

Điều khiển mờ cân bằng và bám quỹ đạo cho hệ Pendubot

Fuzzy Balancing and Trajectory Tracking Control for Pendubot system

Trần Trọng Bằng*, Tống Phước Anh Huy, Phạm Minh Nhựt, Lê Ngọc Phúc, Đoàn Văn Hiếu, Nguyễn Thành Hải, Nguyễn Lê Đạt Phú, Mã Hiền Khoa, Dương Tấn Thành, Nguyễn Thành Phú

Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP HCM

* 20151093 @student.hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài:

29/8/2023

Ngày chấp nhận đăng:

10/11/2023

Keywords: pendubot; fuzzy control; SIMO system; stabilize control; genetic algorithm.

ABSTRACT

Pendubot is a popular SIMO system in control laboratory to test control algorithms. This paper aims to rebuild a post-processing structure of fuzzy controller, which is a popular intelligent approach, with a goal of not only stabilizing system at TOP and MID positions but also controlling system to track trajectories: sine and pulse. Control parameters are found by GA. Our fuzzy control is proved to work well through Matlab/Simulink simulation.

TÓM TẮT

Pendubot là một hệ thống một vào nhiều ra (single input-multi output – SIMO) thường được sử dụng trong các phòng thí nghiệm (PTN) để kiểm chứng giải thuật điều khiển. Trong bài báo này, chúng tôi xây dựng lại cấu trúc khâu hậu xử lý của bộ điều khiển (BĐK) mờ (fuzzy) – một hướng điều khiển thông minh (ĐKTM) thông dụng- với đích đến không chỉ ổn định tĩnh ở vị trí TOP và MID cho mô hình pendubot mà còn điều khiển hệ thống di chuyển bám theo quỹ đạo cho trước (hình sin và xung vuông). Các thông số BĐK được lựa chọn thông qua giải thuật di truyền (genetic algorithm – GA). Giải thuật mờ được chứng minh đã hoạt động thành công thông qua mô phỏng trên Matlab/Simulink.

Từ khóa: Pendubot; điều khiển Fuzzy; đối tượng SIMO; điều khiển cân bằng, giải thuật di truyền.

1. Đặt vấn đề

Mô hình Pendubot, gọi đầy đủ là Pendulum Robot, là một hệ mô hình chuẩn - cổ điển nhưng đóng vai trò hết sức quan trọng trong việc nghiên cứu giải thuật trong các PTN ĐKTD. Thông qua việc nghiên cứu các giải thuật trên các mô hình chuẩn như pendubot, các sinh viên (SV) sẽ được học hỏi và đào tạo về giải thuật. Trên cơ sở đó, SV có thể áp dụng giải thuật cho các đối tượng trong thực tế khi làm việc, ví dụ như hệ thống cân bằng giàn khoan trên biển, hệ thống cân bằng khi phóng tàu vũ trụ và điều khiển đi đúng quỹ đạo...

Trong tài liệu (Phan Việt Hùng, 2013) tác giả Phan Việt Hùng đã giới thiệu về cấu trúc cơ khí của pendubot. Đây có thể được xem là công trình nghiên cứu đầu tiên của tác giả Việt Nam về cấu trúc dẫn động này. Trong nghiên cứu trên, chưa có giải thuật điều khiển nào được đề ra để ổn định hệ thống này. Giải thuật LQR (Nguyễn Anh Tuấn, 2017) và PID (Trần Hoàng Chinh và cộng sự, 2017) đã điều khiển thành công mô hình trên ở vị trí TOP thông qua thực nghiệm và cả mô phỏng. Giải thuật mờ cũng đã được phát triển thành công (Nguyễn Thành Nguyên và cộng sự, 2019). Nhưng,

ở giải thuật này, việc tạo ra khối mờ là bằng cách dùng công cụ ANFIS để học BDK LQR. Trong nghiên cứu (Nguyễn Thành Nguyên và cộng sự, 2019), BDK LQR có thể được xem là “chuyên gia” điều khiển thành công mô hình pendubot. Việc áp dụng công cụ ANFIS là thụ động, chưa chủ động áp dụng kinh nghiệm chuyên gia hiểu biết hệ thống trong điều khiển. Một phương án chủ động hơn mà nhóm tác giả đề nghị là áp dụng bộ luật mờ vốn được áp dụng sẵn cho hệ SIMO hai bậc – gồm 81 luật (Huỳnh Thái Hoàng, 2006). Bộ luật mờ này vốn được áp dụng thành công cho hệ con lắc ngược quay (rotary inverted pendulum – RIP) trên cả mô phỏng và thực nghiệm (Thi-Thanh-Hoang Le et al, 2018). Tuy vậy, việc áp dụng bộ luật này cho hệ pendubot vẫn là vấn đề bị bỏ ngỏ. Việc điều khiển bám quỹ đạo cho mô hình này bằng giải thuật mờ cũng là một vấn đề mới. Ở nghiên cứu (Vũ Đình Đạt và cộng sự, 2017), việc

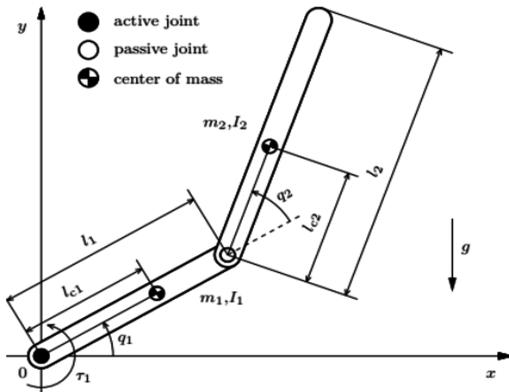
điều khiển bám quỹ đạo hình sine cho đối tượng này đã được thực hiện. Tuy nhiên, trong nghiên cứu đó, giải thuật trượt được áp dụng và trong lý thuyết trượt, việc điều khiển bám quỹ đạo cho hệ thống là không mới do phương pháp này đã được hướng dẫn tính toán kỹ lưỡng theo tài liệu (Đương Hoài Nghĩa, 2013).

Từ những cơ sở như vậy, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả nhận thấy việc điều khiển mờ áp dụng bộ luật mờ kinh điển cho hệ SIMO bên cạnh việc áp dụng các thủ thuật cần thiết để điều khiển bám quỹ đạo cho pendubot là một hướng đi mới. Việc xây dựng BDK và kiểm chứng trên mô phỏng là một hỗ trợ học thuật tốt cho việc thử nghiệm điều khiển mờ và bám quỹ đạo cho hệ SIMO.

2. Phân tích hệ Pendubot

Mô hình hệ Pendubot có dạng như **Hình 1**

Hình 1. Mô hình hệ Pendubot



Từ (Phan Việt Hùng, 2013), hệ phương trình động lực học của hệ Pendubot có thể mô tả như sau:

$$\ddot{q}_1 = \frac{\beta_2 \beta_3 \sin q_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) + \beta_3^2 \cos q_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2 + \beta_3 \beta_5 g \cos q_2 \cos(q_1 + q_2) + \beta_2 \tau_1}{\beta_1 \beta_2 - \beta_3^2 \cos^2 q_2} \quad (1)$$

$$\ddot{q}_2 = \frac{-\beta_3 (\beta_2 + \beta_3 \cos q_2) \sin q_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2) + \beta_3 \beta_5 g \cos q_2 \cos(q_1 + q_2) + \beta_2 \tau_1 + \beta_3^2 \cos q_2 \sin q_2 \dot{q}_1^2}{\beta_1 \beta_2 - \beta_3^2 \cos^2 q_2} \quad (2)$$

Trong đó, ta có: $\beta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$; $\beta_2 = m_2 l_{c2}^2 + I_2$; $\beta_3 = m_2 l_1 l_{c2}$; $\beta_4 = m_1 l_{c1} + m_2 l_1$; $\beta_5 = m_2 l_{c2}$; m_1 là khối lượng của thanh 1 (kg); m_2 là khối lượng của thanh 2 (kg); l_1 là chiều dài của thanh 1 (m); l_2 là chiều dài của thanh 2 (m); l_{c1} là khoảng cách từ gốc đến trọng tâm thanh 1 (m); l_{c2} là khoảng cách từ điểm

Pendubot có cấu tạo gồm 2 thanh liên kết vào nhau trong mặt phẳng bởi 1 khớp nối tự do. Còn gốc thanh 1 thì nối đến 1 động cơ tác động cân bằng 2 thanh tại 2 vị trí có thể điều khiển thực nghiệm được là TOP và MID theo tài liệu (Nguyễn Thành Nguyên và cộng sự, 2019). Vị trí TOP tương ứng 2 thanh đều hướng lên. Vị trí MID tương ứng thanh 1 hướng xuống và thanh 2 hướng lên

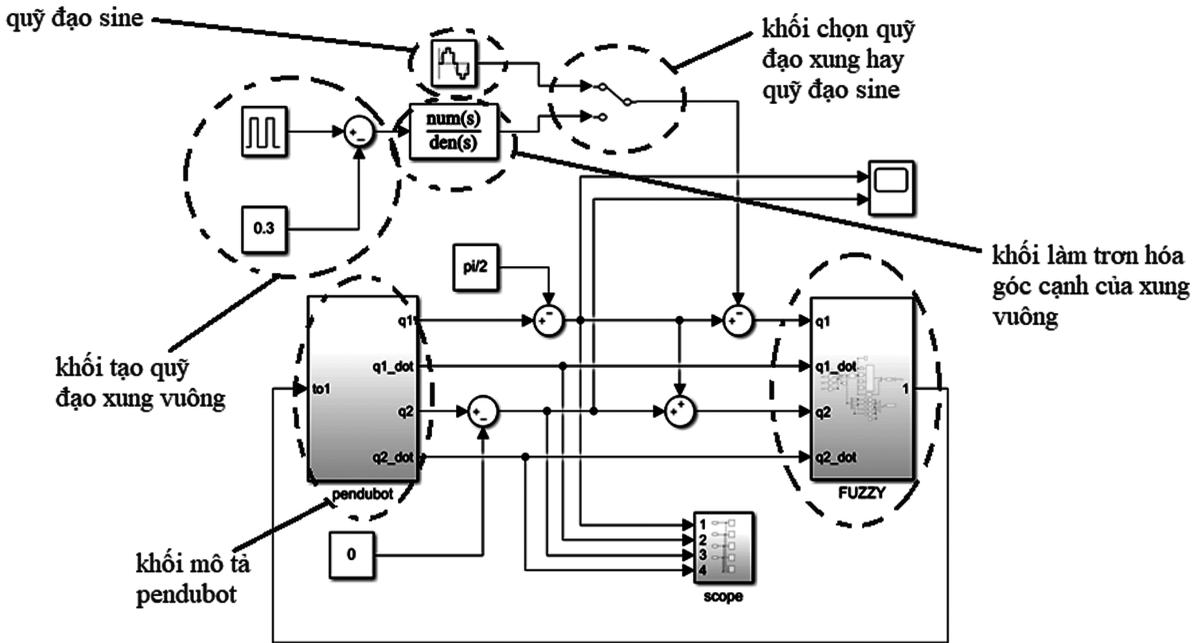
nối tự do đến trọng tâm thanh 2 (m); là mô men quán tính của thanh 1 (kgm^2); là mô men quán tính của thanh 2 (kgm^2); là gia tốc trọng trường (m/s^2).

3. Điều khiển cân bằng Fuzzy hệ Pendubot

Cấu trúc điều khiển mờ cho hệ pendubot được thể hiện ở **Hình 2**. Để BDK tương thích với

Pendubot, chúng tôi quy đổi góc thanh 2 thành góc đứng. Còn góc thanh 1 sẽ dựa vào điểm đặt so với đường thẳng nhằm duy trì thanh 2 thẳng

Hình 2. Tổng quan chương trình mô phỏng điều khiển Fuzzy vị trí Top



Ta có thông số mô hình:

$$m1 = 0.25(kg); m2 = 0.07(kg); l1 = 0.15(m); l2 = 0.25(m); lc1 = 0.055(m); lc2 = 0.149(m); I1 = 0.0189; I2 = 0.000409; g = 9.81(m/s^2) \quad (3)$$

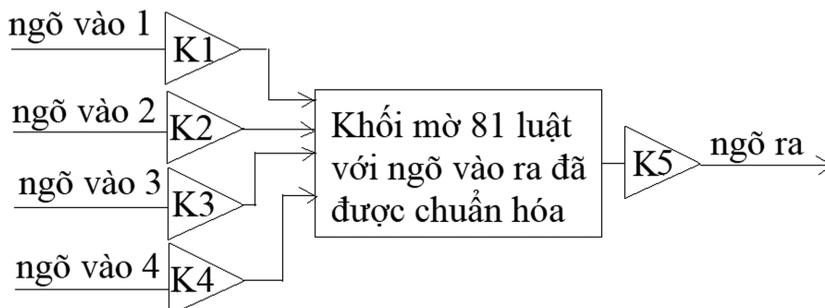
Giá trị ban đầu các biến trạng thái được chọn là

$$q1_{init} = \pi/2 + 0.2; q1_{dot}_{init} = 2; q2_{init} = -0.2; q2_{dot}_{init} = 2 \quad (4)$$

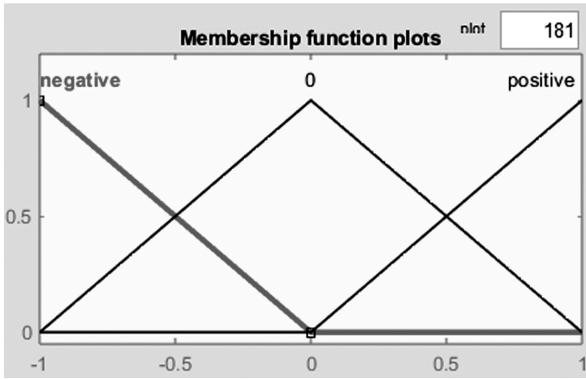
Kế thừa bộ luật mờ từ tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2006) vốn được áp dụng cho RIP, nhóm tác giả tiến hành áp dụng lại khối này cho đối tượng pendubot. Vị trí xe, vận tốc xe, góc con lắc, vận tốc góc con lắc của đối tượng RIP sẽ được chuẩn hóa tương đối thành sai số góc link 1 (q_1) so với quỹ đạo đặt/ vị trí đặt, tốc độ thay đổi của sai số đó, góc thanh 2 so với phương thẳng đứng (q_2) và tốc độ thay đổi của q_2 . Đây là 4 ngõ vào của khối mờ. Ngõ ra của khối mờ là tín hiệu

tác động vào Bảng luật mờ 81 luật (Huỳnh Thái Hoàng, 2006) được áp dụng lại mà không có thay đổi về luật. Các hàm liên thuộc của các ngõ vào được chuẩn hóa về $[-1, 1]$ và được thể hiện ở **Hình 3**. Ngõ ra bộ mờ được chuẩn hóa về $[-1, 1]$ dưới dạng Sugeno và được thể hiện ở **Hình 4**. Việc tinh chỉnh thông số điều khiển sẽ thông qua việc điều khiển các khối tiền xử lí K1, K2, K3, K4 và hậu xử lí K5 của BDK mờ. Cấu trúc BDK mờ được thể hiện ở **Hình 3**.

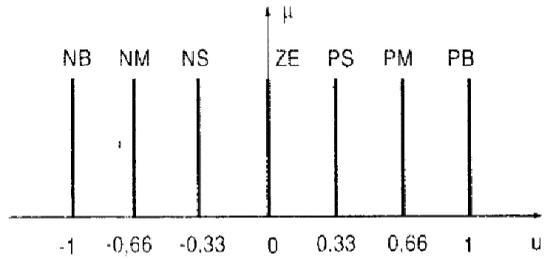
Hình 3. Cấu trúc BDK mờ



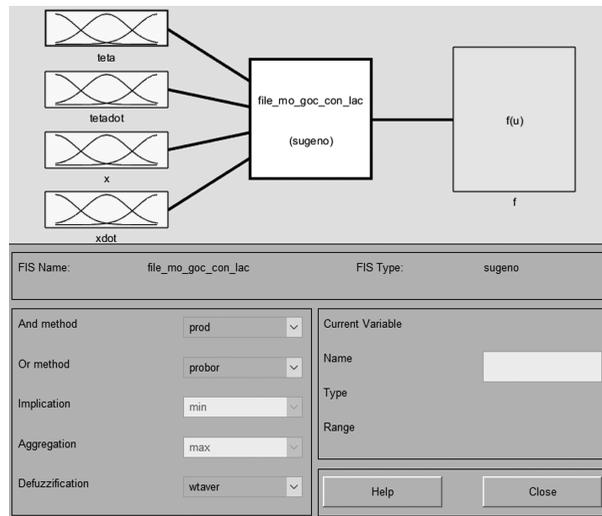
Hình 4. Hàm liên thuộc ngõ vào



Hình 5. Hàm liên thuộc ngõ ra (sugeno)



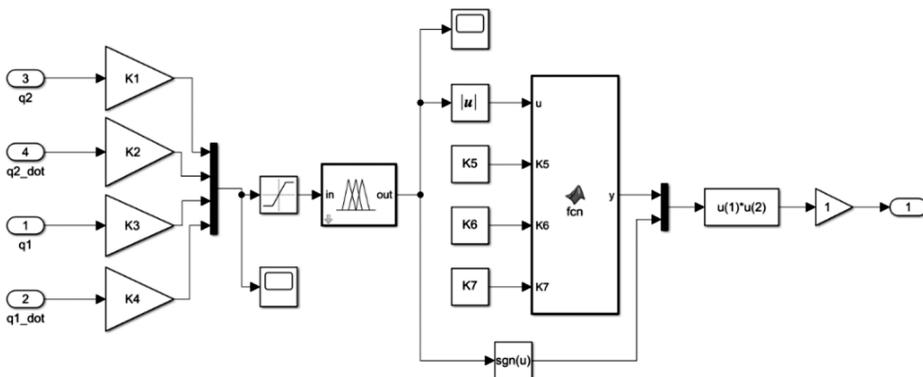
Hình 6. Cài đặt khối điều khiển Fuzzy



Nhằm tạo dạng tín hiệu ngõ ra phù hợp đáp ứng được hệ thống, chúng tôi quyết định tạo ra khâu xử lý mới nhằm tạo ra nhiều giá trị xử lý hơn theo từng trường hợp ngõ ra cho phù hợp. Còn bộ điều khiển trung tâm vẫn giữ theo đề suất của matlab.

Tín hiệu ngõ ra thay vì $[0 \ 0.33 \ 0.66 \ 1]$ chúng tôi sẽ thay bằng $[0 \ K_5 \ K_6 \ K_7]$ và đặt nó ở khâu xử lý theo đúng tỉ lệ ngõ ra từ bộ điều khiển Fuzzy. Cân bằng ở vị trí TOP thì số num ở block gain ngõ ra bằng 1 và ở vị trí MID thì số num bằng -1.

Hình 7. Chương trình mới cho bộ Fuzzy



Ở khâu xử lý, chúng tôi chia ra 4 trường hợp của ngõ ra tín hiệu để hiệu chỉnh cho phù hợp

với hệ phi tuyến nhằm có được giá trị xử lý linh động đáp ứng được theo đúng được từng

trường hợp xảy ra của 81 luật mờ. Thêm nữa, tạo 1 khối rời thay đổi tỉ lệ của các giá trị ngõ ra như

trên còn giúp giải thuật GA có hoạt động được

TH1: Khi $1 \geq u > 0.66$

$$y = (K7 - K6) \cdot \frac{u - 0.66}{1 - 0.66} + K6$$

TH2: Khi $0.66 \geq u > 0.33$

$$y = (K6 - K5) \cdot \frac{u - 0.33}{0.66 - 0.33} + K5$$

TH3: Khi $0.33 \geq u > 0$

$$y = K5 \cdot \frac{u}{0.33}$$

TH4: Khi $u = 0$

$$y = 0$$

Để tìm các hệ số xử lý tiền xử lý và hậu xử lý, nhóm tác giả sử dụng GA theo tài liệu (Huỳnh Thái Hoàng, 2006). Sau 100 thế hệ lai ghép, tìm ra bộ thông số tốt nhất cho vị trí TOP như sau:

$$\begin{aligned} K1=2.2580; K2=0.2701; K3=0.4300; & \quad (5) \\ K4=0.4188; K5=56.6000; \\ K6=849.5000; K7=870.7000 \end{aligned}$$

Đối với vị trí MID, 4 thông số ngõ vào cần nhân cho -1 trước khi đến bộ điều khiển để đúng với phương trình động học. Đồng thời, bộ thông số điều khiển cũng khó tìm hơn. Sau 200 thế hệ lai ghép, bộ thông số phù hợp được tìm ra là:

$$\begin{aligned} K1=4.1520; K2=0.0393; K3=1.3070; & \quad (6) \\ K4=0.4806; K5=7.0000; \\ K6=270.0000; K7=279.4000 \end{aligned}$$

Lưu ý: điều kiện là $K7 > K6 > K5 > 0$ thì bộ thông số mới có nghĩa và đảm bảo chất lượng nhất.

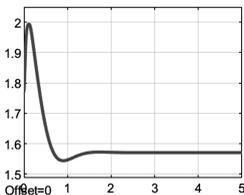
4. Kết quả mô phỏng

4.1. Điểm đặt ở vị trí TOP và MID:

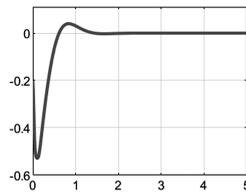
Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 8 đến Hình 11 khi điều khiển mờ ổn định tại chỗ ở vị trí MID với bộ thông số (6) và vị trí TOP với bộ thông số (5).

CHÚ THÍCH: Ở vị trí làm việc tĩnh chúng tôi để góc thanh 1 ở quanh giá trị gốc để miêu tả đúng vị trí TOP và MID. Nhưng khảo sát bám quỹ đạo góc thanh 1 sẽ được tinh chỉnh về quanh điểm 0 nhằm mô tả được khả năng bám các dạng tín hiệu đặt.

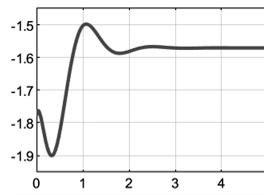
Hình 8. Góc thanh 1 ở vị trí TOP (rad)



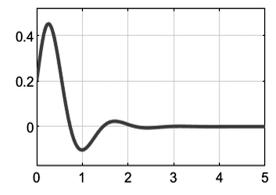
Hình 9. Góc thanh 2 ở vị trí TOP (rad)



Hình 10. Góc thanh 1 ở vị trí MID (rad)



Hình 11. Góc thanh 2 ở vị trí MID (rad)

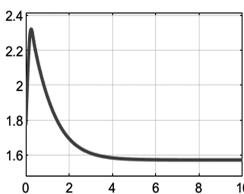


Ở Hình 8 Error! Reference source not found. và Hình 9, thanh 1 và 2 mất gần 2 giây để hệ thống về được vị trí TOP. Sai số xác lập là 0 (thanh 1 tạo góc $\pi/2$ rad, tức thẳng đứng hướng lên và thanh 2 tạo góc 0 rad, tức thẳng đứng hướng lên). Ở Hình 10 và Hình 11, thanh 1 và 2 mất thời gian lâu hơn để đến vị trí ổn định MID (3 giây). Sai

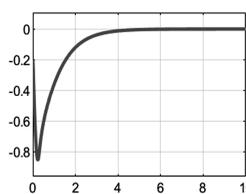
số xác lập của 2 thanh là 0. Như vậy, BDK mờ với các thông số điều khiển được phân loại phù hợp cho từng vị trí làm việc (MID và TOP) đã hoạt động tốt.

Chúng tôi đồng thời khảo sát thêm bộ điều khiển LQR với cùng mô hình và trạng thái ban đầu nhằm để so sánh được sự vượt trội của bộ điều khiển FUZZY.

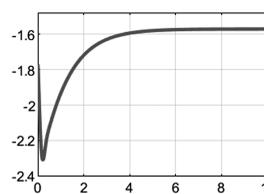
Hình 12. Góc thanh 1 ở vị trí TOP (rad)



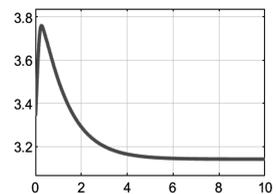
Hình 13. Góc thanh 2 ở vị trí TOP (rad)



Hình 14. Góc thanh 1 ở vị trí MID (rad)



Hình 15. Góc thanh 2 ở vị trí MID (rad)



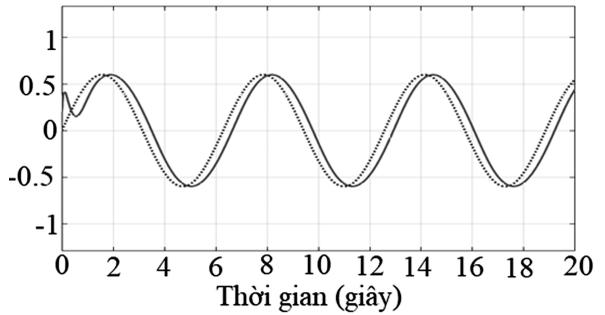
Có thể thấy giải thuật LQR dựa vào phương trình toán học kết hợp giải phương trình Riccati nên hệ hoạt động rất mượt đều. Nhưng xét về mặt xây dựng bộ điều khiển thì LQR yêu cầu hiểu rõ phương trình toán học và cách tính toán khá phức tạp. Về phần chất lượng khi hoạt động thì cả 2 đều tồn tại vọt lố nhưng LQR vọt lố cao hơn FUZZY 10% theo khảo sát trên. Về thời gian xác lập thì FUZZY có nhanh hơn nhưng không đáng kể nên có thể xem là gần như bằng nhau.

4.2. Bám quỹ đạo dạng sóng sine vị trí TOP

Ở vị trí TOP, ta tiến hành điều khiển mờ bám quỹ đạo hình sine (tức thanh 1 di chuyển dạng sóng sine quanh vị trí TOP trong khi thanh 2 vẫn hướng lên). Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 16 đến Hình 20. Dạng sóng sine được chọn

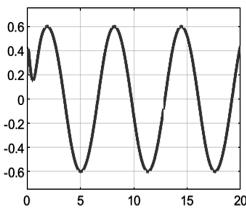
có biên độ 0.6 rad và chu kỳ 6.2 giây.

Hình 16. Góc thanh 1 (rad) (màu đỏ) và quỹ đạo đặt sóng sin (màu xanh nét đứt)

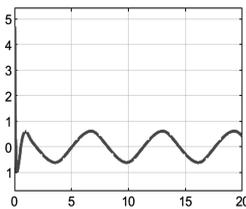


Ở Hình 16, ta thấy thanh 1 dao động bám được với quỹ đạo đặt với cùng biên độ, tần số nhưng bị trễ 0.2 giây so với quỹ đạo đặt. Như vậy, thanh 1 đã bám được quỹ đạo thành công.

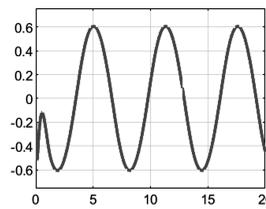
Hình 17. Góc thanh 1



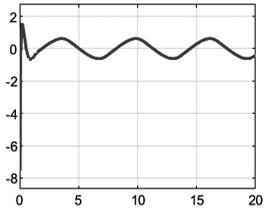
Hình 18. Vận tốc góc thanh 1



Hình 19. Góc thanh 2



Hình 20. Vận tốc góc thanh 2



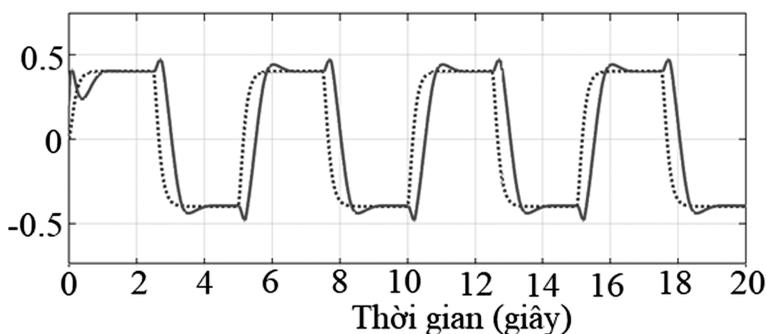
Ở Hình 17 và Hình 19 cho thấy cùng với sự dao động của thanh 1 thì thanh 2 cũng không đứng yên hoàn toàn mà dao động quanh vị trí 0. Vì với sự dao động của thanh 2 khi thanh 1 bám quỹ đạo cũng là cần thiết để toàn hệ thống cân bằng. Việc dao động của thanh 2 cũng chỉ quanh vị trí cân bằng hướng lên với biên độ góc ở thanh 1 là 0.6 rad quanh vị trí 0.

4.3. Bám quỹ đạo dạng sóng xung vuông vị trí TOP

Tiếp theo, nhóm tác giả khảo sát BDK mờ với điều khiển quỹ đạo sóng vuông. Sóng vuông ở đây đã được bo tròn các góc cạnh để tránh hiện

tượng chuyển đổi quá đột ngột của biến trạng thái. Biên độ xung vuông là 0.5 rad, chu kỳ được chọn là 5 giây. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 21 đến Hình 25. Ở Hình 21, thanh 1 bám tốt giá trị đặt với sai số xác lập bằng 0. Độ dao động ban đầu là 0.1 rad so với quỹ đạo đặt. Thời gian xác lập là khoảng 0.4 giây. Như vậy, BDK mờ đã điều khiển thành công hệ pendubot bám quỹ đạo xung tại vị trí TOP. Bên cạnh đó, các biến trạng thái cũng được thể hiện ở Hình 22 đến Hình 25. Đáp ứng hệ thống khi bám xung vuông là kém hơn so với bám quỹ đạo sine là điều dễ nhận ra vì xung vuông chuyển trạng thái đột ngột với biên độ lớn nên việc có vọt lố là không thể tránh khỏi.

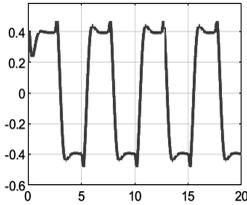
Hình 21. Góc thanh 1 (rad) (màu đỏ nét liền) và điểm đặt xung vuông (màu xanh nét đứt)



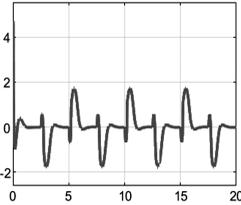
Hình 24 cho thấy góc thanh 2 luôn được duy trì ngược lại với góc thanh 1 khi thanh 1 bám quỹ đạo. Độ dao động là từ -0.4 rad đến 0.4

rad. Như vậy, BDK mờ đã điều khiển thành công hệ pendubot quanh vị trí làm việc MID.

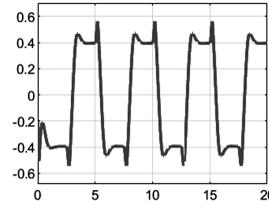
Hình 22. Góc thanh 1



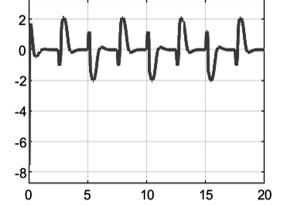
Hình 23. Vận tốc góc thanh 1



Hình 24. Góc thanh 2



Hình 25. Vận tốc góc thanh 2

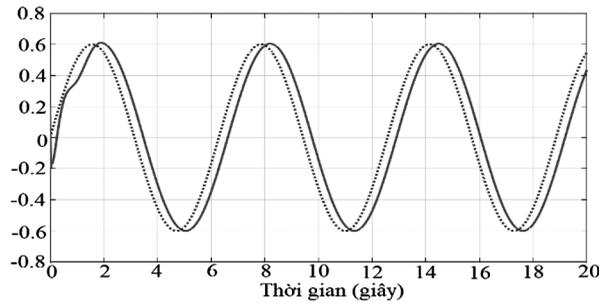


4.4. Bám quỹ đạo dạng sóng sine vị trí MID

Ở vị trí MID, ta tiến hành điều khiển mờ bám quỹ đạo hình sine (tức thanh 1 di chuyển hướng xuống, dao động theo dạng sóng sine quanh vị trí

MID trong khi thanh 2 vẫn duy trì hướng lên). Kết quả mô phỏng được thể hiện ở **Hình 26** đến **Hình 30**. Dạng sóng sine được chọn có biên độ 0.6 rad và chu kỳ 6.2 giây.

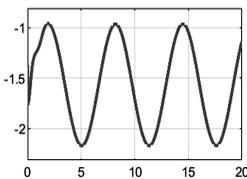
Hình 26 . Góc thanh 1 (rad) (màu đỏ nét liền) và điểm đặt xung vuông (màu xanh nét đứt)



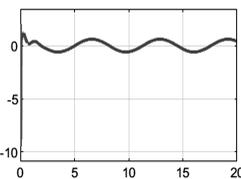
Tương tự vị trí TOP bám quỹ đạo sine thì ở vị trí MID các biên trạng thái rất ổn định bám sát

theo dao động sine được đặt ra ở thanh 1.

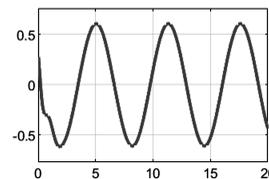
Hình 27. Góc thanh 1



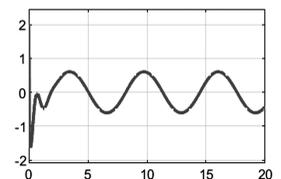
Hình 28. Vận tốc góc thanh 1



Hình 29. Góc thanh 2



Hình 30. Vận tốc góc thanh 2

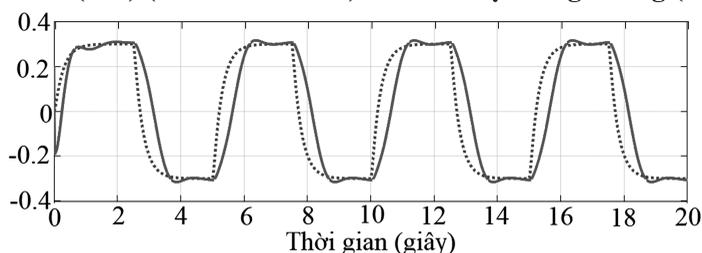


4.5. Bám quỹ đạo dạng sóng xung vuông vị trí MID

BDK mờ tiếp tục được áp dụng để điều khiển góc thanh 1 bám sóng xung vuông có biên độ 0.3 rad, chu kỳ 5 giây. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 31 đến Hình 35. Kết quả điều

khiển ở Hình 31 cho thấy góc thanh 1 bám quỹ đạo với sai số xác lập bằng 0, thời gian xác lập ngắn hơn so với vị trí TOP và vọt lố ít hơn hẳn. Bên cạnh đó, góc thanh 2 cũng bám quanh giá trị 0 (cân bằng hướng lên) với biên độ dao động 0.3 rad.

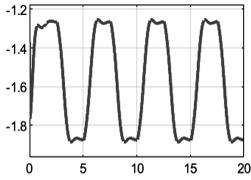
Hình 31 . Góc thanh 1 (rad) (màu đỏ nét liền) và điểm đặt xung vuông (màu xanh nét đứt)



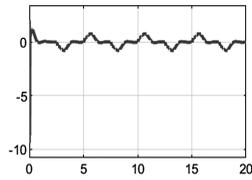
Có thể nhận thấy tuy xung vuông khó để bám hơn nhưng ở vị trí MID thì hệ lại bám quỹ

đạo rất tốt với sai số xác lập thấp và vọt lố thấp.

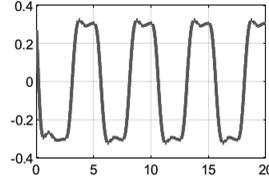
Hình 32. Góc thanh 1



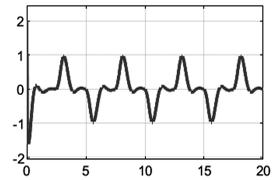
Hình 33. Vận tốc góc thanh 1



Hình 34. Góc thanh 2



Hình 35. Góc thanh 2 ở vị trí MID (rad)



Thông qua **Hình 34** và **Hình 35**, BDK mờ cũng đã chứng minh việc điều khiển thành công việc bám quỹ đạo sóng xung vuông tại vị trí MID cho pendubot.

5. Kết luận

Trong bài báo này, một cấu trúc điều khiển mờ bám quỹ đạo đã được giới thiệu để điều khiển thành công bám quỹ đạo cho pendubot trong trường hợp vị trí MID và TOP của hệ thống. Các quỹ đạo được khảo sát là xung vuông và song sine. Một trường hợp riêng của điều khiển bám quỹ đạo (trường hợp biên độ dao động bằng 0) cũng được kiểm tra và cho kết quả điều khiển thành công. Như vậy, một BDK mờ có cấu trúc 81 luật ổn định tại chỗ vẫn có thể được áp dụng cho điều khiển bám quỹ đạo với một số thay đổi trong cấu trúc mờ là khả thi và được chứng minh thông qua mô phỏng. Thời gian sát lập qua mô phỏng cho thấy thậm chí còn ổn định và nhanh hơn so với bộ điều khiển tối ưu LQR (Nguyễn Anh Tuấn, 2017), một giải thuật điều khiển thường được đánh

giá khá cao hơn. Chất lượng điều khiển phụ thuộc lớn vào quá trình tìm kiếm thông số điều khiển. Một gợi ý được đưa ra trong bài báo này là áp dụng giải thuật GA. Hướng đi này cũng được chứng minh là khả thi thông qua kết quả mô phỏng ở nhiều trường hợp. Một số hướng đi có thể phát triển sau nghiên cứu này là áp dụng BDK này trên pendubot thực nghiệm, phát triển tối ưu hóa thông số thông qua các giải thuật tìm kiếm khác, phát triển cấu trúc bám quỹ đạo phù hợp hơn, hoặc khảo sát thêm các trường hợp quỹ đạo phức tạp hơn.

Lời cảm ơn

Bài báo là sản phẩm thuộc đề tài nghiên cứu khoa học sinh viên năm 2024 được tài trợ kinh phí bởi trường Đại học Sư phạm kỹ thuật TPHCM (HCMUTE). Trong quá trình làm việc, nhóm cũng được sử dụng dẫn tận tình của TS. Nguyễn Văn Đông Hải, ThS. Lê Thị Thanh Hoàng, ThS. Lê Thị Hồng Lam (khoa Điện – HCMUTE). Nhóm tác giả xin cảm ơn các sự hỗ trợ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Dương Hoài Nghĩa. (2013). Hệ thống điều khiển đa biến. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TPHCM.
- Huỳnh Thái Hoàng. (2006). Hệ thống điều khiển thông minh. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia TPHCM.
- Nguyễn Anh Tuấn. (2017). Xây dựng giải thuật điều khiển trượt Swing up và cân bằng LQR hệ pendubot. Đại học Bách Khoa.
- Nguyễn Thành Nguyên và cộng sự. (2019). Điều khiển hệ Pendubot sử dụng dạng toàn phương tuyến tính dựa trên logic mờ. Tạp chí Đồng Tháp (38), 89-93.
- Phan Việt Hùng. (2013). Nghiên cứu điều khiển cánh tay robot thiếu dẫn động hai bậc tự do – Pendubot. Trường Đại học Đà Nẵng.
- Thi-Thanh-Hoang Le et al. (2018). Fuzzy Controller for a Rotary Inverted Pendulum. *International Journal of Robotica & Management*, 23(2), 16-20.
- Trần Hoàng Chinh và cộng sự. (2017). Ứng dụng điều khiển PID-Mờ cho hệ pendubot. *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật* (44A), 61-67.
- Vũ Đình Đạt và cộng sự. (2017). Phương pháp điều khiển mờ-trượt Cho hệ Pendubot. *Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 11 (120.1), 12-16.