

Điều Khiển PID Cho Hệ Bóng Trên Bánh Xe: Mô Phỏng và Thực Nghiệm

PID control for Ball on Wheel: Simulation and Experiment

Võ Đình Tuấn¹, Nguyễn Ngọc Sơn¹, Nguyễn Hải Thanh², Nguyễn Trường Thịnh¹, Phan Phước Long¹, Từ Quốc Hùng¹, Nguyễn Minh Hiếu¹, Đỗ Văn Tùng¹

¹ Khoa Đào tạo Chất lượng cao, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành Phố Hồ Chí Minh (HCMUTE), TPHCM, Việt Nam

² Trường Trung cấp Kinh tế- Kỹ thuật Nguyễn Hữu Cảnh, TPHCM, Việt Nam

Tác giả liên hệ: Võ Đình Tuấn; Email: 19151195@student.hcmute.edu.vn

Tóm tắt: Hệ bóng trên bánh xe (ball on wheel – BW) là một mô hình mới, được phát triển gần đây của ngành điều khiển tự động (ĐKTĐ). Đây là một mô hình đơn giản, đáp ứng được nhu cầu học tập, nghiên cứu về giải thuật cho sinh viên (SV). Trong bài báo này, chúng tôi xây dựng một mô hình cơ khí cho hệ thống trên. Một giải thuật PID được thiết kế cho hệ này. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm thông qua giải thuật trên được chứng minh hoạt động tốt cho hệ thống bóng trên bánh xe. Bên cạnh đó, các thử nghiệm tinh chỉnh thông số cũng được kiểm tra và xác nhận là phù hợp với lý thuyết tinh chỉnh PID.

Từ khóa: bóng trên bánh xe; điều khiển PID; điều khiển cân bằng

Abstract: Ball on wheel is a new model which is recently developed in control engineering. This is a simple model satisfying requirement of learning and researching algorithms of students. In this paper, we present an electrical-mechanical structure for this model. A method of PID is designed for this model. Simulation and experimental results show the success of this method. Besides, calibrations of parameters are done to confirm the exactness of PID theory.

Keywords: Ball on Wheel; balance control; PID control

1. Đặt vấn đề

Trong chuyên ngành ĐKTĐ, các giải thuật được nghiên cứu, thử nghiệm để đúc kết và kiểm chứng các quy luật điều khiển. Các mô hình chuẩn như con lắc ngược [1], bóng thanh [2] là những mô hình thông thường cho việc nghiên cứu trong ĐKTĐ. Tuy nhiên, các mô hình cũng cần được mở rộng để việc nghiên cứu giải thuật được kiểm chứng cho các loại mô hình khác nhau. Một trong những mô hình được phát triển là hệ BW. Đối với hệ này, một bánh xe được gắn động cơ để quay theo phương thẳng đứng. Trên bánh xe là một quả bóng. Việc quay bánh xe để đảm bảo quả bóng không ngã. Ta có thể xem đây là một hệ một vào- một ra (single input-single output -SISO) nếu chỉ

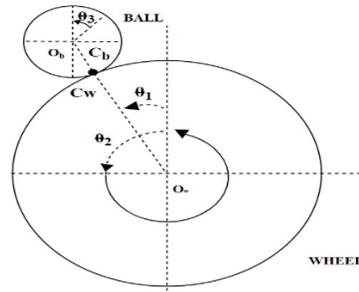
vị trí quả bóng được quan tâm. Ta cũng có thể xem BW là một hệ một vào-nhiều ra (single input-multi output - SIMO) nếu cả góc quay bánh xe và vị trí quả bóng đều được quan tâm. Việc nghiên cứu và thực nghiệm các giải thuật cơ bản trên mô hình này giúp chuẩn hóa mô hình. Từ đó, với mô hình phù hợp, đã được kiểm chứng, các SV có thể học về các BDK cơ bản như PID, LQR, mờ... hoặc tiếp tục nghiên cứu các giải thuật nâng cao. Việc thực hiện thành công giải thuật trên mô hình sẽ giúp SV hiểu và vận dụng các giải thuật đã thực tập trên BW sang các đối tượng thực tế khác tương tự - hệ thống cân bằng cho tàu thủy, hệ thống chống rung động cho nhà cao tầng - trong cuộc sống. Bên cạnh đó, với các mô hình đơn giản đã được kiểm

chứng, các giải thuật được nghiên cứu phát triển để có thể đóng góp thêm cho học thuật mang tính cơ bản mà chi phí là không quá lớn.

Trong nghiên cứu [3], một mô hình cơ khí BW được xây dựng để khảo sát điều khiển trên cả mô phỏng và thực nghiệm. Tuy nhiên, vì xử lý được áp dụng trong nghiên cứu là DSP, rất mắc tiền và khó được trang bị cho các phòng thí nghiệm (PTN) mang tính mở cho SV. Ở tài liệu [4], một giải thuật điều khiển trượt (sliding mode control – SMC) được trình bày và đã áp dụng tốt trên mô phỏng cho BW. Tuy nhiên, kết quả trên chỉ được xác minh qua mô phỏng chứ chưa được kiểm chứng thông qua thực nghiệm. Do đó, một mô hình thực nghiệm đơn giản, nhưng có thể được dùng để kiểm chứng thành công giải thuật điều khiển là vẫn rất cần thiết. Arduino là một board điều khiển tích hợp rẻ tiền, phổ biến [5]. Cộng đồng hỗ trợ và sử dụng Arduino rất mạnh mẽ. Do đó, việc phát triển các giải thuật điều khiển đơn giản như LQR, PID được kiểm chứng trên cả mô phỏng và thực nghiệm là một hướng đi phổ quát và phù hợp cho đào tạo.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi xây dựng một mô hình thực nghiệm BW cho PTN ĐKTĐ của HCMUTE. Trên cơ sở mô hình toán và thực nghiệm, chúng tôi áp dụng giải thuật PID cho hệ thống này vì đây là một giải thuật thông dụng trong hoạt động học thuật và sản xuất [6]. Kết quả mô phỏng cho thấy BDK hoạt động tốt. Bên cạnh đó, kết quả thực nghiệm cũng cho thấy tính khả thi của giải thuật này. Một số khảo sát cũng cho thấy vấn đề tinh chỉnh trên mô phỏng và thực nghiệm là phù hợp với lý thuyết tinh chỉnh PID.

2. Phương trình toán học



Hình 1. Mô hình toán học của BW

Bảng 1. Bảng thông số mô hình

Tham số	Giá trị
Quán tính bánh xe I_w	$1.71 \times 10^{-3} \text{ kg-m}^2$
Bán kính bánh xe R_w	0.075 m
Khối lượng bóng m_b	0.059 kg
Bán kính bóng R_b	0.03125 m
Điện trở động cơ R_a	0.6558 Ω
Hằng số động cơ K_m	0.0662 N-m/A
Gia tốc trọng trường g	9.81 m/s ²

Dạng phương trình Euler – Lagrange của mô hình là:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \tag{1}$$

Trong đó, $Q = [0 \quad \tau]^T$ là hàm tổng quát lực, q là tọa độ tổng quát, L là toán tử Lagrangian $L = T - V$; T là động năng V là thế năng, $q = [\theta_1 \quad \theta_2]^T$; θ_1 là góc chuyển giữa trục y và đường đi qua tâm của quả bóng và bánh xe; θ_2 là độ dịch chuyển góc của bánh xe; là mômen xoắn tác dụng lên bánh xe,

Động lượng của quả bóng là:

$$T_b = \frac{1}{2} m_b (r_w + r_b)^2 \theta_1^2 + \frac{1}{2} I_b \theta_3^2 \tag{2}$$

Trong đó, $I_b = 2 m_b r_b^2 / 5$

Động năng bánh xe là:

$$T_{\omega} = I_{\omega} \dot{\theta}_2^2 / 2 \quad (3)$$

Tổng động năng của hệ là :

$$T = T_{\omega} + T_b = \frac{1}{2} I_{\omega} \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_b (r_{\omega} + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{5} m_b r_b^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \quad (4)$$

Khi ta quay đĩa và đặt quả bóng trên đĩa, quan sát từ hệ quy chiếu, ta có:

$$V_{C_{\omega}/O_{\omega}} = \dot{\theta}_2 r_{\omega} e \quad (5)$$

Trong đó, V_{C_w/O_w} biểu thị vận tốc của điểm tiếp xúc C_w so với tâm bánh xe O_w , e là một vector đơn vị tiếp tuyến với tiếp điểm và tăng theo chiều dương của θ_2 , V_{C_b/O_b} biểu thị vận tốc của điểm tiếp xúc C_b so với tâm quả bóng O_b được quan sát từ hệ thống cố định. Được biểu hiện bằng công thức:

$$V_{C_b/O_b} = \dot{\theta}_3 r_b e \quad (6)$$

Giả sử quả bóng lăn không trượt, tiếp điểm C_b đứng yên tức thời so với tiếp điểm O_b . Ta có vận tốc của hai điểm tiếp xúc trên là :

$$V_{C_b/C_{\omega}} = 0. \quad (7)$$

Dựa vào mô hình toán học trên hình ta rút được vận tốc của tâm quả bóng đến tâm bánh xe tương đối là:

$$V_{O_b/O_{\omega}} = \dot{\theta}_1 (r_{\omega} + r_b) e \quad (8)$$

Từ (6) và (7), ta thu được:

$$V_{O_b/O_{\omega}} = V_{O_b/C_b} + V_{C_b/C_{\omega}} + V_{C_{\omega}/O_{\omega}} = -\dot{\theta}_3 r_b e + \dot{\theta}_2 r_{\omega} e \quad (9)$$

Ta lại có điều kiện lăn từ hai phương trình (8), (9):

$$r_{\omega} \dot{\theta}_2 - (r_{\omega} + r_b) \dot{\theta}_1 = r_b \dot{\theta}_3 \quad (10)$$

Một lưu ý là ta không thể đo trực tiếp $\dot{\theta}_3$. Để kiểm soát phản hồi ta có thể thu $\dot{\theta}_3$ từ (10) về độ chính xác của $\dot{\theta}_1$ và $\dot{\theta}_2$. Viết lại (4), ta có

$$T = I_{\omega} \dot{\theta}_2^2 / 2 + m_b (r_{\omega} + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 / 2 + m_b (r_{\omega} \dot{\theta}_2 - r_{\omega} \dot{\theta}_1 - r_b \dot{\theta}_1)^2 / 5 \quad (11)$$

Thế năng hệ thống là:

$$V = m_b g (r_{\omega} + r_b) \cos \theta_1 \quad (12)$$

Toán tử Lagrangian là:

$$L = T - V = \frac{1}{2} I_{\omega} \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_b (r_{\omega} + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{5} m_b (r_{\omega} \dot{\theta}_2 - r_{\omega} \dot{\theta}_1 - r_b \dot{\theta}_1)^2 - m_b g (r_{\omega} + r_b) \cos \theta_1 \quad (13)$$

Ta có:

$$\partial L / \partial \theta_1 = m_b G (r_{\omega} + r_b) \sin \theta_1 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = \left(-\frac{7}{5} r_{\omega}^2 m_b + \frac{14}{5} r_{\omega} r_b m_b + \frac{7}{5} r_b^2 m_b \right) \dot{\theta}_1 + \left(-\frac{2}{5} r_{\omega}^2 m_b - \frac{2}{5} r_{\omega} r_b m_b \right) \dot{\theta}_2 \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = \left(\frac{7}{5} r_{\omega}^2 m_b + \frac{14}{5} r_{\omega} r_b m_b + \frac{7}{5} r_b^2 m_b \right) \ddot{\theta}_1 + \left(-\frac{2}{5} r_{\omega}^2 m_b - \frac{2}{5} r_{\omega} r_b m_b \right) \ddot{\theta}_2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \quad (17)$$

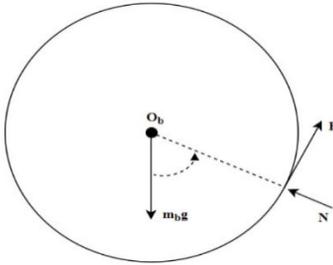
$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \left(-\frac{2}{5}r_\omega^2 m_b - \frac{2}{5}r_\omega r_b m_b \right) \dot{\theta}_1 + \left(I_\omega + \frac{2}{5}r_\omega^2 m_b \right) \dot{\theta}_2 \quad (18)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = \left(-\frac{2}{5}r_\omega^2 m_b - \frac{2}{5}r_\omega r_b m_b \right) \ddot{\theta}_1 + \left(I_\omega + \frac{2}{5}r_\omega^2 m_b \right) \ddot{\theta}_2 \quad (19)$$

Từ (14) đến (19), hệ động lực của BW ở (1) được viết lại là

$$(7r_b + 7r_\omega) \ddot{\theta}_1 - 2r_\omega \ddot{\theta}_2 - 5\delta \sin \theta_1 = 0 \quad (20)$$

$$\left(-\frac{2}{5}(2r_\omega^2 m_b) \right) \ddot{\theta}_1 - \left(\frac{2}{5}(2r_\omega r_b m_b) \right) \ddot{\theta}_1 + \left(I_\omega + \frac{2}{5}(2r_\omega^2 m_b) \right) \ddot{\theta}_2 = \tau \quad (21)$$



Hình 2. Mô hình toán bóng lăn tự do trên bánh xe (đĩa)

Ta nhận thấy công thức (24), và (25) chỉ đúng khi lực hướng tâm đủ lớn để duy trì chuyển động tròn của quả bóng trên đĩa. Nếu không, quả bóng có thể rời khỏi đĩa. Theo định luật III Newton, phương trình lực cho hướng xuyên tâm là:

$$m_b \delta \cos \theta_1 - N = m_b (r_\omega + r_b) \dot{\theta}_1^2 \quad (22)$$

Trong đó, N là phản lực. Lực cung cấp từ $m_b \delta \cos \theta_1 - N$ là cần thiết để duy trì chuyển động của quả bóng trên đĩa, quả bóng rời khỏi đĩa khi $N = 0$, vì vậy để duy trì quả bóng trên đĩa thì :

$$N = m_b \delta \cos \theta_1 - m_b (r_\omega + r_b) \dot{\theta}_1^2 > 0 \quad (23)$$

Do hệ số ma sát nhớt không đáng kể, mô

hình động cơ được đưa ra theo công thức (theo tài liệu [7]):

$$\tau = K_m u / R_a - K_m^2 \dot{\theta}_2 / R_a \quad (24)$$

Trong đó, τ là mômen điều khiển, θ là góc quay của động cơ, u là điện áp cấp cho động cơ, K_m là hằng số động cơ và R_a là điện trở phần ứng động cơ, Vector trạng thái được định nghĩa là:

$$x = [x_1 x_2 x_3 x_4]^T = [\theta_1 \dot{\theta}_1 \theta_2 \dot{\theta}_2]^T \quad (25)$$

Từ công thức (20), (21) và (24), kết hợp với việc đặt biến trạng thái theo như (25), không gian trạng thái của hệ BW có thể được viết là:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad (26)$$

Trong đó:

$$f(x) = [x_2 \quad ax_4 + b \sin x_1 \quad x_4 \quad px_4 + q \sin x_1]^T ;$$

$$g(x) = [0 \quad c \quad 0 \quad r]^T ;$$

$$a = -\frac{2r_\omega K_m^2}{R_a (7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)(r_b + r_\omega)} ;$$

$$b = \frac{\delta(5I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)}{(7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)(r_b + r_\omega)} ;$$

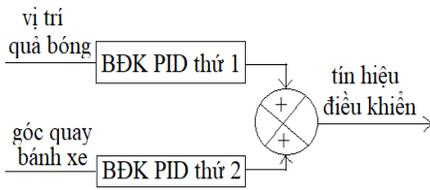
$$c = \frac{2r_\omega K_m}{R_a (7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)(r_b + r_\omega)} ;$$

$$p = -\frac{7K_m^2}{R_a (7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)} ; \quad q = \frac{2\delta r_\omega m_b}{7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b} ;$$

$$r = \frac{7K_m}{R_a (7I_\omega + 2r_\omega^2 m_b)} ; \quad ar = cp.$$

3. Giải thuật điều khiển PID

Trong nghiên cứu này, giải thuật PID được áp dụng. Nếu ta xem hệ BW là SIMO- với ngõ vào là điện áp cấp cho động cơ, hai ngõ ra lần lượt là góc quay bánh xe và vị trí quả banh- thì một cấu trúc điều khiển PID được sử dụng như ở Hình 3



Hình 3. Cấu trúc điều khiển PID cho BW

Trong Hình 3, tín hiệu điều khiển là tín hiệu điện áp cấp cho hệ thống.

4. Mô phỏng

Trong mô phỏng (bằng Matlab), chúng tôi dùng giải thuật di truyền (genetic algorithm –GA) để tìm các thông số PID. Để việc tìm kiếm được nhanh hơn, thông số K_i được chọn bằng 0. Khi đó, các thông số được tìm ra như sau (ta gọi đây là trường hợp (TH)1):

$$K_{p1}=4031, K_{d1}=1275, K_{i1}=0 \text{ và } K_{p2}=-0.5, K_{d2}=-4.2, K_{i2}=0 \quad (27)$$

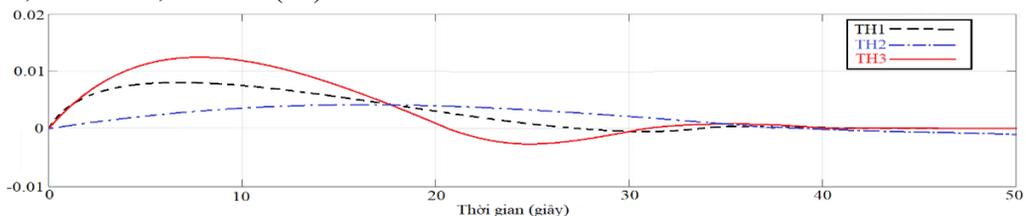
Thông qua Hình 4 và Hình 5, BĐK PID đã điều khiển thành công hệ BW tại vị trí cân bằng. Trên cơ sở thông số của TH1 ở bộ thông số (27), ta xét 2 TH tiếp theo như sau:

- TH2: Thông số K_p được chọn nhỏ hơn so với ở công thức (27), các thông số K_i và K_d được giữ nguyên:

$$K_{p1}=3900, K_{d1}=1275, K_{i1}=0 \text{ và } K_{p2}=-0.2, K_{d2}=-4.2, K_{i2}=0 \quad (28)$$

- TH3: Thông số K_d được chọn lớn hơn so với công thức (27), các thông số khác được giữ nguyên:

$$K_{p1}=4031, K_{d1}=1300, K_{i1}=0 \text{ và } K_{p2}=-0.5, K_{d2}=-6.0, K_{i2}=0 \quad (29)$$



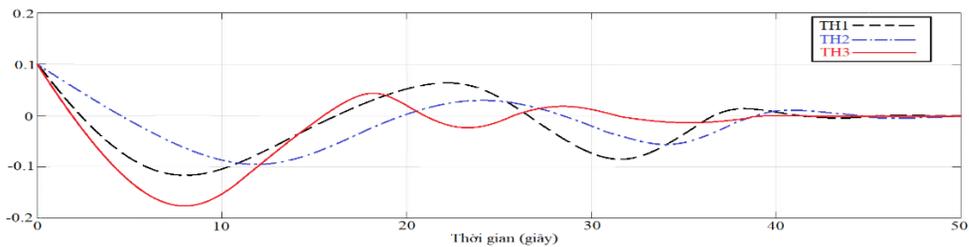
Hình 4. Góc lệch bánh xe so với vị trí chuẩn (rad)

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 4 và Hình 5.

Ta nhận thấy, việc tăng K_p (ở (28) so với (27)), góc lệch bánh xe giảm đi hẳn sự dao động ban đầu (từ 0.007 rad xuống còn 0.004 rad ở Hình 4) nhưng thời gian xác lập bị kéo dài ra (từ 42s tăng lên thành trên 50s ở Hình 4). Tương ứng, sự dao động của vị trí quả bóng cũng giảm từ 0.18 rad (về phía âm) sang 0.11 rad (về phía âm) ở Hình 5. Đồng thời, thời gian xác lập của quả bóng cũng tăng từ 45s sang 48s ở Hình 5. Như vậy, việc tăng K_p đã làm tăng dao động (vọt lố) nhưng giảm được thời gian xác lập. Điều này là phù hợp với lý thuyết tinh chỉnh K_p .

Việc giảm K_d (ở (29) so với (27)) làm cho góc bánh xe dao động mạnh hơn (tăng vọt lố) từ 0.007 rad sang 0.012 rad) và thời gian xác lập cũng dài hơn (từ 48s so với 45s) (ở Hình 4). Tương ứng, quả bóng dao động nhiều hơn (0.18 rad về phía âm so với 0.12 rad về phía âm) và tốn thời gian lâu hơn để ổn định (48s so với 40s) (ở Hình 5). Như vậy, việc giảm K_d cũng giống với việc tăng K_p : tăng vọt lố nhưng giảm được thời gian xác lập. Điều này là phù hợp với lý thuyết tinh chỉnh K_d .

Như vậy, việc thay đổi thông số PID ở mô phỏng là đúng với quy luật thay đổi thông số mà lý thuyết PID quy định.

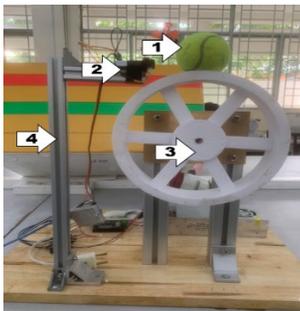


Hình 5. Vị trí quả bóng so với vị trí chuẩn (rad)

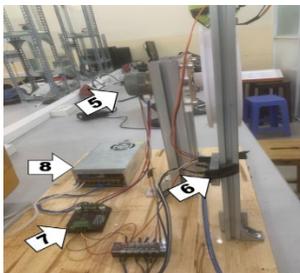
5. Thực nghiệm

5.1. Mô hình thực nghiệm

Mô hình phân cứng được thiết kế như ở Hình 6 và Hình 7.

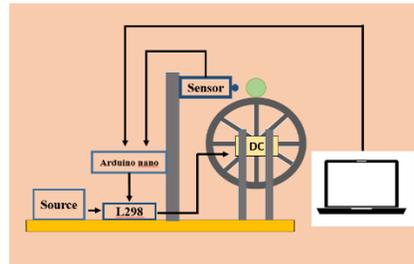


Hình 6. Phần cứng của hệ BW nhìn hướng trực diện



Hình 7. Phần cứng của hệ BW nhìn hướng nghiêng

- 1- Quả bóng tennis
- 2- Cảm biến khoảng cách hồng ngoại SHARP GP2Y0A02YK0F
- 3- Bánh xe bằng nhựa in 3D
- 4- Nhôm định hình
- 5- Động cơ NISCA 24VDC
- 6- Vi xử lý Arduino NANO
- 7- Mạch cầu H công suất L298
- 8- Nguồn tổ ong 24V-10A



Hình 8. Sơ đồ khối của hệ thống

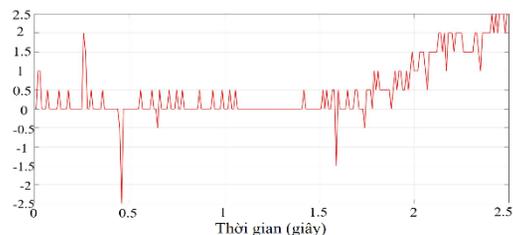
Ở thực nghiệm, chỉ một bộ PID duy nhất được thực hiện với ngõ vào là sai số giữa vị trí quả bóng so với vị trí mong muốn (vị trí mong muốn là vị trí được xác định là khoảng cách giữa quả bóng lúc cân bằng ổn định trên đĩa và cảm biến SHARP – khoảng cách này được xác định bằng đo đạc trước khi tiến hành thực nghiệm).

5.2. TH 1

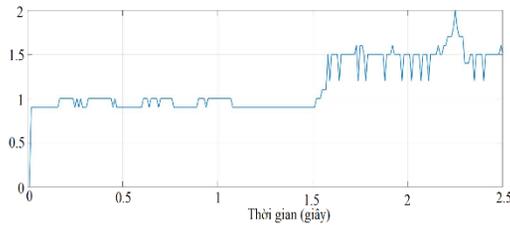
Thông số PID được chọn thông qua thử sai như sau:

$$K_p=6.45, K_d=1, K_i=0.01 \quad (30)$$

Kết quả thực nghiệm được thể hiện ở Hình 9 và Hình 10. Bộ thông số ở (30) đã ổn định thành công BW tại điểm làm việc. Bánh xe có xu hướng lệch xa dần so với góc đặt nhưng quả banh vẫn được giữ cố định (cách cảm biến khoảng 1.2cm) và ổn định. Một giải thích có thể được đưa ra là do ma sát nên khi i ổn định, bánh xe bị trượt và xa khỏi vị trí ổn định. Nhưng, quả bóng vẫn được đảm bảo ở vị trí cố định.



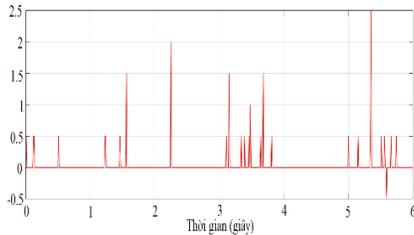
Hình 9. Góc bánh xe (độ) ở TH1



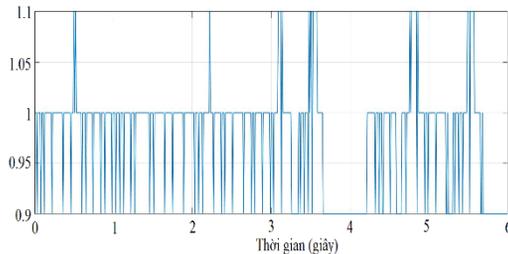
Hình 10. Vị trí quả bóng so với cảm biến (cm) ở TH1

5.3. TH 2

So với thông số ở (30), K_p sẽ được tăng lên $K_p=7$. Các giá trị K_i và K_d vẫn được giữ nguyên ($K_d=1, K_i=0.01$). Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 11 và Hình 12.



Hình 11. Góc bánh xe (độ) ở trường hợp 2



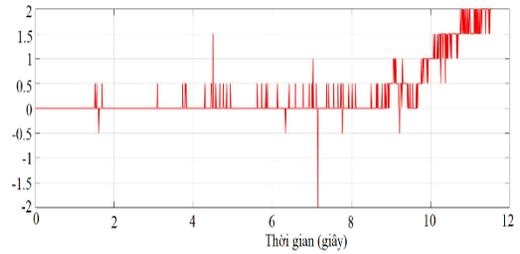
Hình 12. Vị trí quả bóng so với cảm biến (cm) ở trường hợp 2

Ta thấy cảm biến đo được có độ gài rất lớn, do đó quả bóng không đứng được trên bánh xe. Như vậy, K_p tăng quá mức sẽ làm hệ mất ổn định. Điều này phù hợp với quy luật tinh chỉnh PID khi hiệu chỉnh K_p .

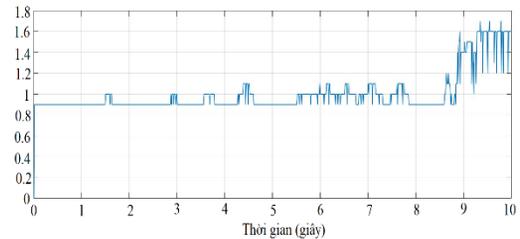
5.4. TH 3

Với $K_p=7$ ở TH2, ta thấy sai số và độ vọt lố của cảm biến khá cao nên lúc này ta sẽ giữ nguyên K_p là 6.45 (như ở (30)) và giảm K_d xuống còn 0.45 còn K_i giữ nguyên là 0.01. Với sự thay đổi như vậy, ta thấy được cảm biến đo được khá ổn,

không bị gài nhiều, quả bóng đứng được lâu hơn khoảng 10 giây (Hình 13 và Hình 14).



Hình 13. Góc bánh xe (độ) ở TH3

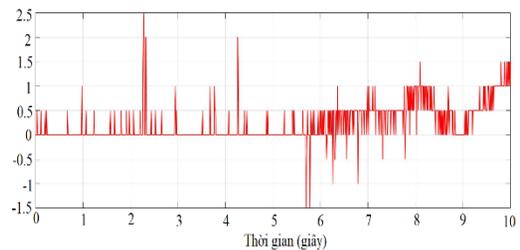


Hình 14. Vị trí quả bóng so với cảm biến (cm) ở TH3

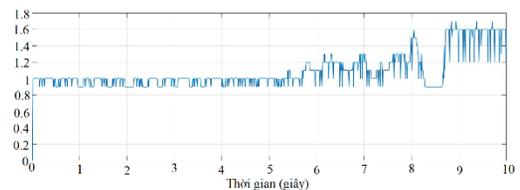
Lúc này, đáp ứng quả bóng là ít dao động hơn (Hình 14). Tức là, việc giảm K_d giúp hệ thống ít dao động hơn, nhưng, hệ thống sẽ chậm đáp ứng hơn. Điều này phù hợp với việc tinh chỉnh PID khi thay đổi K_d .

5.5. TH4

Tăng $K_p = 6.5$ và K_i không thay đổi K_d bằng 0.44.



Hình 15. Góc bánh xe (độ) ở TH4



Hình 16. Vị trí quả bóng so với cảm biến (cm) ở TH4

Ta thấy ở trường hợp này, dữ liệu cảm biến lên xuống đều nhau, quả bóng đứng yên và cân bằng khá lâu. Đây là đáp ứng thực nghiệm có chất lượng tốt nhất thông qua thử sai mà thực nghiệm này tìm kiếm được.

5.6. Nhận xét

Như vậy, thông qua các kết quả thực nghiệm, ta thấy khi tăng K_p càng lớn thì độ vọt lố và sự mất ổn định lúc ban đầu sẽ càng cao, còn với K_d khi tăng càng cao thì thời gian ổn định sẽ lâu hơn, tuy nhiên ta cần chọn thông số K_d phù hợp để mô hình ổn định và duy trì sự cân bằng càng lâu. Với K_i sẽ giảm bớt mức độ gai của và độ của cảm biến đưa về, đồng thời ta phải tăng giảm phù hợp để đảm bảo mô hình được cân bằng hơn. Những điều này là phù hợp với kết quả mô phỏng và phù hợp lý thuyết điều chỉnh PID.

6. Kết luận

Thông qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã xây dựng một mô hình thực nghiệm BW. Giải thuật cơ bản là PID đã được thiết kế, kiểm chứng trên mô phỏng trước khi được áp dụng cho mô hình. Thông qua kết quả mô phỏng và thực nghiệm với kết quả cân bằng thành công quả bóng trên bánh xe bằng một giải thuật kinh điển - PID, mô hình BW trong bài báo có thể được xem như một mô hình chuẩn về thực nghiệm để các SV kiểm chứng các giải thuật tiếp theo và có thể được phổ biến trong các PTN để phục vụ đào tạo và nghiên cứu với nhiều ưu điểm - chi phí thấp, cấu trúc mô hình đơn giản, dễ chế tạo vì xử lý được hỗ trợ rộng rãi bởi cộng đồng.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn TS. Nguyễn Văn Đông Hải (khoa Điện-Điện tử, HCMUTE) đã hướng dẫn để chúng tôi hoàn thành nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ming-tzu ho, Yi-wei tu, and Hao-shuan lin, "Controlling a Ball and Wheel System Using Full-State-Feedback Linearization -A Testbed for Nonlinear Control Design", IEEE Control System Magazine - Focus on Education, pp. 83-101, 2009.
- [2] J. Aracil and F. Gordillo, "The inverted pendulum: a benchmark in nonlinear control," Proceedings World Automation Congress, pp. 468-482, 2004.
- [3] S. Latif, E. Muhammad and U. Naeem, "Implementation of ball and beam system using classical and advanced control techniques," 2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics, pp. 74-79, 2019.
- [4] M. -t. Ho, Y. -w. Tu and H. -s. Lin, "Controlling a ball and wheel system using full-state-feedback linearization [Focus on Education]," Control Systems Magazine, Vol. 29, No. 5, pp. 93-101, 2009.
- [5] T. Kaushik, A. C. Jahagirdar and S. Singhai, "Sliding Mode Control of Ball-on-Wheel System," 2019 IEEE 16th India Council International Conference, pp. 1-4, 2019.
- [6] Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," 11th International Conference on Electronics, pp. 1-4, 2014.
- [7] Vo , A. K. et al, "Model and control algorithm construction for rotary inverted pendulum in laboratory", Journal of Technical Education Science, (49), 32-40, 2018.

Ngày nhận bài: 16/5/2023

Ngày hoàn thành sửa bài: 09/6/2023

Ngày chấp nhận đăng: 13/6/2023