

Điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp

Huỳnh Minh Ngọc^{1,2}, Dương Hoài Nghĩa^{3,*}, Nguyễn Vĩnh Hào¹



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Trong bài báo này, điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp được đề nghị. Robot xe đạp là hệ có tính chất phi tuyến, và hệ có hai ngõ vào và hai ngõ ra. Robot xe đạp có các tín hiệu điều khiển là momen điều khiển bánh lái và động năng. Hai tín hiệu ra là góc bánh lái và góc nghiêng của xe. Robot xe đạp là hệ thụ động. Chúng ta nghiên cứu bài toán điều khiển để làm góc bánh lái và góc nghiêng của xe bám giá trị 0, và vận tốc góc bánh lái và vận tốc góc nghiêng bám giá trị 0 để xe đạp ổn định cân bằng thẳng đứng. Chúng ta tuyến tính hóa và phân tách hệ robot xe đạp thành hai hệ một ngõ vào một ngõ ra. Điều khiển dựa vào tính thụ động được áp dụng cho mỗi hệ một ngõ vào một ngõ ra này. Tiếp theo, điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều được áp dụng vào mỗi hệ một ngõ vào một ngõ ra này. Kết quả mô phỏng được thực hiện bằng Simulink trong MATLAB và có kết quả khá tốt. Góc bánh lái của điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều tiến về 0 với thời gian quá độ 2.8 s và góc nghiêng tiến về 0 với thời gian quá độ 2.3 s. Phân tích ổn định chứng tỏ điểm cân bằng ở gốc tọa độ của hệ là ổn định tiệm cận trong hai trường hợp: điều khiển dựa vào tính thụ động và điều khiển cuộn chiều. Có so sánh kết quả điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều với điều khiển dựa vào tính thụ động dùng phương pháp thụ động hóa hệ thống, điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển trượt, và điều khiển dựa vào tính thụ động dùng mạng nơron.

Từ khoá: Robot xe đạp, điều khiển dựa vào tính thụ động, điều khiển cuộn chiều, điều khiển trượt.

INTRODUCTION

Điều khiển dựa vào tính thụ động và điều khiển cuộn chiều đã được nghiên cứu nhiều bởi các nhà nghiên cứu. Robot xe đạp là hệ phi tuyến, đa biến (MIMO) và việc điều khiển có khó khăn. Các tác giả Tanaka Y, Murakami T [1] dùng góc bánh lái để giữ cân bằng xe. Robot xe đạp có góc bánh lái là tín hiệu điều khiển và góc nghiêng của xe là tín hiệu ra. Tác giả Astrom [2] đã mô hình hóa xe đạp và tuyến tính hóa hệ quanh điểm cân bằng và áp dụng điều khiển hồi tiếp. Các tác giả Guo L *et al.* [3] mô hình hóa xe đạp là hệ phi tuyến, MIMO, áp dụng tuyến tính hóa vào-ra cho robot xe đạp, và dùng điều khiển hồi tiếp trạng thái dùng phân bố cực.

Tác giả Dương Hoài Nghĩa [4] trình bày điều khiển trượt và điều khiển dựa vào tính thụ động cho hệ phi tuyến. Tác giả Khalil [5] trình bày ổn định hệ phi tuyến dùng lý thuyết Lyapunov, tính thụ động và điều khiển dựa vào tính thụ động với áp dụng cho robot hai bậc tự do. Các tác giả Dương Hoài Nghĩa và Huỳnh Minh Ngọc [6] đã trình bày điều khiển tuyến tính hóa vào-ra cho hệ robot xe đạp.

Các tác giả Huỳnh Minh Ngọc, Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vĩnh Hào [7] trình bày nghiên cứu so sánh

điều khiển phi tuyến và điều khiển dựa vào tính thụ động dùng mạng nơron cho robot xe đạp. Các tác giả Huỳnh Minh Ngọc, Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vĩnh Hào [8] trình bày điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển trượt cho bộ biến đổi công suất boost DC-DC. Các tác giả Huỳnh Minh Ngọc, Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vĩnh Hào [9] trình bày điều khiển tỉ lệ tích phân (PI -proportional integral) dựa vào tính thụ động cho robot xe đạp.

Các tác giả Wu và Lu [10] trình bày điều khiển trượt cuộn chiều thích nghi cho bộ biến đổi công suất boost DC-DC với tải công suất không đổi. Các tác giả Li và Fang [11] trình bày điều khiển cuộn chiều thụ động cho bộ biến đổi cầu tích cực kép. Các tác giả Nizami và Chakravarty [12] trình bày điều khiển cuộn chiều thích nghi tích hợp mạng nơron cho bộ biến đổi boost DC-DC. Tác giả Moreschini A. *et al.* [13] trình bày lý thuyết thụ động tổng quát trên miền thời gian trừu tượng. Các tác giả Liu S., Zhang H., và Pang H. [14] trình bày điều khiển bám mờ dựa vào tính bán thụ động cho các hệ phi tuyến chuyển mạch. Các tác giả Huỳnh Minh Ngọc, Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vĩnh Hào [15] trình bày điều khiển nơron dựa vào tính thụ động dùng giải thuật di truyền cho bộ biến

¹ĐH Bách khoa – ĐHQG TP. HCM

²ĐH Công nghiệp TP. HCM

³ĐH Quốc tế Miền Đông

Liên hệ

Dương Hoài Nghĩa, ĐH Quốc tế Miền Đông
Email: dhoainghia@yahoo.com

Lịch sử

- Ngày nhận: 31-10-2025
- Ngày sửa đổi: 03-12-2025
- Ngày chấp nhận: 13-04-2026
- Ngày đăng: 22-07-2026

DOI : <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-et.v9i3.1487>



Check for updates

Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Trích dẫn bài báo này: Ngọc H M, D H N, N V H. Điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp. VNUHCM J. Eng. Technol. 2026; 9(3): 3011-3019.

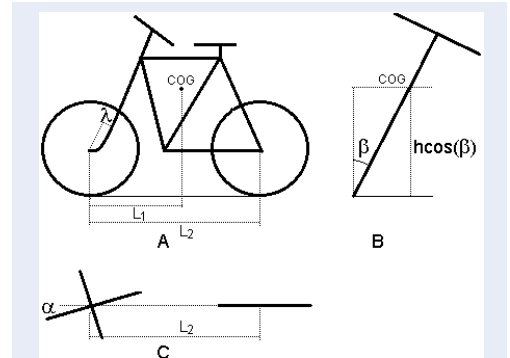
đôi boost DC-DC. Trọng số của mạng nơron được tối ưu hóa dùng giải thuật di truyền với mã hóa thập phân. Tác giả Joglekar [16] trình bày điều khiển bám quỹ đạo của xe tự động dựa vào việc chọn mô hình và cập nhật nhận dạng hệ thống. Các tác giả Huỳnh Minh Ngọc, Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vinh Hào [17] trình bày điều khiển dựa vào tính thụ động dùng giải thuật di truyền cho bộ biến đổi boost DC-DC. Các tác giả Dương Hoài Nghĩa, Huỳnh Minh Ngọc, và Nguyễn Vinh Hào [18] trình bày điều khiển dựa vào tính thụ động bền vững dùng giải thuật di truyền cho bộ biến đổi boost DC-DC khi có sai số mô hình không biết trước. Bài báo này đề nghị điều khiển dựa trên tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp. Kết quả mô phỏng dùng MATLAB/Simulink.

Bài báo được bố cục như sau. Giới thiệu được trình bày trong phần 1. Phương pháp nghiên cứu bao gồm mô hình robot xe đạp và tính chất thụ động của robot xe đạp được trình bày trong phần 2. Điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều được trình bày trong phần 3. Kết quả mô phỏng và thảo luận được trình bày trong phần 4. Phần 5 kết luận bài báo.

ĐIỀU CƠ BẢN VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Mô hình robot xe đạp

Các thông số của robot xe đạp được trình bày ở hình 1 và bảng 1 [3]. Robot được truyền động bởi 2 động cơ. Động cơ 1 được bố trí ở trục bánh sau giúp robot di chuyển với vận tốc V . Động cơ 2 được bố trí trên trục của phuộc để điều khiển góc bánh lái α .



Hình 1. Các thông số của robot xe đạp (A: nhìn ngang, B: nhìn từ trước, C: nhìn từ trên)
[Nguồn: Nhóm tác giả]

Bỏ qua chuyển động trượt của các bánh xe, mô hình trạng thái của robot xe đạp [3] là:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{c_2 \sin(x_3)x_4^2 + c_3 u_1 + d_2 d_3 c_1 \tan(x_1) \cos^2(x_3) u_2}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{0.5 d_1 c_2 \sin(2x_3)x_4^2 + d_1 c_3 \cos(x_3) u_1 + d_2 d_3 \tan(x_1) \cos(x_3) u_2}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{array} \right. \quad (1)$$

Bảng 1. Các thông số của robot xe đạp

Tên	Ý nghĩa vật lý	Giá trị
COG	Trọng tâm của xe (center of gravity)	
m_1	Khối lượng của mỗi bánh xe	2.5 kg
m_2	Khối lượng của mỗi bánh xe	18 kg
r	Bán kính của mỗi bánh xe	0.33 m
λ	Khoảng cách giữa trục của phuộc và trục của bánh trước	0.04 m
h	Chiều cao của trọng tâm (COG) khi xe đứng thẳng ($\beta = 0$)	0.92 m
L_1	Khoảng cách giữa hình chiếu lên mặt phẳng ngang của trục bánh trước và trọng tâm xe	0.7 m
L_2	Khoảng cách giữa trục bánh trước và trục bánh sau	1.1 m
p	$(L_2 - L_1)/L_2$	0.36
α	Góc của bánh trước so với phương chuyển động	
β	Góc nghiêng của xe so với phương thẳng đứng	
V	Vận tốc chuyển động thẳng của xe	

Trong đó: $x_1 = \alpha$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = \beta$, $x_4 = \dot{\beta}$ là các biến trạng thái.

$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$. x_1 (rad) là góc

bánh lái. x_2 (rad/s) là vận tốc góc bánh lái. x_3

(rad) là góc nghiêng của xe so với phương thẳng

đứng. x_4 (rad/s) là vận tốc góc nghiêng của xe.

Các tín hiệu ra y gồm có góc bánh lái $y_1 = \alpha$ (rad)

và góc nghiêng của xe $y_2 = \beta$ (rad).

$y = [y_1 \ y_2]^T$. Tín hiệu điều khiển là u_1

(Nm), momen của động cơ quay bánh lái, và u_2

(J), động năng của chuyển động tịnh tiến của xe.

$u = [u_1 \ u_2]^T$

$$u_2 = \frac{(2m_1 + m_2)V^2}{2} \quad (2)$$

và các hệ số là

$$c_1 = \frac{-(m_1 r + m_2 h p) \lambda}{m_1 r^2 / 2 + m_1 \lambda^2 + m_2 p^2 \lambda^2}$$

$$c_2 = \frac{(m_1 r + m_2 h p) \lambda}{m_1 r^2 / 2 + m_1 \lambda^2 + m_2 p^2 \lambda^2}$$

$$c_3 = \frac{1}{m_1 r^2 / 2 + m_1 \lambda^2 + m_2 p^2 \lambda^2}$$

$$d_1 = \frac{-(m_1 r + m_2 h p) \lambda}{3 m_1 r^2 + 2 m_2 h^2}$$

$$d_2 = \frac{2(2 m_1 r + m_2 h)}{(2 m_1 + m_2) L_2}$$

$$d_3 = \frac{1}{3 m_1 r^2 + 2 m_2 h^2} \quad (3)$$

Tính chất thụ động của robot xe đạp

Tuyến tính hóa vào-ra:

Ta viết lại (1) ở dạng ma trận như sau [6]:

$$\ddot{y} = f(x) + G(x)u \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{c_2 x_4^2}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \begin{bmatrix} \sin(x_3) \\ 0.5 d_1 \sin(2x_3) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$G(x) = \frac{1}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)}$$

$$\times \begin{bmatrix} c_3 & d_2 d_3 c_1 \tan(x_1) \cos^2(x_3) \\ d_1 c_3 \cos(x_3) & d_2 d_3 \tan(x_1) \cos(x_3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{Với điều kiện } 1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3) \neq 0 \quad (7)$$

Luật điều khiển tuyến tính hóa vào ra [6] được xác định như sau:

$$\ddot{y} = v \quad (8)$$

Ta có tín hiệu điều khiển u [6] như sau:

$$u = G(x)^{-1} [v - f(x)] \quad (9)$$

$$u = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_3} & \frac{-c_1 \cos(x_3)}{c_3} \\ -d_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_2 d_3 \tan(x_1)} & \frac{1}{d_2 d_3 \cos(x_3) \tan(x_1)} \end{bmatrix} \times [v - f(x)] \quad (10)$$

Với điều kiện $\tan(x_1) \neq 0$. Phương trình (8)

tương đương hai hệ thống riêng lẻ:

$$\ddot{y}_1 = v_1 \quad (11)$$

$$\ddot{y}_2 = v_2$$

Tính chất thụ động:

Hàm tích trữ được chọn

$$V_3 = \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_4^2 \quad (12)$$

Hàm V_3 xác định dương.

$$\dot{V}_3 = x_2\dot{x}_2 + x_4\dot{x}_4 \quad (13)$$

Theo phương pháp thụ động hóa [7], hệ (8)

$$\ddot{y} = v \text{ là thụ động với ngõ vào } v \text{ và ngõ ra } \dot{y} \text{ vì}$$

$$\dot{y}^T v = \dot{y}_1 v_1 + \dot{y}_2 v_2 = x_2 \dot{x}_2 + x_4 \dot{x}_4 = \dot{V}_3. \quad (14)$$

và hệ (8) là quan sát được trạng thái 0 [7].

Luật điều khiển thụ động cho từng hệ SISO như sau [7]:

$$v_{1PBC} = -\varphi_1(\dot{y}_1) \quad (15)$$

$$\text{với } \varphi_1(0) = 0; \dot{y}_1^T \varphi_1(\dot{y}_1) > 0 \forall \dot{y}_1 \neq 0$$

$$\text{Chọn } \varphi_1(\dot{y}_1) = a_1 \dot{y}_1 + a_2 \dot{y}_1^3 + a_3 \dot{y}_1^5 \quad (16)$$

$$v_{2PBC} = -\varphi_2(\dot{y}_2) \quad (17)$$

$$\text{với } \varphi_2(0) = 0; \dot{y}_2^T \varphi_2(\dot{y}_2) > 0 \forall \dot{y}_2 \neq 0$$

$$\text{Chọn } \varphi_2(\dot{y}_2) = a_4 \dot{y}_2 + a_5 \dot{y}_2^3 + a_6 \dot{y}_2^5 \quad (18)$$

Phân tích ổn định: Đạo hàm

$$\dot{V}_3 \leq \dot{y}^T v \Rightarrow \dot{V}_3 \leq -\dot{y}^T \varphi(\dot{y}) \Rightarrow \dot{V}_3 \leq 0 \quad (19)$$

bởi vì (15) và (17). $\dot{V}_3$ là bán xác định âm.

Ứng dụng thực tế: robot xe đạp có thể được ứng dụng trong việc giao hàng.

ĐIỀU KHIỂN DỰA VÀO TÍNH THỤ ĐỘNG KẾT HỢP ĐIỀU KHIỂN CUỐN CHIỀU CHO ROBOT XE ĐẠP

Điều khiển cuộn chiều được áp dụng vào hệ (8):

$$\ddot{y} = v.$$

Hệ (8) được viết lại

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (20)$$

$$z_2 = v$$

Trong đó

$$z_1 = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$z_2 = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

Ta cần xác định v để ổn định điểm [0].

Ta đặt $w=v$. Hệ thống (20) có dạng

$$\dot{x}_A = f(x_A) + g(x_A)x_B \quad (21)$$

$$\dot{x}_B = u$$

Trong đó

$$x_A = z_1; x_B = z_2; f(x_A) = 0; g(x_A) = 1; u = w$$

Hệ thống con

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (22)$$

Có dạng

$$\dot{x}_A = f(x_A) + g(x_A)x_B \quad (23)$$

$$\dot{x}_A = f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)$$

Trong đó

$$x_A = z_1; x_B = z_2; f(x_A) = 0; g(x_A) = 1$$

$$x_B = \phi(x_A) \quad (24)$$

Nếu ta chọn $x_B = \phi(x_A) = -z_1$ thì (22) trở thành

$$\dot{z}_1 = -z_1 \quad (25)$$

Chúng ta chọn hàm Lyapunov V_A

$$V_A = z_1^2 \quad (26)$$

V_A là xác định dương.

Chúng ta tính đạo hàm của V_A

$$\dot{V}_A = 2z_1\dot{z}_1 = -2z_1^2 \leq 0 \quad (27)$$

$\dot{V}_A$ là bán xác định âm. Điểm [0] của (22) là ổn định.

Hệ (20)

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$z_2 = w$$

Có dạng sau

$$\dot{x}_A = f(x_A) + g(x_A)x_B$$

$$\dot{x}_B = u$$

Trong đó

$$x_A = z_1; x_B = z_2; f(x_A) = 0; g(x_A) = 1; u = w$$

Chúng ta viết lại

$$\dot{x}_A = [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)] + g(x_A)[x_B - \phi(x_A)] \quad (28)$$

$$\dot{x}_B = u$$

Định nghĩa

$$x_C = x_B - \phi(x_A) \quad (29)$$

$$v_4 = u - \dot{\phi}(x_A) \quad (30)$$

Chúng ta viết lại

$$\dot{x}_A = [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)] + g(x_A)x_C \quad (31)$$

$$\dot{x}_C = v_4$$

$$\text{Nếu } \phi(x_A) = -z_1 \text{ thì } x_C = z_2 + z_1 \quad (32)$$

Chúng ta chọn hàm Lyapunov V_2

$$V_2 = V_A + \frac{1}{2}x_C^2 = V_A + \frac{1}{2}(z_2 + z_1)^2 \quad (33)$$

V_2 là xác định dương.

Chúng ta tính đạo hàm của V_2

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \frac{\partial V_2}{\partial x_A} \dot{x}_A + \frac{\partial V_2}{\partial x_C} \dot{x}_C \\ &= \frac{\partial V_A}{\partial x_A} [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A) + g(x_A)x_C] \\ &\quad + x_C v_4 \\ &= \frac{\partial V_A}{\partial x_A} [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)] \\ &\quad + \left[\frac{\partial V_A}{\partial x_A} g(x_A) + v_4 \right] x_C \end{aligned} \quad (34)$$

$$\frac{\partial V_A}{\partial x_A} [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)] \text{ là bán xác}$$

định âm. Nếu ta chọn

$$\left[\frac{\partial V_A}{\partial x_A} g(x_A) + v_4 \right] x_C \leq 0 \text{ thì } \dot{V}_2 \leq 0.$$

Chúng ta chọn

$$\left[\frac{\partial V_A}{\partial x_A} g(x_A) + v_4 \right] = -x_C \quad (35)$$

Hay

$$v_4 = -\frac{\partial V_A}{\partial x_A} g(x_A) - x_C \quad (36)$$

Vì vậy,

$$\dot{V}_2 = \frac{\partial V_A}{\partial x_A} [f(x_A) + g(x_A)\phi(x_A)] - x_C^2 \quad (37)$$

Trong đó

$$\frac{\partial V_A}{\partial x_A} = 2z_1; g(x_A) = 1; x_C = z_2 + z_1$$

$$\phi(x_A) = -z_1 \Rightarrow \dot{\phi}(x_A) = -\dot{z}_1 = -z_2$$

$\dot{V}_2$ là bán xác định âm. Điểm [0] là ổn định.

Luật điều khiển cuộn chiều là

$$w = -\frac{\partial V_A}{\partial x_A} g(x_A) - x_C + \dot{\phi}(x_A) = -3z_1 - 2z_2 \quad (38)$$

Bởi vì $w = v$ nên luật điều khiển cuộn chiều là

$$v_{BSC} = -3z_1 - 2z_2 \quad (39)$$

Hay

$$v_{1BSC} = -3x_1 - 2x_2 \quad (40)$$

$$v_{2BSC} = -3x_3 - 2x_4 \quad (41)$$

Luật điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều là

$$v_{PBC-BSC} = v_{PBC} + v_{BSC} = -\phi(\dot{y}) - 3z_1 - 2z_2 \quad (42)$$

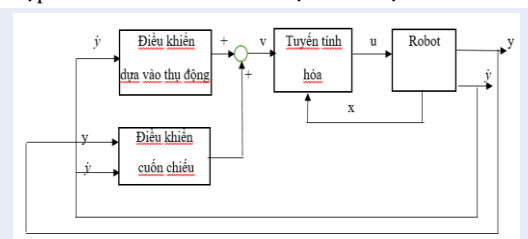
Hay

$$v_{1PBC-BSC} = v_{1PBC} + v_{1BSC} = -\phi_1(\dot{y}_1) - 3x_1 - 2x_2 \quad (43)$$

$$v_{2PBC-BSC} = v_{2PBC} + v_{2BSC} = -\phi_2(\dot{y}_2) - 3x_3 - 2x_4 \quad (44)$$

Ta dùng (15), (17), (40), và (41).

Sơ đồ điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp điều khiển cuộn chiều được minh họa ở hình 2.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp [Nguồn: nhóm tác giả].

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Hệ được mô tả bởi phương trình (1).

Thay số từ bảng 1 ta được: $c_1 = -1.90$, $c_2 = 1.90$, $c_3 = 6.95$, $d_1 = -0.0088$, $d_2 = 1.44$, $d_3 = 0.032$.

Điều kiện đầu:

$$x_{10} = 0.01; x_{20} = -0.01; x_{30} = 0.01; x_{40} = -0.02$$

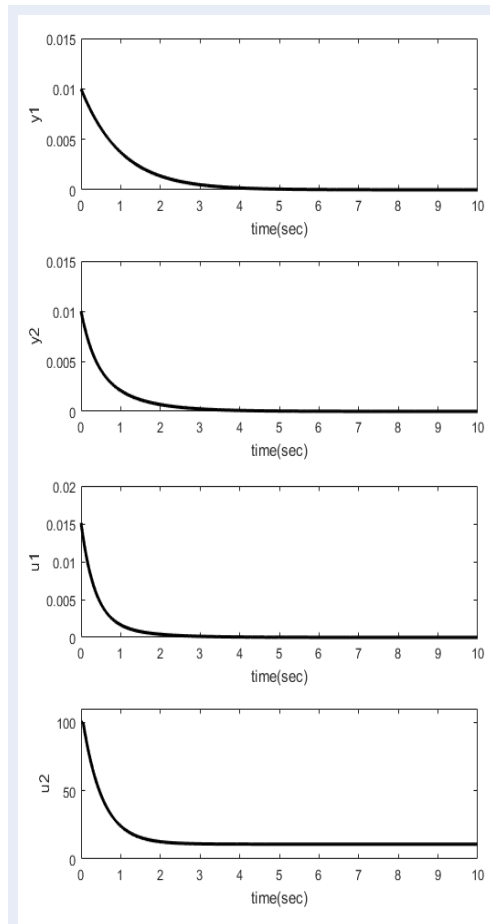
$$a_1=2, a_2=1.5, a_3=1.5, a_4=2, a_5=1.5, a_6=1.5.$$

Kết quả điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều được minh họa ở hình 3. Tín hiệu đầu ra gồm có y_1 và y_2 và tín hiệu điều khiển gồm có u_1 và u_2 của.

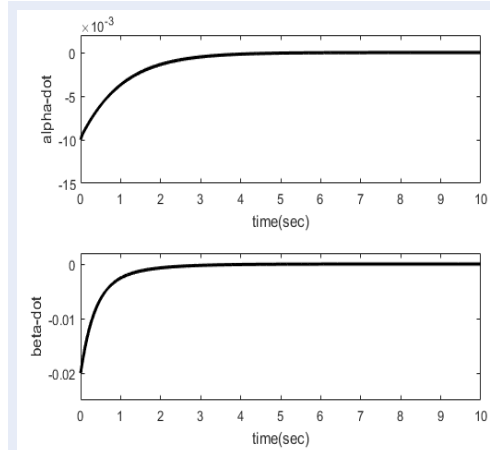
Hình 3 cho thấy tín hiệu y_1 tiến về giá trị 1.24838×10^{-5} với thời gian quá độ $t_{xl} = 2.8s$ và y_2 tiến về giá trị 0 với $t_{xl} = 2.3s$. Tín hiệu u_1 bằng 0 với $t_{xl} = 2s$. Tín hiệu u_2 tiến về 10.8 với $t_{xl} = 2s$.

Hình 4 minh họa vận tốc góc bánh lái $\dot{\alpha}$ và vận tốc góc nghiêng $\dot{\beta}$. Hình 4 cho thấy $\dot{\alpha}$ tiến về 0 với $t_{xl} = 3s$ và $\dot{\beta}$ tiến về 0 với $t_{xl} = 2.5s$.

Chúng ta so sánh điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều (PBC-BSC) với điều khiển dựa vào tính thụ động dùng phương pháp thụ động hóa hệ thống (PBC) của [7].



Hình 3. Tín hiệu đầu ra gồm có y_1 và y_2 và tín hiệu điều khiển gồm có u_1 và u_2 của điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều [Nguồn: nhóm tác giả].



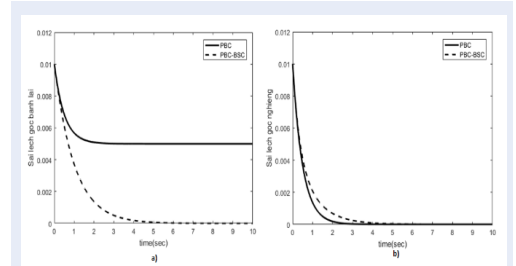
Hình 4. Tín hiệu góc α , β của điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều [Nguồn: nhóm tác giả].

Kết quả cho thấy ngõ ra y_1 của PBC-BSC tiến về giá trị bé hơn (y_1 là 1.24838×10^{-5}) so với PBC (y_1 là 0.005).

Chúng ta định nghĩa sai số bám

$$e = y - y_d = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Trong đó $y_d = [0; 0]$. Mục tiêu là góc bánh lái tiến về 0 và góc nghiêng tiến về 0. Hình 5a là sai lệch của góc bánh lái của kết quả PBC (đường liền nét) và PBC-BSC (đường đứt nét). Hình 5b là sai lệch góc nghiêng của xe của kết quả PBC (đường liền nét) và PBC-BSC (đường đứt nét).



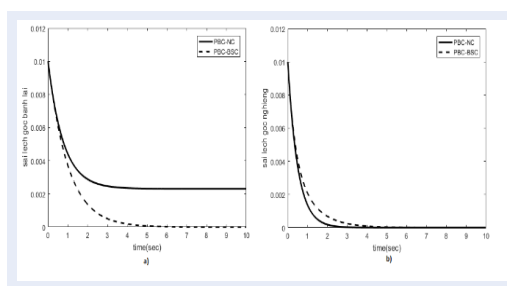
Hình 5. a) Sai lệch của góc bánh lái; b) Sai lệch của góc nghiêng của PBC (đường liền nét) và PBC-BSC (đường đứt nét) cho robot xe đạp [Nguồn: nhóm tác giả].

Kết quả chứng tỏ sai lệch góc bánh lái của PBC-BSC tiến về 1.24838×10^{-5} (rad) với $t_{xl} = 2.8s$. Sai lệch góc bánh lái của PBC tiến về 0.005 (rad) với $t_{xl} = 2s$. Kết quả cho thấy sai lệch góc nghiêng của PBC-BSC tiến về 0 với $t_{xl} = 2.3s$. Sai lệch của góc nghiêng của PBC tiến về 0 với $t_{xl} = 2s$. Kết quả so sánh được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả PBC-BSC, PBC của [7], và PBC-SMC của [7] và PBC-NC của [7]

Bộ điều khiển	Góc bánh lái α và góc nghiêng β	Vận tốc góc bánh lái $\dot{\alpha}$ và vận tốc góc nghiêng $\dot{\beta}$
PBC - BSC	$\alpha \rightarrow 1.24838 \times 10^{-5}$ với $t_{xl}=2.8s$ và $\beta \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.3s$	$\dot{\alpha} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=3s$ và $\dot{\beta} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.5s$
PBC của [7]	$\alpha \rightarrow 0.005$ với $t_{xl}=2s$ và $\beta \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2s$	$\dot{\alpha} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.4s$ và $\dot{\beta} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.4s$
PBC - SMC của [7]	$\alpha \rightarrow 0.011585$ với $t_{xl}=1.5s$ và $\beta \rightarrow 0.005$ với $t_{xl}=1.5s$	$\dot{\alpha} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=1.5s$ và $\dot{\beta} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=1.5s$
PBC - NC của [7]	$\alpha \rightarrow 0.005$ với $t_{xl}=1.8s$ và $\beta \rightarrow 0$ với $t_{xl}=1.8s$	$\dot{\alpha} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.3s$ và $\dot{\beta} \rightarrow 0$ với $t_{xl}=2.3s$

Hình 6a là sai lệch của góc bánh lái của kết quả điều khiển dựa vào tính thụ động dùng mạng nơron (PBC-NC) (đường liền nét) của [7] và PBC-BSC (đường đứt nét). Hình 6b là sai lệch góc nghiêng của xe của kết quả PBC-NC (đường liền nét) của [7] và PBC-BSC (đường đứt nét).



Hình 6. a) Sai lệch của góc bánh lái; b) Sai lệch của góc nghiêng của PBC-NC (đường liền nét) và PBC-BSC (đường đứt nét) cho robot xe đạp [Nguồn: nhóm tác giả].

Kết quả chứng tỏ sai lệch góc bánh lái của PBC-BSC tiến về 1.24838×10^{-5} (rad) với $t_{xl}=2.8s$. Sai lệch góc bánh lái của PBC-NC tiến về 0.005 (rad) với $t_{xl}=1.8s$. Kết quả cho thấy sai lệch góc nghiêng của PBC-BSC tiến về 0 với $t_{xl}=2.3s$. Sai lệch của góc nghiêng của PBC-NC tiến về 0 với $t_{xl}=1.8s$. Kết quả so sánh được trình bày trong bảng 2.

Kết quả PBC-BSC được so sánh với điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển trượt (PBC-SMC) của [7] cho robot xe đạp. Chúng ta thấy rằng góc bánh lái của kết quả PBC-BSC tiến về 1.24838×10^{-5} (rad) với $t_{xl}=2.8s$. Góc nghiêng của PBC-BSC tiến về 0 với $t_{xl}=2.3s$. Tuy nhiên, góc bánh lái của kết quả PBC-SMC tiến về 0.011585 (rad) với $t_{xl}=1.5s$. Góc nghiêng của PBC-SMC tiến về 0.005 với $t_{xl}=1.5s$. Kết quả so sánh được trình bày trong bảng 2.

KẾT LUẬN

Trong bài báo này, điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp được đề nghị. Phương pháp điều khiển cuộn chiều được thực hiện theo cách sau: i) dựa vào tuyến tính hóa vào ra, luật điều khiển dựa vào tính thụ động [7] được áp dụng cho robot xe đạp; ii) Xây dựng luật điều khiển cuộn chiều cho robot xe đạp ở (8) để ổn định điểm [0]. Sau đó luật điều khiển dựa vào tính thụ động được kết hợp (cộng) với điều khiển cuộn chiều và áp dụng cho robot xe đạp. Bài báo không làm theo tiếp cận sau: xây dựng ngõ ra thụ động để hệ động học zero là ổn định tiệm cận và ta làm theo đệ qui. Kết quả mô phỏng của điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuộn chiều chứng tỏ rằng xe đạp giữ cân bằng. Có so sánh sai lệch góc bánh lái và sai lệch góc nghiêng của phương pháp PBC-BSC và PBC, PBC-SMC và PBC-NC của [7]. Phân tích ổn định chứng tỏ điểm cân bằng ở góc tọa độ là ổn định tiệm cận trong trường hợp điều khiển dựa vào tính thụ động và trong điều khiển cuộn chiều. Trong bài báo này, robot xe đạp được giữ cân bằng và đi thẳng. Hướng phát triển là điều khiển xe đạp bám theo quỹ đạo hay đi vòng tròn. Bài báo trình bày mô phỏng cho robot xe đạp dùng MATLAB/Simulink. Hướng phát triển, việc thi công robot xe đạp được thực hiện và giải thuật điều khiển cuộn chiều kết hợp điều khiển dựa vào tính thụ động được thực hiện.

CHỮ VIẾT TẮT

SISO single input – single output: một ngõ vào một ngõ ra

MIMO multi input – multi output: nhiều ngõ vào nhiều ngõ ra

PBC passivity-based control: điều khiển dựa vào tính thụ động

BSC backstepping control: điều khiển cuốn chiếu
PBC-BSC PBC - backstepping control: điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển cuốn chiếu

PBC-SMC PBC – sliding mode control: điều khiển dựa vào tính thụ động kết hợp điều khiển trượt

PBC-NC PBC using neural network control: điều khiển dựa vào tính thụ động dùng mạng nơ-ron

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi cảm ơn sự hỗ trợ về thời gian và cơ sở vật chất của trường Đại học Bách khoa (HCMUT), ĐHQG TP. HCM cho nghiên cứu này.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Bản thảo bài báo không có xung đột lợi ích với các tác giả khác và chưa được gửi bài ở các tạp chí khác.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Tác giả Dương Hoài Nghĩa: là người hướng dẫn, đưa ra ý tưởng nghiên cứu đề tài; đóng góp ý kiến đề tài; tác giả Huỳnh Minh Ngọc viết và chỉnh lại bài báo; là tác giả liên hệ bài báo.

Tác giả Nguyễn Vĩnh Hào: là người hướng dẫn, đưa ra ý tưởng nghiên cứu đề tài; góp ý cho bài báo; là tác giả bài báo.

Tác giả Huỳnh Minh Ngọc, là tác giả đầu, viết bản thảo bài báo, thực hiện mô phỏng và viết chỉnh sửa theo góp ý của tác giả Dương Hoài Nghĩa và Nguyễn Vĩnh Hào và theo ý kiến của người phản biện; là tác giả đầu bài báo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tanaka Y, Murakami T. Self sustaining bicycle robot with steering controller. *The 8th IEEE International workshop on Advanced motion control*. Kawasaki, Japan, 2004: 193-197.
2. Astrom KJ. *Bicycle dynamics and control*. LTH, Lund University, Sweden, 2005. 66 p.
3. Guo L, Liao Q, Wei S, Huang Y. A kind of bicycle robot dynamic modeling and nonlinear control. *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*. Harbin, China, 2010 June: 1613-1617.
4. Dương Hoài Nghĩa. *Điều khiển hệ thống đa biến*. TP. HCM: NXB ĐHQG, 2013. 199 trang.
5. Khalil HK. *Nonlinear systems*. New Jersey: Prentice-Hall 3rd edition, 2002. 768 p.
6. Dương Hoài Nghĩa, Huỳnh Minh Ngọc. Điều khiển tuyến tính hóa vào-ra robot xe đạp. *Tạp chí khoa học giáo dục kỹ thuật*; 2020, 15 (6): 33-39.
7. Huynh MN., Duong HN., and Nguyen VH. A comparative study of the nonlinear control and the passivity-based control using neural network for a

bicycle robot. *Journal of Robotics and Control (JRC)*; 2025, 6 (2): 594-604.

8. Huynh MN., Duong HN., and Nguyen VH. A passivity-based control combined with sliding mode control for a DC-DC boost power converter. *Journal of Robotics and Control (JRC)*; 2024, 4 (6):780-790.

9. Huynh MN., Duong HN., and Nguyen VH. Passivity-based control of bicycle robot. *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 2022, 5 (2):1520-1527.

10. Wu J. and Lu Y. Adaptive backstepping sliding mode control for boost converter with constant power load. *IEEE Access*; 2019, 7 :50797-50807.

11. Li X. and Fang X. Passive backstepping control of dual active bridge converter in modular three-port DC converter. *Journal of Electronics, Basel*; 2023, 12 (5), doi:10.3390/electronics12051074.

12. Nizami TK. and Chakravarty A. Neural network integrated adaptive backstepping control of DC-DC boost converter. *Journal of IFAC - PapersOnline*; 2020, 53 (1):549-554.

13. Moreschini A., Bin M., Astolfi A., and Parisini T. A generalized passivity theory over abstract time domains. *IEEE Transactions on Automatic Control*; 2025, 70 (1): 2-17.

14. Liu S., Zhang H., and Pang H. Semipassivity-based fuzzy tracking control for switched nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*; 2024, 32 (1): 126-136.

15. Huynh MN., Duong HN., Nguyen VH. A passivity-based neural control using genetic algorithm for a DC—DC boost power converter. *Science and Technology Development Journal-Engineering and Technology*; 2024, 7 (3): 2353-2368.

16. Joglekar A. et al. Analytical construction koopman EDMD candidate functions for optimal control of Ackermann-steered vehicles. *Journal of IFAC -PapersOnline*; 2023, 56 (3): 619-624.

17. Huynh MN., Duong HN., and Nguyen VH. Điều khiển dựa vào tính thụ động dùng giải thuật di truyền cho bộ biến đổi công suất boost DC-DC. *Tạp chí Phát triển khoa học và công nghệ - Kỹ thuật và công nghệ*; 2023, 6 (2):1891-1905.

18. Duong HN., Huynh MN., and Nguyen VH. A robust passivity-based control using genetic algorithm for a DC-DC boost power converter. *The 13th IEEE International Conference on Control, Automation, and Information Science (ICCAIS)*. Ho Chi Minh City, Vietnam, 26-28 November 2024: 1-6.

Passivity-based control combined with backstepping control of bicycle robot

Minh-Ngoc Huynh^{1,2}, Hoai-Nghia Duong^{3,*}, Vinh-Hao Nguyen¹



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

In this paper, a passivity-based control combined with backstepping control of a bicycle robot is proposed. A bicycle robot is a system which has a nonlinear property and provides two inputs and two outputs. The control inputs of bicycle robot are the steering torque and the kinetic energy. Its two outputs are the steering angle and the rolling angle. A bicycle robot is a passive system. We research a control problem, which the steering angle and the rolling angle track a value of zero, and the velocity of the steering angle and the velocity of the rolling angle track a value of zero, in order that we stabilize a bicycle robot at its vertical balance. We linearize and decouple the plant into two single input single output systems. The passivity-based control is applied to each single input single output system. Then, the passivity-based control combined with backstepping control is applied to each plant. Simulation results are done with Simulink in MATLAB and have good results. The steering angle of the passivity-based control combined with backstepping control tracks a value of zero with the settling time of 2.8 seconds and the rolling angle tracks a value of zero with the settling time of 2.3 seconds. The stability analysis shows that the equilibrium point at origin of the plant is asymptotically stable in two cases: the passivity-based control and the backstepping control. There are comparisons of a passivity-based control combined with backstepping control, a passivity-based control using passivation method, a passivity-based control combined with sliding mode control, and a passivity-based control using neural network.

Key words: Bicycle robot, passivity-based control, backstepping control, sliding mode control

¹Ho Chi Minh City University of Technology – VNU HCM

²Industrial University of Ho Chi Minh City

³Eastern International University

Correspondence

Hoai-Nghia Duong, Eastern International University

Email: dhoainghia@yahoo.com

History

- Received: 31-10-2025
- Revised: 03-12-2025
- Accepted: 13-04-2026
- Published Online: 22-07-2026

DOI : <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-et.v9i3.1487>



Check for updates

Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Cite this article : Huynh M, Duong H, Nguyen V. **Passivity-based control combined with backstepping control of bicycle robot.** *VNUHCM J. Eng. Technol.* 2026; 9(3): 3011-3019.