

Xây dựng bộ điều khiển mờ cho hệ bóng trên bánh xe Development of a fuzzy controller for a ball-on-wheel system

Nguyễn Ngọc Anh, Huỳnh Tấn Khôi*, Nguyễn Thuận Phát, Lý Nhật Thắng, Lê Nguyễn Trường Phúc, Nguyễn Quốc Huy, Nguyễn Lê Anh Tuấn, Phạm Nhật Anh Khoa, Nguyễn Thành Trọng, Huỳnh Phước Bảo

Trường Đại học Sư phạm Kỹ Thuật TP HCM

* 19151143@student.hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài:

24/10/2023

Ngày chấp nhận đăng:

27/11/2023

Keywords: nonlinear model, ball on wheel, fuzzy control, STM32F4.

ABSTRACT

In this study, we focus on ball on wheel system as a standard nonlinear model which needs to be examined in laboratories. An experimental model was presented through using a control board STM32F4. However, with unknown system parameters, fuzzy algorithm was suitable as a control method which was based on experiences of experts. The process of building fuzzy controller was shown and this controller was tested on an experimental model. Experimental results prove that fuzzy controller works well. Thence, this real model platform is useful in researching intelligent control in laboratories..

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả hướng đến đối tượng bóng trên bánh xe (Ball-on-Wheel –BoW) như một mô hình phi tuyến chuẩn cần khảo sát trong phòng thí nghiệm (PTN). Một mô hình thực nghiệm được giới thiệu thông qua việc sử dụng board điều khiển STM32F4. Tuy nhiên, với thông số mô hình chưa được xác định, giải thuật mờ được xem xét là giải thuật phù hợp như áp dụng kinh nghiệm chuyên gia. Quá trình xây dựng bộ điều khiển (BĐK) mờ được trình bày và thử nghiệm trên mô hình thực nghiệm. Kết quả thực nghiệm chứng minh BĐK mờ hoạt động tốt. Và, nền tảng phần cứng là phù hợp cho các nghiên cứu về điều khiển thông minh (ĐKTM) về sau ở PTN.

Từ khóa: hệ thống phi tuyến, bóng trên bánh xe, giải thuật mờ, STM32F4.

1. Giới thiệu

Bên cạnh các mô hình chuẩn thông dụng như con lắc ngược quay (Võ Anh Khoa và cộng sự, 2018, trang 32-40), bóng thanh (Thi-Thuy Hoang et al, 2021, pp. 03-08),..., các mô hình chuẩn khác cũng đang dần được xem xét để phong phú hóa, tạo điều kiện cho các sinh viên (SV) có điều kiện tiếp xúc và nghiên cứu với

nhiều dạng mô hình khác nhau. Trong nghiên cứu này, chúng tôi giới thiệu mô hình thực nghiệm BoW (Willson, S.S. et al, 2012, pp. 1271-1278) như một hệ thống phù hợp cho các nghiên cứu ĐKTM trong PTN điều khiển tự động (ĐKTĐ). Một mô hình BoW đã được thử nghiệm thành công dựa trên giải thuật PD (Võ Đình Tuấn và cộng sự, 2023, trang 125-132).

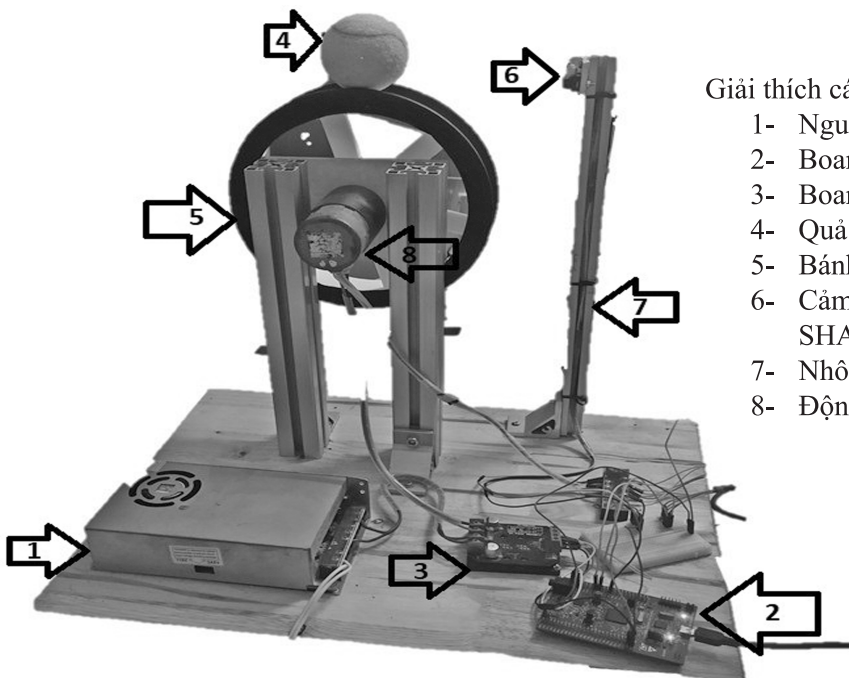
Trong nghiên cứu đó, giải thuật PD là phù hợp để khắc phục tình trạng thiếu thông tin về thông số và mô hình toán của mô hình thực nghiệm. Tuy vậy, board điều khiển trong nghiên cứu đó là Arduino. Việc lập trình C để mô tả các giải thuật ĐKTM để điều khiển các hệ thống là rất phức tạp. Matlab có hỗ trợ các công cụ/ khối để thực hiện các giải thuật thông minh, tiết kiệm công sức lập trình cho người nghiên cứu. Nhưng, việc nhúng Matlab cho Arduino rất hạn chế do cộng đồng chưa phát triển mạnh. Đồng thời, tốc độ xử lý của Arduino là chậm và tài nguyên bộ nhớ của Arduino là rất hạn chế. Trong tài liệu (Thi-Ai-Van Nguyen et al, 2023, pp. 36-42), Matlab đã nhúng được thành công giải thuật PID cho lò nhiệt. Tuy nhiên, mô hình lò nhiệt là mô hình có thời gian lấy mẫu chậm nên quá trình tính toán của Arduino kịp trong thời gian lấy mẫu. Do đó, một nghiên cứu xây dựng và kiểm chứng thực nghiệm đối với nhúng Matlab một giải thuật ĐKTM cho một vi điều khiển không quá mắc tiền, tạo nền tảng thực nghiệm ĐKTM cho mô hình chuẩn ở PTN, là cần thiết. Trong nghiên cứu này, hệ BoW được giả định là hệ một vào- một ra (single input- single output –SISO) tốc độ cao

với ngõ vào là điện áp cấp cho động cơ, ngõ ra là vị trí quả bóng. Giải thuật thông minh thông dụng nhất - giải thuật mờ được thiết lập trực tiếp thông qua kinh nghiệm của chuyên gia vận hành - được nghiên cứu áp dụng cho mô hình này.

2. Mô hình thực nghiệm

Mô hình thực nghiệm được thể hiện ở Hình 1. Phần cứng này đã được cải thiện trên cơ sở mô hình cũ ở tài liệu (Võ Đình Tuấn và cộng sự, 2023, trang 125-132). Trong mô hình này, hai thanh nhôm được sử dụng để giữ cho hệ thống ổn định và gắn động cơ nisca. Bên cạnh bánh xe bên trái, một thanh nhôm được thêm để đặt cảm biến khoảng cách, đảm bảo rằng cảm biến này đối diện trực tiếp với quả bóng mà chúng tôi muốn duy trì thăng bằng. Dưới đây mô hình một tấm gỗ được sử dụng để cố định các thanh nhôm và thiết bị điện cần thiết. Trong dự án này, quả bóng tennis được lựa chọn để sử dụng làm vật thử nghiệm cân bằng vì quả bóng này có khối lượng phù hợp và có sẵn dễ dàng trên thị trường. Đồng thời, nó cũng có thể được thay thế một cách tiện lợi nếu cần. Vi xử lý được dùng là board STM32F4 vì tốc độ xử lý tốt và giá thành hợp lý.

Hình 1. Mô hình thực nghiệm

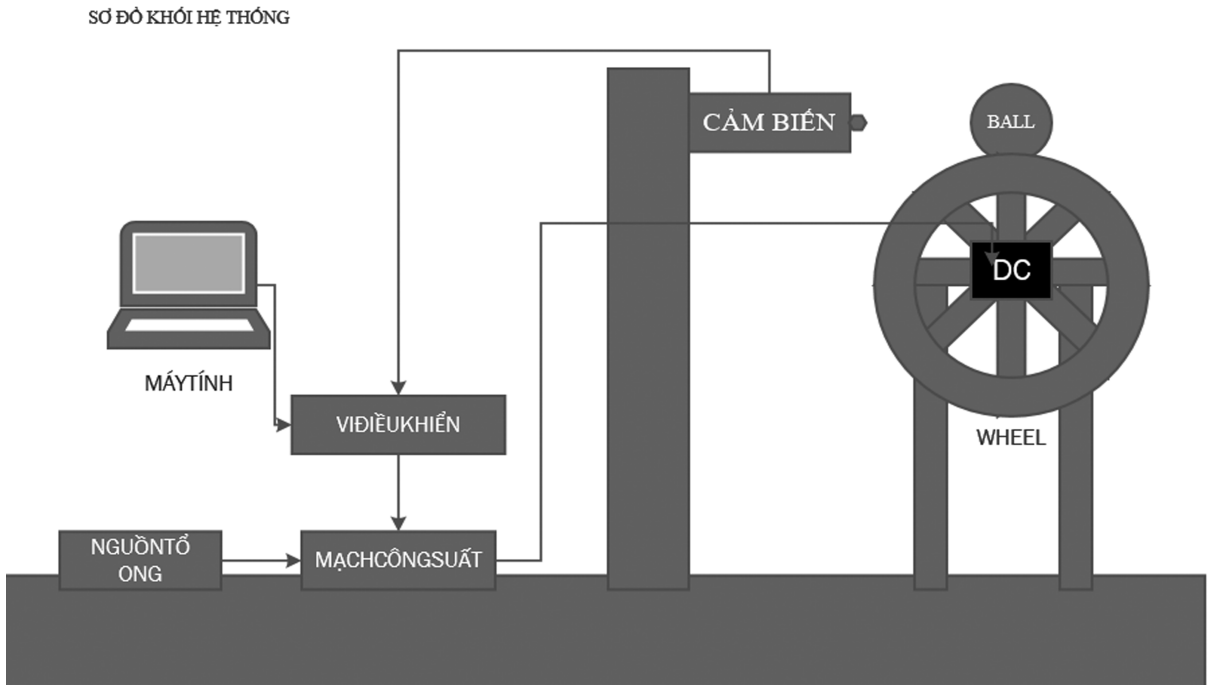


Giải thích các thành phần thiết bị ở Hình 1:

- 1- Nguồn cấp nguồn tổ ong 24V-10A
- 2- Board điều khiển STM32F4
- 3- Board mạch cầu H HI216
- 4- Quả bóng tennis
- 5- Bánh xe bằng nhựa in 3D
- 6- Cảm biến khoảng cách hồng ngoại SHARP GP2Y0A21YK0F
- 7- Nhôm định hình
- 8- Động cơ NISCA 24VDC

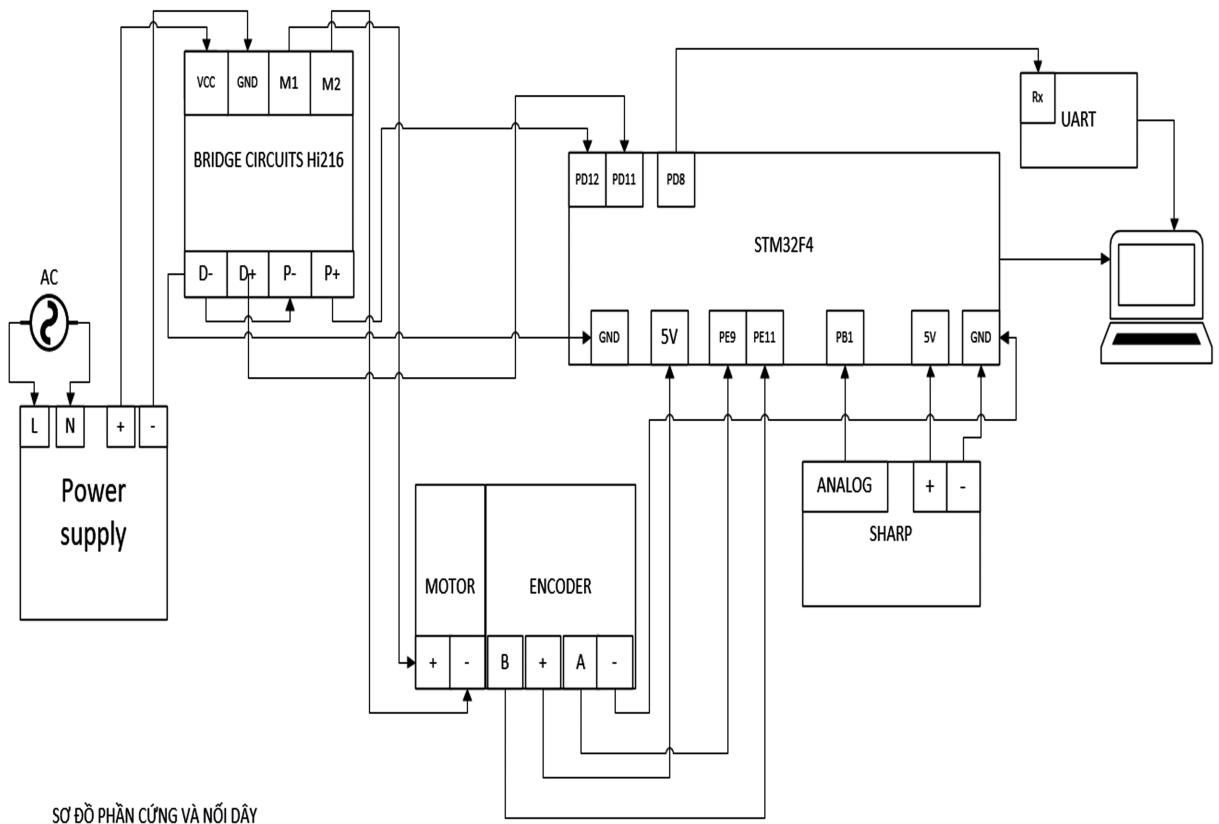
Cấu trúc phần cứng thực nghiệm:

Hình 2. Sơ đồ khối hệ thống



Mô tả kết nối thiết bị phần cứng của hệ BoW được mô tả kỹ hơn ở Hình 3.

Hình 3. Sơ đồ phần cứng và điều khiển của hệ



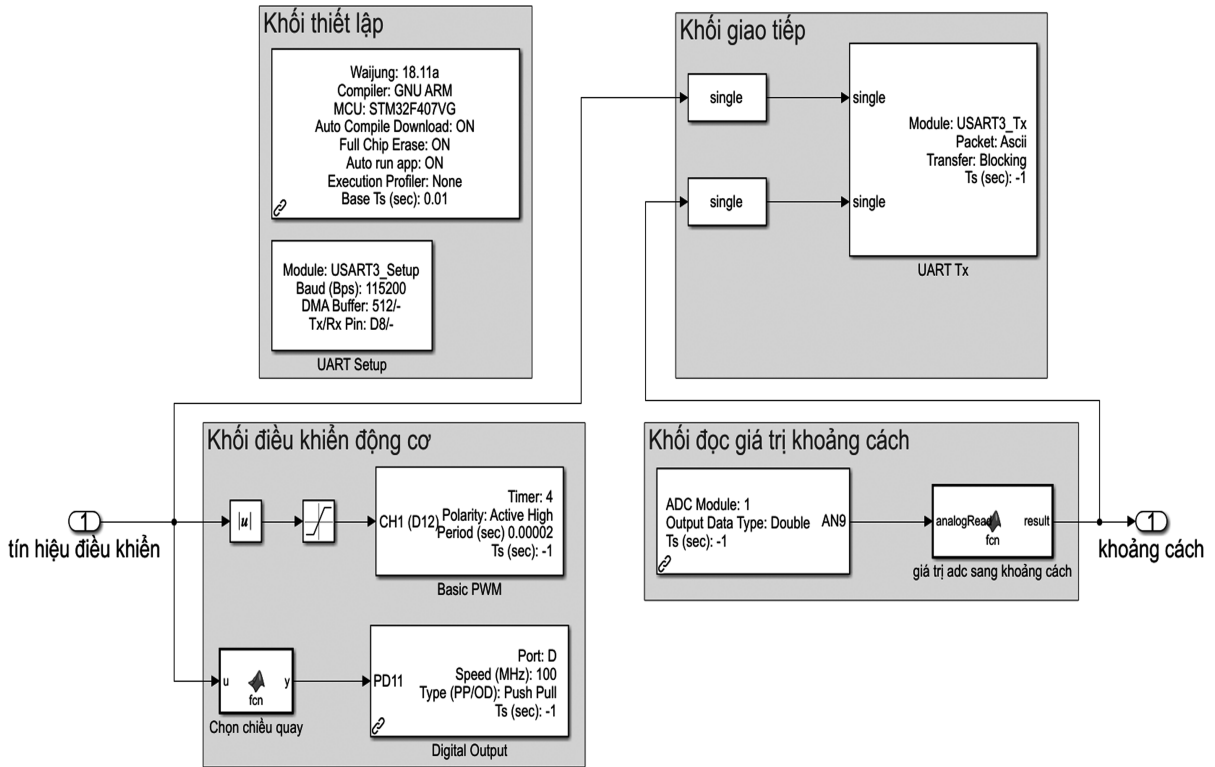
SƠ ĐỒ PHẦN CỨNG VÀ NỐI DÂY

3. Giải thuật điều khiển

3.1. Cấu trúc đầu vào, đầu ra của hệ thống

Cấu trúc của hệ thống thực nghiệm hệ thống BoW bao gồm 1 đầu vào và 1 đầu ra. Đầu vào là tín hiệu điều khiển động cơ. Đầu ra là giá trị khoảng cách từ cảm biến đến quả bóng.

Hình 4. Cấu trúc đầu vào đầu ra của hệ thống



Giải thích Hình 4:

Khối thiết lập: Bao gồm khối cài đặt vi điều khiển STM32F407VG và khối cài đặt giao tiếp UART.

Khối giao tiếp: Bao gồm các khối ép kiểu giá trị Single (để có thể truyền thông qua cổng UART) và gửi giá trị UART Tx.

Khối đọc giá trị khoảng cách: Bao gồm khối đọc ADC và hàm chuyển đổi giá trị ADC sang khoảng cách.

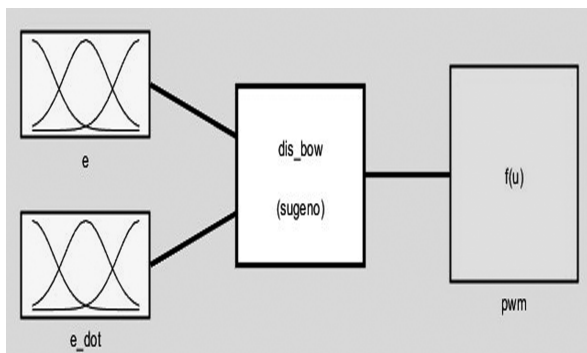
Khối điều khiển động cơ: Bao gồm khối

phát xung PWM (Basic PWM) và khối Digital Output để chọn chiều quay của động cơ.

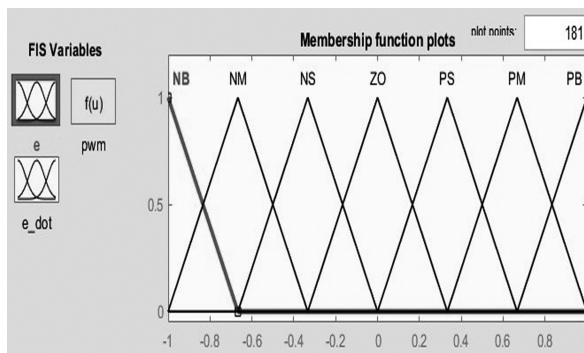
3.2. BDK mờ

BDK mờ đã chọn bao gồm 2 đầu vào giá trị sai số (e), vận tốc thay đổi giá trị sai số (e_dot) và 1 đầu ra là giá trị điều khiển cung cấp cho động cơ (pwm) được chỉ ra ở Hình 5. Các hàm liên thuộc đầu vào là 7 hàm hình tam giác được chỉ ra ở Hình 6 và Hình 7. Các hàm liên thuộc đầu ra là 7 hàm hằng số được chỉ ra ở Hình 8.

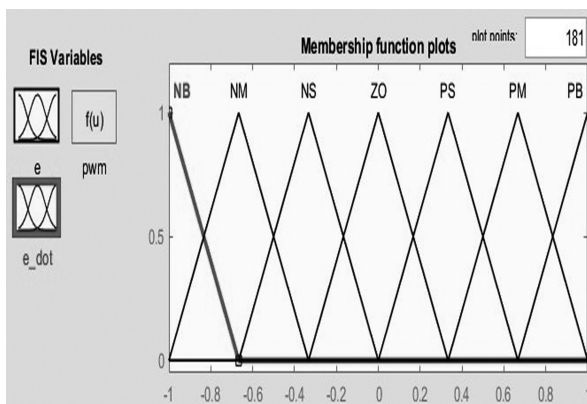
Hình 5. BDK mờ



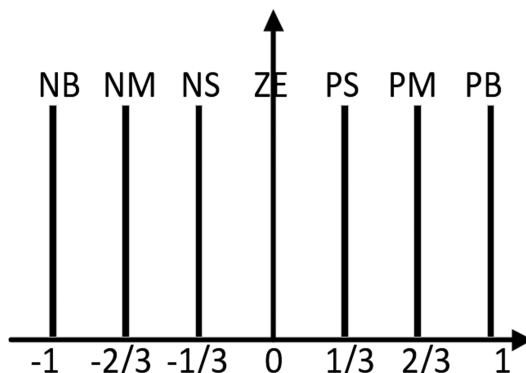
Hình 6. Mối quan hệ của hàm e



Hình 7. Mối quan hệ của hàm e_dot



Hình 8. Mối quan hệ ngõ ra pwm



Từ kinh nghiệm nhận biết từ thực nghiệm mô hình BoW, nhóm tác giả đã xây dựng tập hợp mờ gồm 49 luật mờ hoàn chỉnh được biểu diễn ở Bảng 1.

Bảng 1: Tập luật mờ của BDK mờ

| e \ e_dot | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NB | NB | NM | NM | NS |
| NM | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NS | NB | NM | NS | NS | ZO | PS | PM |
| ZO | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| PS | NM | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |
| PB | PS | PM | PM | PB | PB | PB | PB |

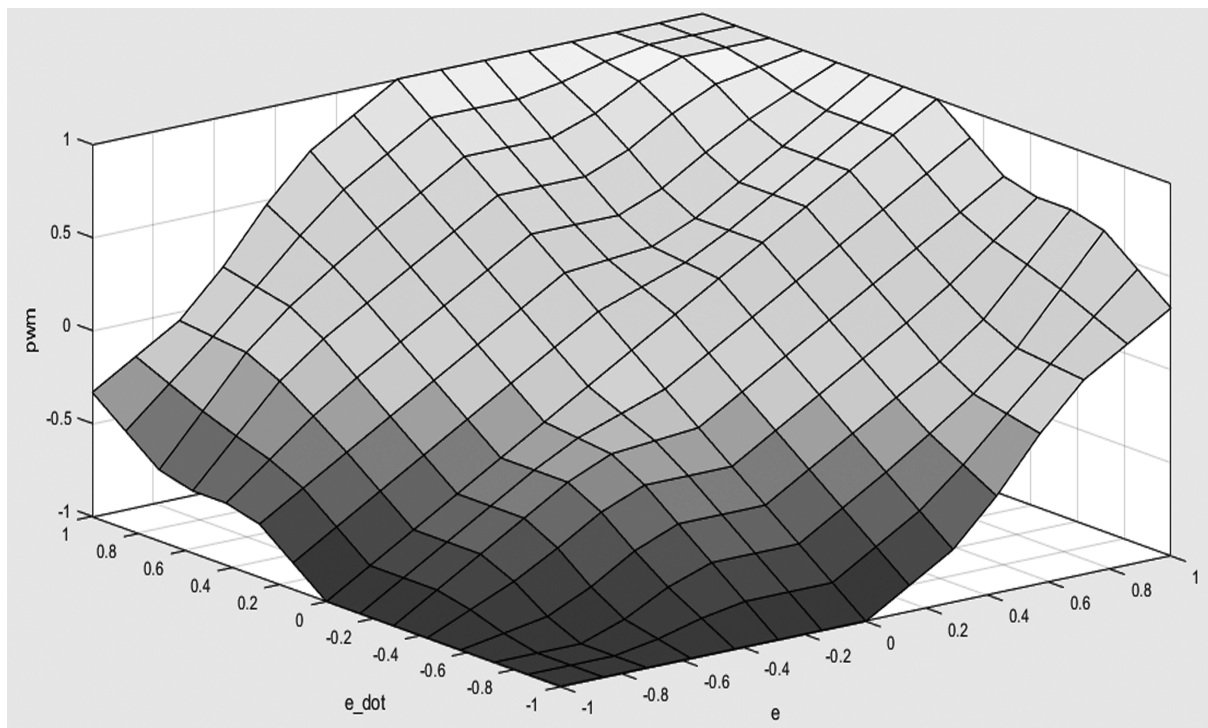
Giải thích các luật mờ trong Bảng 1: Giá trị ngõ ra sẽ là điểm giao của cột với hàng tương ứng với ngõ vào.

Nếu giá trị e âm lớn (NB) và giá trị e_dot âm lớn (NB) thì ngõ ra pwm là âm lớn (NB).

Nếu giá trị e là không (ZO) và giá trị e_dot là không (ZO) thì ngõ ra pwm là không (ZO).

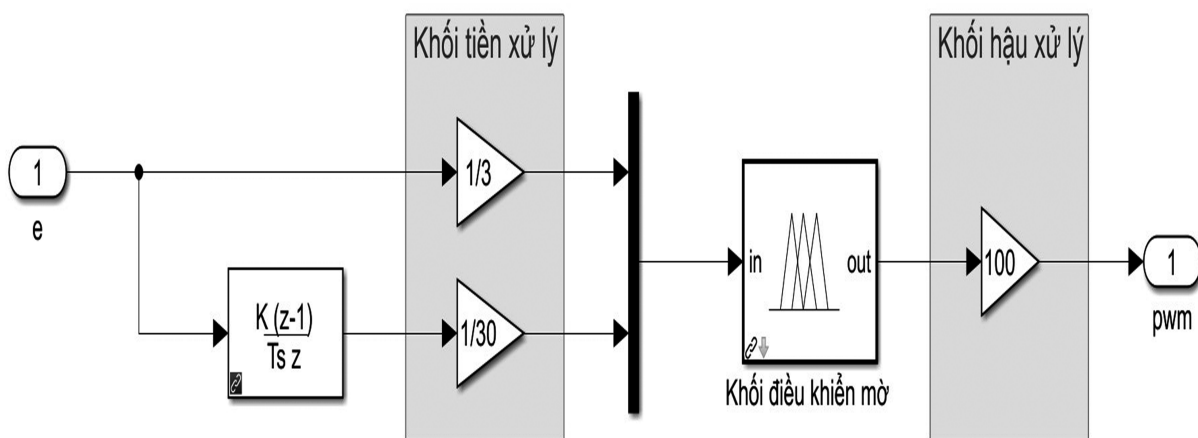
Nếu giá trị e dương nhỏ (PS) và giá trị e_dot dương nhỏ (PS) thì ngõ ra pwm là dương nhỏ (PS).

Hình 9. Mặt đặc tính biểu diễn mối quan hệ vào ra của hệ mờ



Mặt đặc tính ở Hình 9 thể hiện sự liên tục mờ được xây dựng là hoàn chỉnh, và nhất quán ở biên ngõ ra, cho thấy tập luật

Hình 10. Sơ đồ BDK mờ



Giải thích Hình 10:

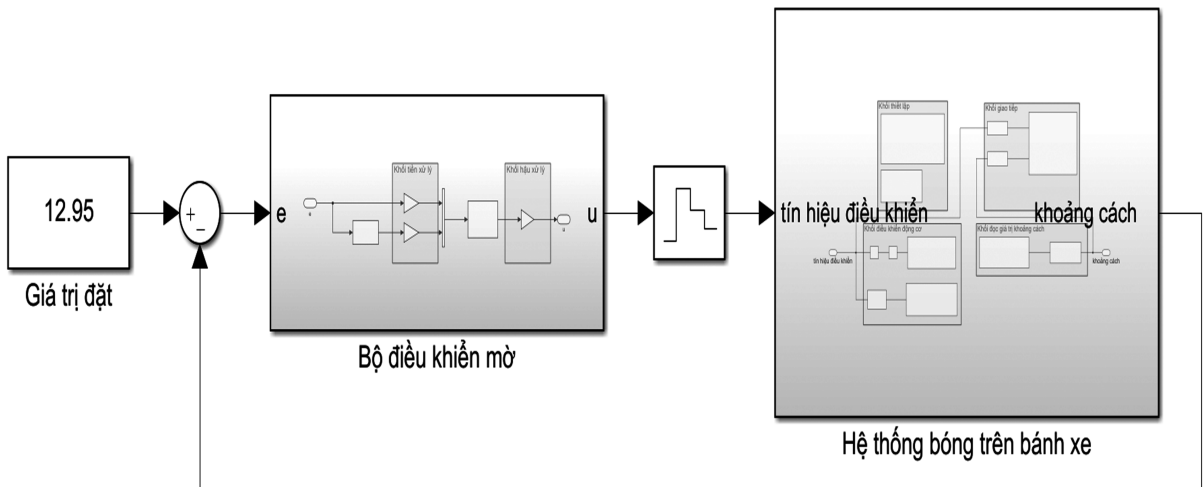
Khối tiền xử lý và hậu xử lý được chọn giá trị qua thực nghiệm.

Khối điều khiển mờ được tạo thành từ các luật mờ ở **Error! Reference source not**

found..

Từ sơ đồ cấu trúc hệ BoW(Hình 4) và sơ đồ BDK mờ (Hình 10), ta có thể kết hợp để tạo thành chương trình nhúng thực nghiệm điều khiển mờ cho hệ BoW (Hình 11).

Hình 11. Sơ đồ chương trình nhúng điều khiển mờ cho hệ BoW



Giải thích Hình 11:

Giá trị đặt: ở đây là 12.95 cm, giá trị này đại diện cho khoảng cách từ cảm biến đến quả bóng, nơi mà quả bóng nằm ở vị trí cao nhất của bánh xe, tương ứng với điểm làm việc của hệ thống. Giá trị này được đo lường từ mô hình thực nghiệm. Do vị trí điều khiển này là cố định và hệ thống chỉ có 1 điểm làm việc duy nhất. Đó là giữ vị trí quả bóng ở đỉnh cao nhất của bánh xe.

Bộ điều khiển mờ: Nhận giá trị sai số vị trí của quả bóng, xử lý và phát ra tín hiệu điều khiển đến hệ thống BoW.

Hệ thống bóng trên bánh xe: Nhận tín hiệu điều khiển và trả giá trị khoảng cách.

4. Kết quả thực nghiệm

Trong thực nghiệm, các giá trị tiền xử lý và hậu xử lý được chọn bằng cách xác định khoảng hoạt động của các biến trong đối tượng.

Giá trị sai số vị trí: $[-3, 3]$ được xác định theo kinh nghiệm.

Giá trị vận tốc sai số vị trí: $[-70, 70]$.

Giá trị điều khiển cung cấp cho động cơ: $[-100, 100]$ vì đây là giá trị dùng để xử lý chọn chiều quay và phần trăm hoạt động của động cơ.

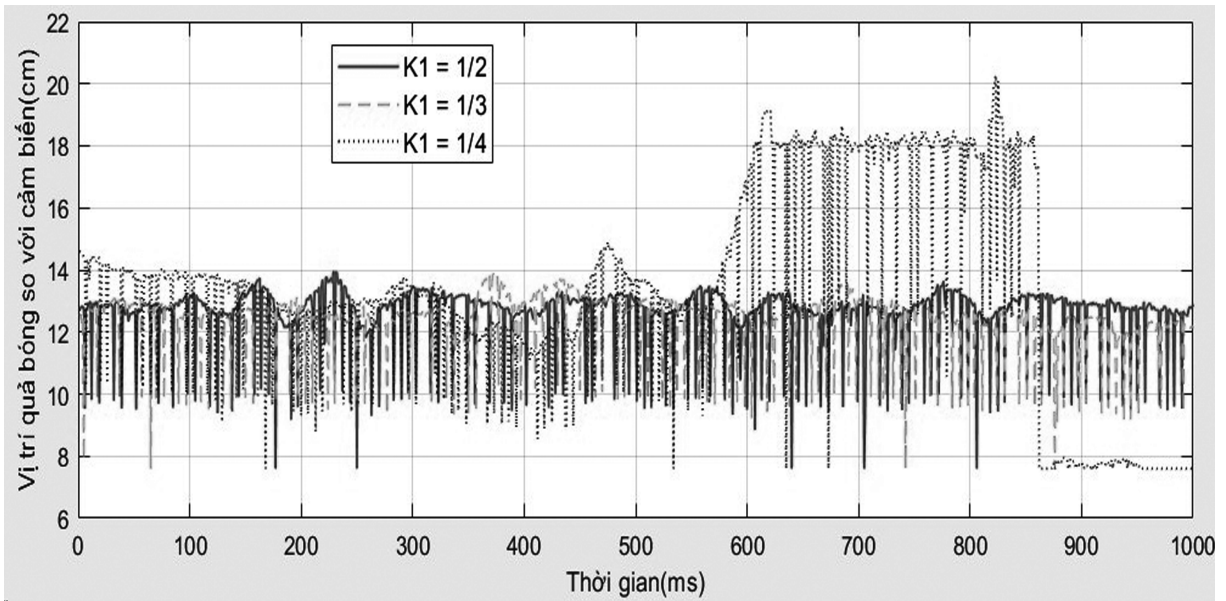
Để chuẩn hóa tập cơ sở của biến vào, ra về miền $[-1, 1]$ nên các ma trận hệ số khuếch đại của các khối tiền xử lý: $K_1=1/3$, $K_2=1/70$ và hậu xử lý $K_3=100$.

Từ những giá trị tiền, hậu xử lý được chọn ở trên, chúng tôi sẽ tiến hành khảo sát quanh các giá trị đó, nhằm tìm ra giá trị đáp ứng tốt nhất yêu cầu điều khiển ổn định hệ thống.

4.1. Khảo sát giá trị tiền xử lý của sai số e

Chọn giá trị $K_2=1/30$, $K_3=100$.

Hình 12. Vị trí quả bóng khi hiệu chỉnh giá trị tiền xử lý của sai số e



Với $K_1=1/2$, vị trí quả bóng khá ổn định nhưng dễ bị mất cân bằng. Đồng thời, quả bóng không thể về vị trí cân bằng nếu sai số quả bóng so với điểm làm việc quá lớn.

Với $K_1=1/4$, vị trí quả bóng ít ổn định và dễ mất ổn định.

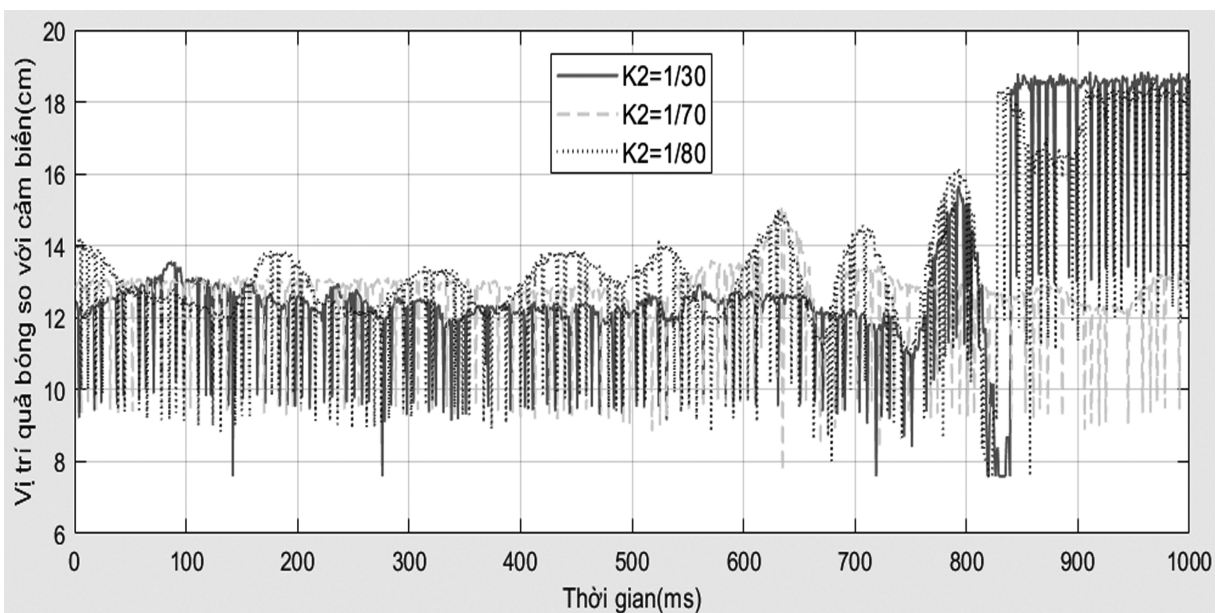
Với $K_1=1/3$, vị trí quả bóng khá ổn định.

Qua khảo sát trên, hệ số $K_1=1/3$ được chọn.

4.2. Khảo sát giá trị tiền xử lý của vận tốc thay đổi sai số e

Chọn giá trị $K_1=1/3, K_3=100$.

Hình 13. Vị trí quả bóng khi hiệu chỉnh giá trị tiền xử lý của vận tốc thay đổi sai số e



Với $K_2=1/30$, vị trí quả bóng khá ổn định nhưng dễ bị mất cân bằng khi gặp nhiễu, làm giá trị sai số không thể trở về khoảng ổn định.

Với $K_2=1/80$, vị trí quả bóng ít ổn định và nhiều lần rời xa điểm cân bằng dẫn đến dễ mất ổn định.

Với $K_2=1/70$, vị trí quả bóng khá ổn định. Khi có nhiễu, vị trí quả bóng ra xa điểm

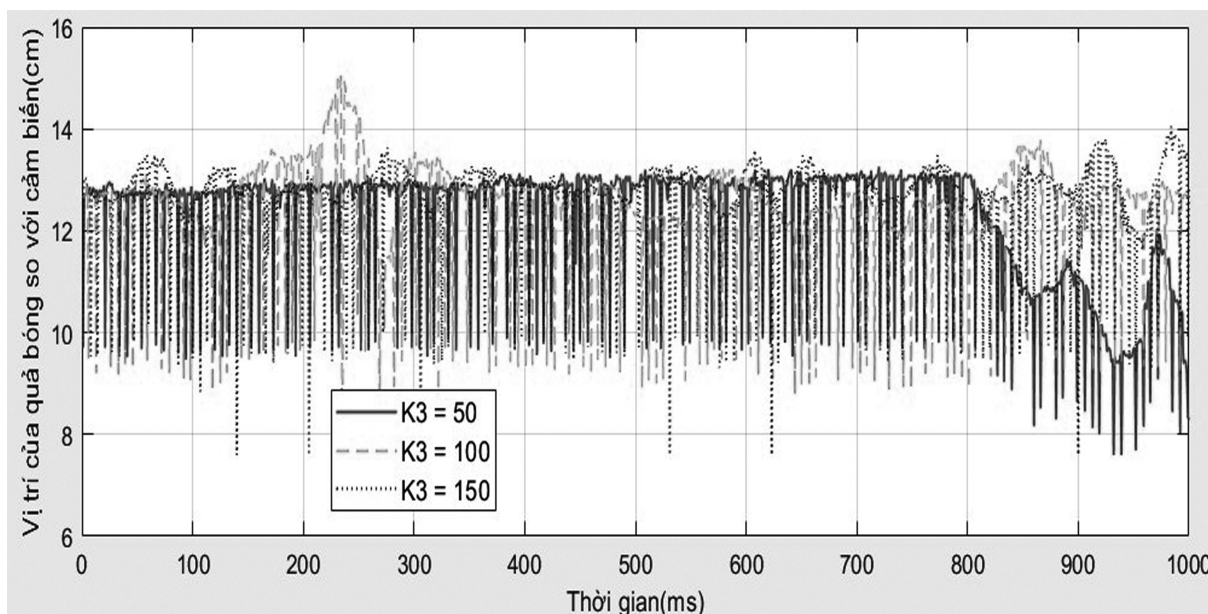
cân bằng thì ta vẫn có thể điều chỉnh quả bóng ổn định tốt.

Qua khảo sát trên, hệ số $K_2=1/70$ được chọn.

4.3. Khảo sát giá trị hậu xử lý của điều khiển động cơ

Chọn giá trị $K_1=1/3$, $K_2=1/70$.

Hình 14. Vị trí quả bóng khi hiệu chỉnh giá trị hậu xử lý điều khiển động cơ



Với $K_3=50$ (quá nhỏ), giá trị tín hiệu điều khiển không đủ để đưa quả bóng về vị trí cân bằng.

Với $K_3=150$ (quá lớn), giá trị tín hiệu điều khiển quá lớn làm hệ thống dễ bị vọt lố, mất ổn định.

Với $K_3=100$ (vừa phải), giá trị tín hiệu điều khiển vừa đủ để làm ổn định hệ thống.

Qua khảo sát trên, hệ số $K_3=100$ được lựa chọn.

Kết quả thực nghiệm được lưu ở link: <https://www.youtube.com/shorts/HIQvxxGwFig>

Như vậy, thông qua thiết kế BDK mờ và việc hiệu chỉnh thông số tiền xử lý-hậu xử lý theo quá trình cho phù hợp, giải thuật mờ cho hệ thực nghiệm BoW đã được xây dựng thành công.

5. Kết luận

Trong bài báo này, một mô hình thực nghiệm của hệ BoW đã được sửa chữa và

cải tiến để quá trình vận hành được tốt hơn. Nhóm tác giả đã tích hợp board điều khiển mới (STM32F4) để tạo nền tảng ứng dụng nhúng cho các giải thuật ĐKTM thông qua các khối Matlab hỗ trợ cho mô hình. BDK mờ do chúng tôi giới thiệu đã điều khiển thành công đối tượng trên. Quá trình hiệu chỉnh được trình bày trên cơ sở hiệu chỉnh các khối tiền/hậu xử lý để việc tham khảo hiệu chỉnh mờ cho các hệ SIMO tương tự là dễ dàng hơn. Thông qua đó, mô hình được chứng minh là phù hợp cho các PTN ở điều kiện kinh tế không quá cao để SV được phổ cập kiến thức điều khiển học thuật/ ứng dụng.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn đến TS. Nguyễn Văn Đông Hải (Khoa Điện-Điện tử HCMUTE) đã hướng dẫn, góp ý để nghiên cứu này được hoàn thành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Võ Anh Khoa và cộng sự (2018), Xây dựng và điều khiển mô hình con lắc ngược quay cho phòng thí nghiệm, *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật*, trang 32-40, số 49.
- Thi-Thuy Hoang et al (2021). A Method of Fuzzy Algorithm in Controlling Ball and Beam through Simulation and Experiment, *Robotica & Management, Vol. 26, No. 2, pp. 03-08*.
- Willson, S.S. et al (2012). Quotient method for stabilising a ball-on-a-wheel system — Experimental results. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. pp. 1271-1278.
- Võ Đình Tuấn và cộng sự (2023). PID control for Ball on Wheel: Simulation and Experiment. *Tạp San Khoa học Và kỹ thuật trường Đại học Bình Dương*, 6(3), trang 125-132.
- Thi-Ai-Van Nguyen et al (2023). PID Control for Heating Oven by Matlab-Embbbed Arduino, *International Journal of Robotica & Management*, Vol 28. No.1, pp. 36-42.