảm SIMO bậc 3 về SIMO bậc 2 với hai ngõ ra chỉ là α_1 và x .

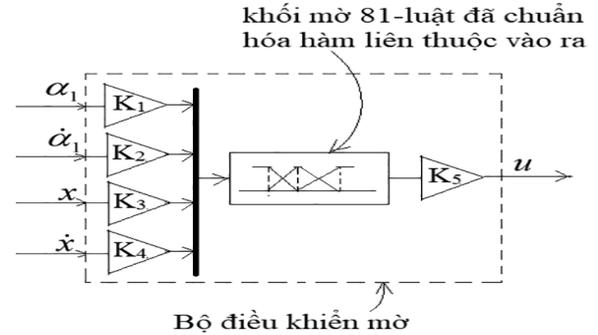
3. Giải thuật điều khiển

Với việc giả thiết về độ cứng của thanh con lắc như ở phần 2, hệ FIPC có thể được xem như một hệ SIMO bậc 2 và có thể được áp dụng cấu trúc ở 81-luật như ở tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2003). Lúc này, vị trí xe của FIPC là tương đồng với vị trí xe của IPC. Góc lệch của con lắc (tương ứng với chiều dương) là tương đồng với góc α_1 của FIPC. Điểm làm việc tĩnh được chọn là:

$$x = \dot{x} = \alpha_1 = \dot{\alpha}_1 = u = 0 \tag{4}$$

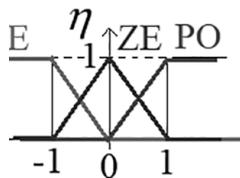
Lúc này, cấu trúc mờ điều khiển cho FIPC được thể hiện qua Hình 2.

Hình 2. Cấu trúc bộ điều khiển (BĐK) mờ để ổn định FIPC tại điểm làm việc ở (4)

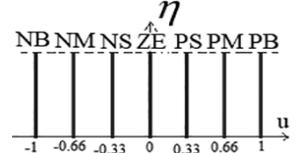


Trong Hình 2, K_1, K_2, K_3, K_4 lần lượt là các khối tiền xử lý cần được chọn lựa để phù hợp với tầm hoạt động của các tín hiệu ngõ vào (tương ứng với $x, \dot{x}, \alpha_1, \dot{\alpha}_1$) khi các hàm liên thuộc ngõ vào đã được chuẩn hóa như ở Hình 3. K_5 là khối hậu xử lý được chọn lựa để phù hợp tầm hoạt động của tín hiệu ngõ ra (tương ứng tín hiệu điều khiển u) khi ngõ ra đã được chuẩn hóa như ở Hình 4. Cấu trúc luật mờ, nhóm tác giả giữ nguyên như ở (Huỳnh Thái Hoàng, 2003).

Hình 3. Hàm liên thuộc ngõ vào (đã được chuẩn hóa)

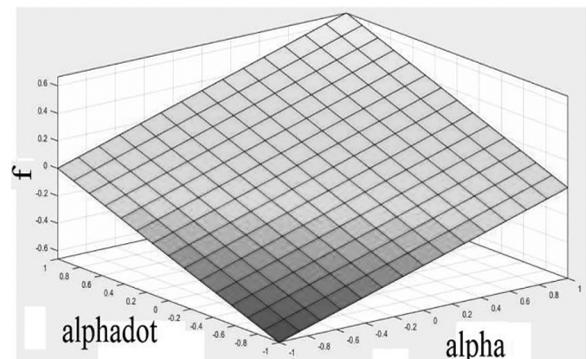


Hình 4. Hàm liên thuộc ngõ ra (đã được chuẩn hóa)

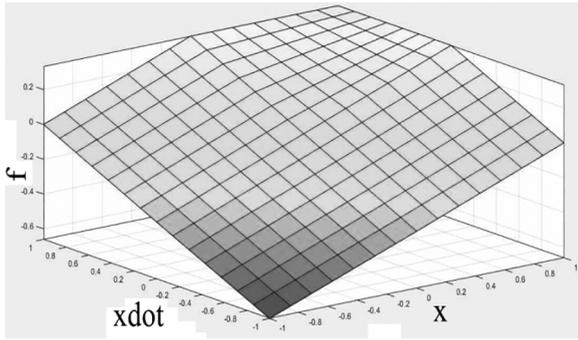


Cấu trúc các mặt điều khiển được thể hiện ở Hình 5 và Hình 6.

Hình 5. Mặt phẳng điều khiển với ngõ vào là $\alpha_1, \dot{\alpha}_1$

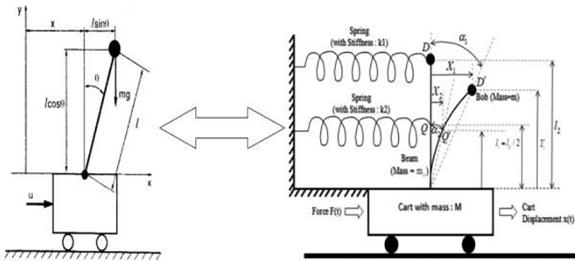


Hình 6. Mặt phẳng điều khiển với ngõ vào là x, \dot{x}



Theo Hình 7, ta thấy cấu trúc vào ra và chiều dương quy ước của IPC trong tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2003) và FIPC ở Hình 1 là hoàn toàn tương ứng nhau. Góc lệch thanh con lắc so với vị cân bằng hướng lên của IPC là tương ứng với góc lệch của thanh dẻo FIPC so với vị trí thẳng đứng hướng lên. Vị trí xe và lực tác động vào xe của 2 hệ thống là hoàn toàn tương đồng nhau. Như vậy, các ngõ vào ra tương ứng của bộ 81-luật của IPC sẽ được áp dụng cho FIPC.

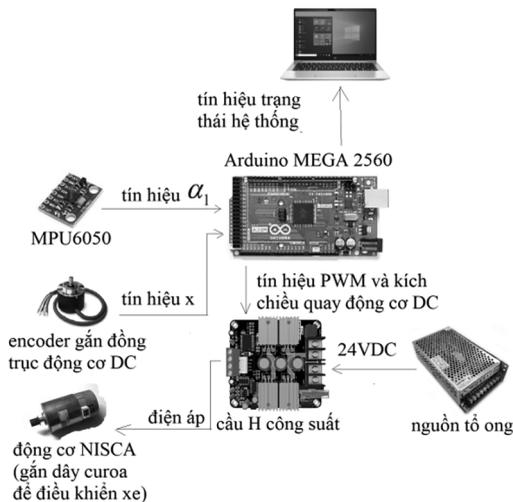
Hình 7. Tương đương hệ IPC và hệ FIPC



4. THỰC NGHIỆM

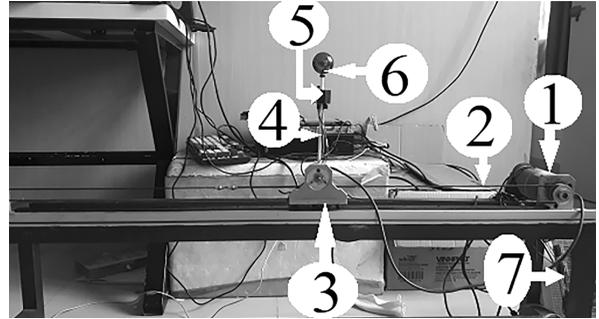
Cấu trúc kết nối phần cứng được thể hiện như ở Hình 8.

Hình 8. Cấu trúc liên kết phần cứng FIPC



Mô hình phần cứng của FIPC được cải tạo lại từ mô hình cần trục 2D ở tài liệu (Hoàng Lê Đức Minh, 2023) để tiết kiệm chi phí chế tạo. Thanh treo tải được tháo ra, và một thanh nhựa dẻo (nhưng vẫn đủ cứng) được gắn vật nặng ở 1 đầu được gắn cố định trên xe, hướng lên. Trên đầu vật nặng là cảm biến MPU6050. Mô hình thực nghiệm được thể hiện ở Hình 9. Trong thí nghiệm, BDK mờ được sử dụng để chống dao động cho con lắc dẻo trong khi vẫn ổn định tại chỗ cho xe (giữ xe không xô dịch so với vị trí zero định trước).

Hình 9. Mô hình cơ khí FIPC



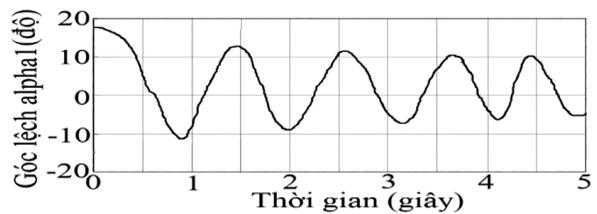
Giải thích các khối của Hình 9:

- 1- Động cơ DC có trục kết nối encoder 200 xung/vòng phía sau
- 2- Dây curoa kết nối động cơ và xe
- 3- Xe
- 4- Thanh nhựa có độ dẻo
- 5- MPU6050
- 6- Vật nặng
- 7- Tổ hợp board điều khiển và board công suất

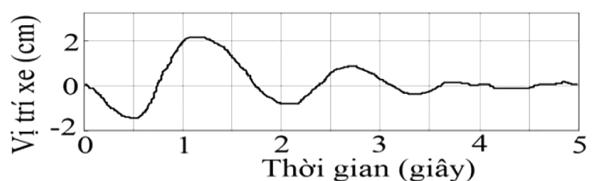
Kết quả thực nghiệm

Khi chưa có BDK, đáp ứng hệ FIPC thực nghiệm được thể hiện ở Hình 10 và Hình 11.

Hình 10. Dao động của thanh con lắc dẻo khi được thả tự do khi không có BDK.



Hình 11. Dao động của xe khi không có BDK



Ở Hình 10, khi được thả tự do từ giá trị đầu 18 độ, thanh con lắc dao động qua lại với biên độ càng lúc càng giảm dần. Đến giây thứ 5, độ dao động vẫn còn duy trì khoảng 5 độ quanh vị trí thẳng đứng hướng lên. Độ dao động giảm dần theo thời gian là do ma sát. Ở Hình 11, con lắc dao động cũng tạo ra tác động quán tính làm xe di chuyển. Nhưng, tác động lên xe là chậm hơn dao động con lắc là do ma sát giữa xe và thanh trượt. Xe dao động khoảng 2 cm so với vị trí gốc sau khoảng 4 giây thì lực quán tính do con lắc dao động gây ra nhỏ hơn lực ma sát nên xe đứng yên tại chỗ.

Với mô hình thực nghiệm như ở Hình 8, Hình 9, thông số tiền xử lí và hậu xử lí được chọn thông qua thử sai như sau:

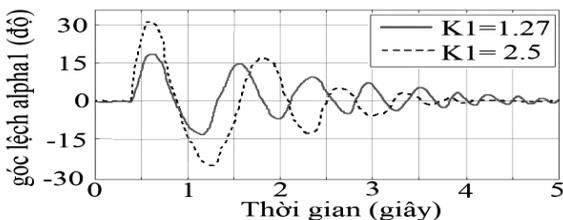
$$K_1=1.27; \quad K_2=0.063; \quad K_3=100; \quad (5)$$

$$K_4=0.1; \quad K_5=6$$

Quá trình thử sai được thực hiện như sau: Nhóm tác giả nhận thấy góc α_1 của con lắc dao động trong khoảng tối đa 45 độ (tức 0.785 rad). Do đó, K_1 (trọng số tương ứng α_1) được chọn là $K_1=1/0.785=1.27$. Vận tốc góc $\dot{\alpha}_1$ thông qua tác động thực nghiệm là khoảng 90 độ/0.1 giây, tức khoảng 15.7 rad/giây. Do đó, K_2 (trọng số tương ứng với $\dot{\alpha}_1$) được chọn là $K_2=1/15.7=0.063$. Tương tự, ta có $K_3=1/0.01=100$; $K_4=1/10=0.1$. $K_5=6$ được chọn thông qua tùy chỉnh thử sai vì nhóm tác giả dự kiến cho $K_5=20$ để điện áp thay đổi từ -20V đến 20V đối với mô hình thực nghiệm. Tuy nhiên, việc chọn K_5 quá lớn làm mô hình rung khá mạnh. Do đó, để cấu trúc hoạt động êm hơn, thông qua kinh nghiệm chuyên gia, nhóm chọn K_5 giảm xuống còn 6.

Với thông số tiền xử lí và hậu xử lí được lựa chọn như ở (5), kết quả thực nghiệm điều khiển được thể hiện ở Hình 12 và Hình 13.

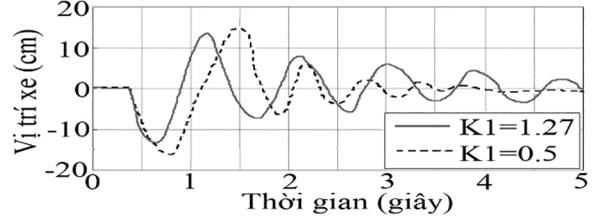
Hình 12. So sánh góc lệch α_1 (độ) khi thay đổi K_1



Ở Hình 12, ta thấy với K_1 nhỏ hơn (1.27 so với 2.5), sự dao động ban đầu của góc lệch α_1 là lớn hơn (lên tới 31 độ so với 16 độ) nhưng làm giảm

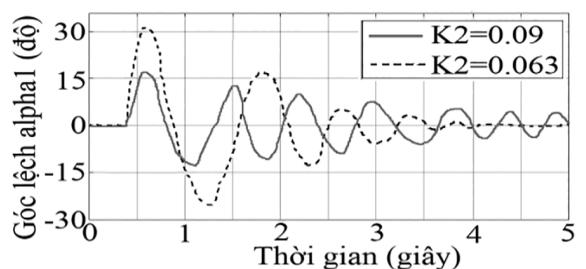
được thời gian xác lập (từ 4 giây lên 5-6 giây). Như vậy, khi ta tăng hệ số tiền xử lí K_1 , tương ứng α_1 thì góc lệch này được chú ý hiệu chỉnh hơn để về nhanh trạng thái không còn dao động. Điều này đánh đổi bằng sự dao động nhiều hơn ở khoảng thời gian quá độ đầu.

Hình 13. So sánh vị trí xe (m)



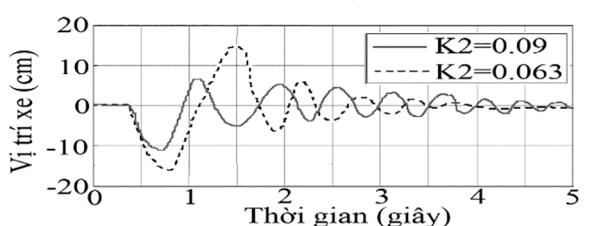
Ở Hình 13, đáp ứng của vị trí xe là tương tự với góc con lắc ở Hình 12. Khi K_1 lớn hơn (1.27 so với 2.5), xe dao động nhiều hơn ở khoảng quá độ (13cm so với 12cm) nhưng về vị trí xác lập nhanh hơn (thời gian xác lập khoảng 4 giây so với hơn 6 giây). Như vậy, việc tăng trọng số K_1 để tăng mức độ điều khiển cho góc con lắc cũng làm xe phải dao động mạnh hơn để điều chỉnh giảm dao động con lắc nhất. Và, khi con lắc cân bằng thì xe cũng ở vị trí xác lập. Việc tăng K_1 giúp toàn hệ thống nhanh xác lập hơn nhưng mức độ dao động ban đầu là lớn hơn.

Hình 14. So sánh góc lệch α_1 (độ) khi thay đổi K_2



Ở Hình 14, khi tăng K_2 (trọng số tương ứng vận tốc góc lệch của con lắc đảo - $\dot{\alpha}_1$) từ 0.063 lên 0.09, độ dao động quá độ của góc con lắc α_1 giảm từ 31 độ về 16 độ nhưng thời gian xác lập bị kéo dài từ 4 giây sang dài hơn 5 giây. Như vậy, việc tăng K_2 giúp làm con lắc ít dao động nhưng tăng thời gian xác lập.

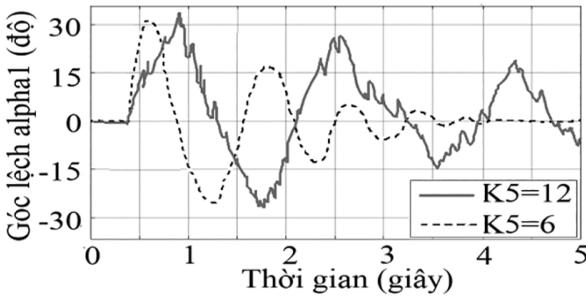
Hình 15. So sánh vị trí xe (m)



Ở Hình 15, việc tăng K_2 (trọng số tương ứng vận tốc quay con lắc) từ 0.063 lên 0.09 cũng làm xe dao động ít hơn (khoảng 11 cm thay vì 16 cm) và kéo dài thời gian xác lập hơn (trên 5 giây so với 4 giây).

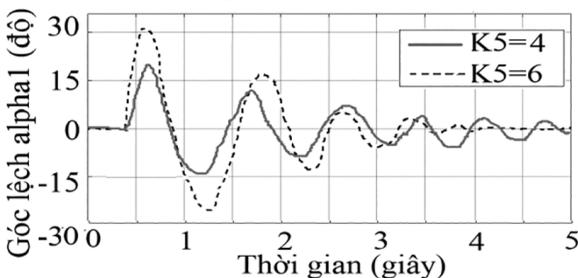
Thông qua Hình 12 đến Hình 15, ta thấy việc tăng K_1 và giảm K_2 mang đến các kết quả tương tự nhau. Bên cạnh đó, việc hiệu chỉnh góc con lắc cũng ảnh hưởng mật thiết đến xe. Góc con lắc ổn định nhanh hơn thì xe cũng ổn định nhanh hơn. Góc con lắc dao động nhiều thì xe cũng dao động nhiều. Do đó, việc tìm hiểu thêm sự tinh chỉnh K_3, K_4 không được nhóm tác giả trình bày tiếp ở phần này. Bên cạnh đó, thông qua các khảo sát vừa thực hiện, đáp ứng của góc con lắc và xe là đồng nhất. Do đó, để kiểm tra chất lượng hệ thống, chúng ta có thể chỉ cần kiểm tra góc con lắc để đánh giá chất lượng toàn hệ thống. Với việc giữ nguyên các thông số K_1 đến K_4 ở (5) và chỉ hiệu chỉnh K_5 , đáp ứng hệ thống được thể hiện ở Hình 16 và Hình 17.

Hình 16. So sánh góc lệch α_1 (độ) khi K_5 tăng so với giá trị chuẩn ở (5)



Ở Hình 16, khi K_5 tăng (từ 6 lên 12) thì góc con lắc dao động mạnh hơn (32 độ so với 31 độ), thời gian xác lập cũng lâu hơn (con lắc mất nhiều thời gian hơn để xác lập – nhiều hơn 5 giây so với 4 giây). Như vậy, việc tăng K_5 quá lớn gây ảnh hưởng xấu của thời gian xác lập và độ dao động của hệ thống.

Hình 17. So sánh góc lệch α_1 (độ) khi K_5 giảm so với giá trị chuẩn ở (5)



Tuy vậy, như ở Hình 17, việc chọn K_5 quá nhỏ (4 so với 6) thì lại làm độ dao động chắc chắn nhỏ lại (18 độ so với 31 độ) nhưng kéo dài thời gian xác lập (trên 5 giây so với 4 giây). Như vậy, K_5 phải được chọn phù hợp. Việc chọn K_5 quá lớn hay quá nhỏ đều làm thời gian xác lập lớn lên. Việc chọn K_5 sẽ tỉ lệ thuận với độ dao động. Điều này là phù hợp với việc K_5 tương ứng độ khuếch đại tín hiệu điều khiển ở ngõ ra.

5. Kết luận

Trong bài báo, nhóm tác giả đã phân tích một đối tượng robot có thành phần dẻo là FIPC. Thông qua phân tích hệ phương trình toán của đối tượng này, một cấu trúc điều khiển mờ kinh điển vốn chỉ được áp dụng cho hệ SIMO gồm toàn thành phần cứng được sử dụng cho đối tượng này. Quá trình thực hiện chỉ được thể hiện trên thực nghiệm vì đối tượng mô hình toán là SIMO bậc 3 trong khi ở thực nghiệm, ta chỉ xét SIMO bậc 2. Mô hình SIMO bậc 2 cho FIPC mô phỏng vẫn là vấn đề mở sau nghiên cứu này. Kết quả thực nghiệm cho thấy BDK mờ đã điều khiển chống dao động cho con lắc dẻo bên cạnh điều khiển ổn định vị trí cho xe. Quá trình khảo sát các thông số BDK mờ cũng được thực hiện để chỉ ra các thông số quan trọng (K_1, K_2, K_5) và các ảnh hưởng của chúng đến FIPC. Mô hình được chế tạo trong nghiên cứu này cũng là mô hình phù hợp để phát triển tiếp tục các nghiên cứu trên hệ thống robot có cấu trúc dẻo.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo là sản phẩm đề tài T2023-55, được tài trợ kinh phí bởi Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh (HCMUTE).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- J. Aracil and F. Gordillo. (2011). *The inverted pendulum: a benchmark in nonlinear control*. Proceedings World Automation Congress, 2004, Seville, Spain, 2004, pp. 468-482.
- A. Jemima et al. (2020). *SOFT ROBOTICS: A Bio-Inspired Revolution*. IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC), India, pp. 1-6.
- H. Hauser. (2023). Soft Robotics: An Introduction to the Special Issue. In IEEE Control Systems Magazine, vol. 43, no. 3, pp. 28-29.
- Tang Jiali, Ren Gexue. (2009). *Modeling and Simulation of a Flexible Inverted Pendulum System*. Tsinghua Science and Technology, ISSN 1007-0214, pp. 22-26, Vol. 14, No. S2.
- Nguyễn Minh Tâm, Nguyễn Văn Đông Hải. (2020). *PID Control for Flexible Inverted Pendulum*. Robotica & Management, Vol. 25, No. 2, pp. 21-27.
- Trần Ngọc Sơn và cộng sự. (2019). *LQR Control on Linear Model of Flexible Inverted Pendulum*. Journal of Technical Education Science, No. 55, pp. 41-48.
- Huỳnh Thái Hoàng. (2003). *Hệ thống điều khiển thông minh*. NXB ĐHQG TP HCM.
- Lê Thị Thanh Hoàng và cộng sự. (2018). *Fuzzy Controller for Rotary Inverted Pendulum*. Robotica & Management, 23-2, pp. 16-20.
- Nguyen Van Dong Hai et al. (2017). *Application of Fuzzy and PID Algorithm in Gantry Crane Control*. Journal of Technical Education Science. No. 44A, pp. 48-53.
- Nguyễn Văn Đông Hải và cộng sự. (2022). *Experimental Fuzzy Control for Tower Crane*. Journal of Technical Education Science, (68), 36-47.
- Hoàng Lê Đức Minh và cộng sự. (2023). *Fuzzy Control for Gantry Crane 2D: Simulation and Experiment*. Tập San Khoa học và kỹ thuật trường Đại học Bình Dương, 6(1).