

ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH HÓA VÀO-RA ROBOT XE ĐẠP CONTROL OF BICYCLE ROBOT USING INPUT-OUTPUT LINEARIZATION

Dương Hoài Nghĩa¹, Huỳnh Minh Ngọc²

¹Trường Đại học Quốc tế Miền Đông, Việt Nam

²Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM, Việt Nam

Ngày tòa soạn nhận bài 18/2/2020, ngày phản biện đánh giá 25/3/2020, ngày chấp nhận đăng 14/4/2020.

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất hệ thống điều khiển robot xe đạp dựa trên phương pháp tuyến tính hóa vào-ra. Robot xe đạp là hệ phi tuyến, đa biến. Hai tín hiệu vào của hệ là momen bánh lái và động năng. Hai tín hiệu ra là góc bánh lái và góc nghiêng của xe. Trước tiên luật điều khiển tuyến tính hóa vào-ra giúp tuyến tính hóa và phân ly đối tượng điều khiển thành các hệ thống một đầu vào một đầu ra. Sau đó các bộ điều khiển PD và khâu bù chính bậc 1 được sử dụng để ổn định hóa các hệ một đầu vào một đầu ra này. Cuối cùng kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển có chất lượng danh định tốt như là thời gian quá độ ngắn và độ vọt lố bé. Hơn nữa, kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống điều khiển bền vững đối với sự thay đổi các thông số của robot xe đạp như là tải và trọng tâm của xe. Hai tín hiệu ra được điều khiển độc lập nhau.

Từ khóa: Robot xe đạp; hệ đa biến; tuyến tính hóa vào-ra; bộ điều khiển PD; khâu bù chính bậc 1.

ABSTRACT

The paper proposes a control system for bicycle robots based on input-output linearization method. Bicycle robot is a nonlinear, MIMO (multi-input multi-output) system. Its two inputs are the steering torque and kinetic energy. Its two outputs are the steering angle and the rolling angle. Firstly, input-output linearization control law linearizes and decouples the plant into single input-single output systems. Then the PD (proportional derivative) controller and first-order linear compensator are used to control these single input-single output systems. Finally, simulation results show that the control system had good performance, such as short settling time and small percentage of overshoot. Further, simulation results show that the control system is robust against variations in the parameters of the plant, such as the mass and the center of gravity. Two output signals are controlled independently.

Keywords: Bicycle robot; MIMO system; input-output linearization; PD controller; first-order compensator

1. GIỚI THIỆU

Robot xe đạp là một đối tượng phi tuyến, đa biến, không ổn định, đã được nghiên cứu bởi nhiều nhà khoa học khác nhau. Việc điều khiển robot xe đạp có nhiều thách thức và khó.

Mô hình động lực của xe đạp và điều khiển được trình bày trong [1-3]. Trong [1], mô hình xe đạp được dẫn ra từ cân bằng của trọng lực và lực ly tâm. Hệ có một đầu vào và một đầu ra. Góc bánh lái là tín hiệu điều khiển và góc nghiêng của xe là tín hiệu ra.

Các tác giả điều khiển góc bánh lái để giữ cân bằng xe. Trong [2], Astrom đã trình bày mô hình xe đạp có tín hiệu điều khiển là moment bánh lái và hai biến quá trình là góc bánh lái và góc nghiêng của xe. Phương trình góc nghiêng của xe được tuyến tính hóa quanh điểm cân bằng, và hệ có đầu vào là moment bánh lái và đầu ra là góc nghiêng của xe. Phương pháp điều khiển tuyến tính và xét ổn định được áp dụng cho hệ tuyến tính hóa này. Trong [3], mô hình robot xe đạp có hai tín hiệu vào là moment bánh lái và

động năng, và hai tín hiệu ra là góc bánh lái và góc nghiêng của xe. Các tác giả điều khiển góc điều khiển bánh lái và vận tốc xe để giữ thăng bằng xe. Hơn nữa, phương pháp tuyến tính hóa vào-ra và điều khiển hồi tiếp trạng thái dùng phương pháp phân bố cực cũng được trình bày.

Các tác giả khác [4-6] điều khiển giữ thăng bằng xe dùng đối trọng. Trong [4], các tác giả thiết kế điều khiển trượt và điều khiển trượt mờ cho robot xe đạp. Tín hiệu ra là góc nghiêng của xe. Trong [5], điều khiển tối ưu hóa bầy đàn phần nhỏ (particle swarm optimization-PSO) kết hợp H_2/H_∞ cho robot xe đạp được trình bày. Trong [6], các tác giả dùng tuyến tính hóa vào-ra cho xe đạp không cần người lái.

Tính thụ động và điều khiển dựa vào tính thụ động cũng được trình bày trong [7-9]. Trong [7], tác giả trình bày ổn định hệ phi tuyến, phương pháp điều khiển dựa vào tính thụ động và bộ điều khiển PD, tuyến tính hóa chính xác. Trong [8], tác giả trình bày phương pháp điều khiển hệ đa biến, điều khiển dựa vào tính thụ động và điều khiển trượt. Trong [9], các tác giả trình bày hệ Euler-Lagrange và phương pháp điều khiển dựa trên tính thụ động.

Điều khiển bền vững được trình bày trong [10]. Các tác giả đề nghị tiếp cận điều khiển hồi tiếp dựa trên bộ quan sát hai tầng cho robot xe đạp không có người lái để ổn định ở vị trí thẳng đứng khi di chuyển về trước ở tốc độ không đổi.

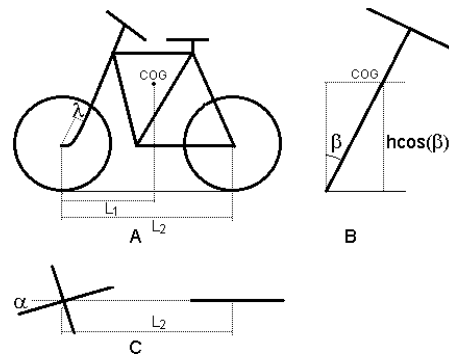
Trong bài báo này, đặc điểm khác với các tác giả khác là không dùng đối trọng. Sử dụng mô hình động lực của robot xe đạp đã được xây dựng trong [3], bài báo giới thiệu hệ thống điều khiển cân bằng xe không dùng đối trọng dùng phương pháp tuyến tính hoá vào-ra kết hợp với điều khiển PD và khâu bỏ chính bậc 1. Kết quả mô phỏng trên máy tính được thực hiện trên MATLAB/Simulink.

Bố cục của phần còn lại của bài báo như sau: Mô hình động lực của robot xe đạp được trình bày trong phần 2. Phần 3 giới thiệu hệ thống điều khiển đề nghị trên cơ sở phương

pháp tuyến tính hóa vào-ra. Kết quả mô phỏng được trình bày ở phần 4. Phần 5 kết luận bài báo.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC CỦA 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 \angle .



Hình 1. Các thông số của robot xe đạp (A: nhìn ngang, B: nhìn từ trước, C: nhìn từ trên)

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 khung xe	18 kg
r	Bán kính của mỗi bánh xe	0.33 m
L	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 ($\theta = 0$)	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

Tên	Ý nghĩa vật lý	Giá trị
p	$(L_2 - L_1)/L_2$	0.36
\langle	Góc của bánh trước so với phương chuyển động	
\textcircled{R}	Góc nghiêng của xe so với phương thẳng đứng	
V	Vận tốc chuyển động thẳng của xe	

Bỏ qua chuyển động trượt của các bánh xe, mô hình trạng thái của robot xe đạp [3] được xác định như sau:

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

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{cases}$$

Trong đó $x_1 = \langle$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = \textcircled{R}$, $x_4 = \dot{\beta}$ là các biến trạng thái. x_1 là góc bánh lái. x_2 là vận tốc góc bánh lái. x_3 là góc nghiêng của xe so với phương thẳng đứng. x_4 là vận tốc góc nghiêng của xe.

Các tín hiệu ra gồm có góc bánh lái $y_1 = \langle$ và góc nghiêng của xe $y_2 = \textcircled{R}$.

Các tín hiệu vào điều khiển gồm có u_1 là moment của động cơ quay bánh lái và

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

u_2 là động năng của chuyển động tịnh tiến của xe.

Trong đó:

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

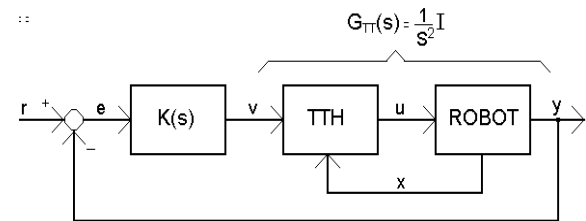
$$c_2 = \frac{(m_1 r + m_2 h p) \lambda}{m_1 r^2 / 2 + m_1 \lambda^2 + m_2 p^2 \lambda^2},$$

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

$$d_1 = \frac{-(m_1 r + m_2 h p) \lambda}{3m_1 r^2 + 2m_2 h^2}, \quad d_2 = \frac{2(2m_1 r + m_2 h)}{(2m_1 + m_2)L_2},$$

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

3. HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ĐỀ NGHỊ



Hình 2. Hệ thống điều khiển đề nghị.

Hệ thống điều khiển đề nghị bao gồm 2 vòng điều khiển (Hình 2): Vòng điều khiển trong có nhiệm vụ tuyến tính hóa (TTH) hệ thống bằng hồi tiếp trạng thái. Vòng điều khiển ngoài được thực hiện bởi bộ điều khiển tuyến tính $K(s)$.

3.1 Vòng điều khiển trong

Từ phương trình (1) ta có

$$\begin{cases} \ddot{y}_1 = \frac{c_2 \sin(x_3)x_4^2 + c_3 u_1 + d_2 d_3 c_1 \tan(x_1) \cos^2(x_3) u_2}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \\ \ddot{y}_2 = \frac{0.5 d_1 c_2 \sin(2x_3)x_4^2 + d_1 c_3 \cos(x_3) u_1 + d_2 d_3 \tan(x_1) \cos(x_3) u_2}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \end{cases} \quad (3)$$

Hoặc dưới dạng ma trận như sau:

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

Với

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

$$G(x) = \frac{1}{1 - d_1 c_1 \cos^2(x_3)} \begin{bmatrix} c_3 & d_2 d_3 c_1 \tan(x_1) \cos^2(x_3) \\ d_1 c_3 \cos(x_3) & d_2 d_3 \tan(x_1) \cos(x_3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Từ phương trình (4), luật điều khiển tuyến tính hóa vào-ra được xác định như sau:

$$\ddot{y} = v \quad (7)$$

Ta có phương trình tín hiệu điều khiển u như sau:

$$u = G(x)^{-1}[v - f(x)] \quad (8)$$

$$u = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_3} & \frac{-c_1 \cos(x_3)}{c_3} \\ -d_1 & 1 \\ \frac{1}{d_2 d_3 \tan(x_1)} & \frac{1}{d_2 d_3 \cos(x_3) \tan(x_1)} \end{bmatrix} [v - f(x)] \quad (9)$$

Trong đó v là tín hiệu ra của bộ điều khiển vòng ngoài $K(s)$ (Hình 2). Sau khi tuyến tính hóa quan hệ vào-ra của hệ thống như sau:

$$Y(s) = G_{TT}(s)V(s) \text{ với } G_{TT}(s) = \frac{1}{s^2} I \quad (10)$$

3.2 Vòng điều khiển ngoài

Phương trình (10) cho thấy sau khi tuyến tính hóa hệ thống đã được phân ly thành 2 hệ thống con độc lập nhau. Vì vậy bộ điều khiển $K(s)$ của vòng điều khiển ngoài sẽ là 2 bộ điều khiển một đầu vào một đầu ra độc lập nhau $K(s) = \text{diag}\{K_1(s), K_2(s)\}$. Để xác định $K_i(s)$, $i = 1, 2$, ta có thể sử dụng 1 trong 2 phương pháp như sau:

a) Điều khiển PD: Bộ điều khiển $K_i(s)$ có dạng như sau:

$$K_i(s) = K_{Pi} + \frac{K_{Di}s}{\tau s + 1}, i = 1, 2 \quad (11)$$

Trong đó K_{Pi} và K_{Di} là các thông số của bộ điều khiển PD. Hằng số dương τ được chọn rất bé so với thời gian đáp ứng của hệ thống vòng kín. Trong dải tần số thỏa $\tau \omega \ll 1$, $K_i(s) \approx K_{Pi} + K_{Di}s$ và hàm truyền đạt của hệ thống vòng kín được xác định bởi

$$H_i(s) = \frac{Y_i(s)}{R_i(s)} = \frac{K_i(s)G_{TT}(s)}{1 + K_i(s)G_{TT}(s)} \\ = \frac{K_{Di}s + K_{Pi}}{s^2 + K_{Di}s + K_{Pi}} \quad (12)$$

Các thông số của bộ điều khiển K_{Di} và K_{Pi} có thể được xác định sao cho $H_i(s)$ có cực chọn trước.

b) Khâu bổ chính bậc 1: Bộ điều khiển $K(s)$ có dạng sau

$$K_i(s) = \frac{a_i s + T_{1i}}{s + T_{2i}}, i = 1, 2 \quad (13)$$

Từ phương trình (10) và (13) ta được hàm truyền của hệ thống vòng kín

$$H_i(s) = \frac{Y_i(s)}{R_i(s)} = \frac{K_i(s)G_{TT}(s)}{1 + K_i(s)G_{TT}(s)} \\ = \frac{a_i s + T_{1i}}{s^3 + T_{2i}s^2 + a_i s + T_{1i}} \quad (14)$$

Các thông số của bộ điều khiển: a_i , T_{1i} , và T_{2i} có thể được xác định sao cho $H_i(s)$ có cực chọn trước.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Thay số từ bảng 1 ta được: $c_1 = -1.90$, $c_2 = 1.90$, $c_3 = 6.95$, $d_1 = -0.0088$, $d_2 = 1.44$, $d_3 = 0.032$. Mô hình trạng thái của robot xe đạp như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1.9 \sin(x_3)x_4^2 + 6.95u_1 - 0.0875 \tan(x_1) \cos^2(x_3)u_2}{1 - 0.0167 \cos^2(x_3)} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{-0.00836 \sin(2x_3)x_4^2 - 0.0612 \cos(x_3)u_1 + 0.0461 \tan(x_1) \cos(x_3)u_2}{1 - 0.0167 \cos^2(x_3)} \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_3 \end{cases} \quad (15)$$

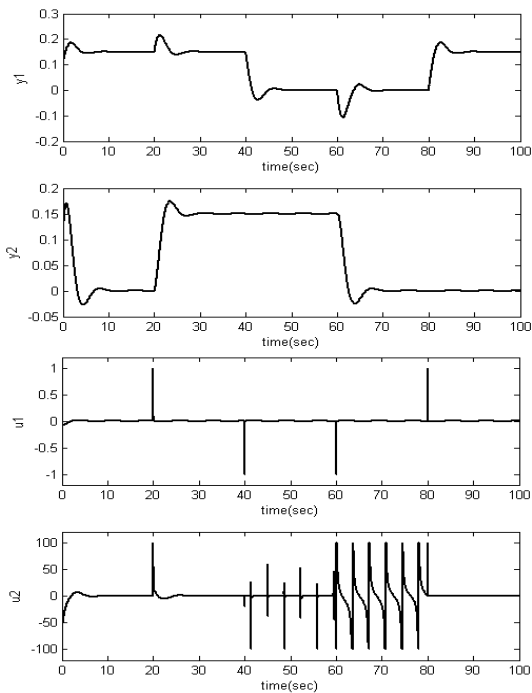
4.1 Điều khiển PD

Từ phương trình (12), để $H_1(s)$ và $H_2(s)$ có cực tại $-0.5 \pm j0.866$, ta có $K_P = \text{diag}\{1, 1\}$, $K_D = \text{diag}\{1, 1\}$, $\tau = 0.01$, kết quả mô phỏng được cho ở Hình 3.

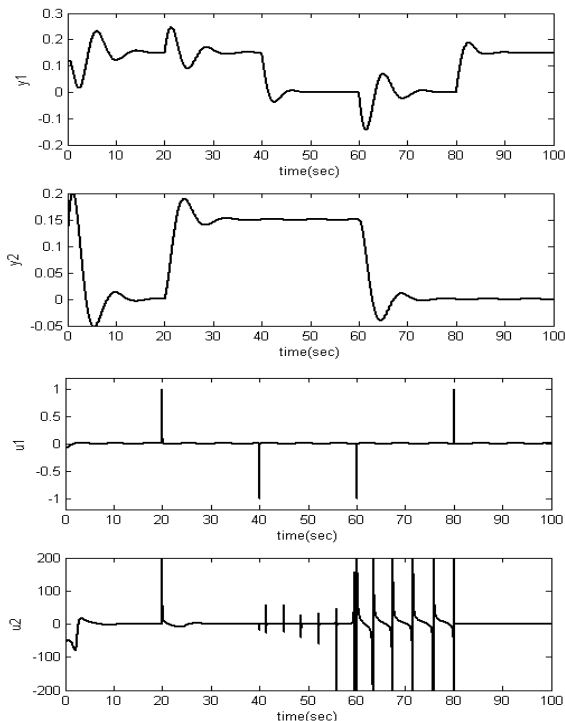
Ta thấy tín hiệu ra bám khá tốt theo tín hiệu đặt. Góc bánh lái y_1 có độ vọt lố là 24,66% và thời gian quá độ 4,2 s. Góc nghiêng của xe y_2 có độ vọt lố là 16,66%, thời gian quá độ 5 s.

Hình 3 cho thấy khi y_2 thay đổi, y_1 không đổi. Còn khi y_1 thay đổi, y_2 không đổi. Như vậy y_1 và y_2 có thể được điều khiển độc lập. Hệ kín ổn định vì nghiệm cực nằm ở bán trục mặt phẳng phức.

Để kiểm tra tính bền vững của hệ thống điều khiển đối với sự thay đổi của thông số mô hình, các mô phỏng cũng đã được thực hiện khi xe mang tải: khối lượng xe và tọa độ trọng tâm xe thay đổi ($m_2 = 36$ kg, $L_1 = 0.9$ m, $h = 0.8$ m) nhưng bộ điều khiển không đổi. Kết quả được trình bày ở hình 4. Kết quả điều khiển thay đổi không đáng kể cho thấy tính bền vững của hệ thống điều khiển.



Hình 3. Tín hiệu ra góc bánh lái y_1 , góc nghiêng của xe y_2 và tín hiệu điều khiển moment quay bánh lái u_1 , động năng của chuyển động tịnh tiến u_2 với $m_2=18$ kg, $L_1=0.7$ m, $h=0.92$ m, $K_P=diag\{1, 1\}$ và $K_D=diag\{1, 1\}$.



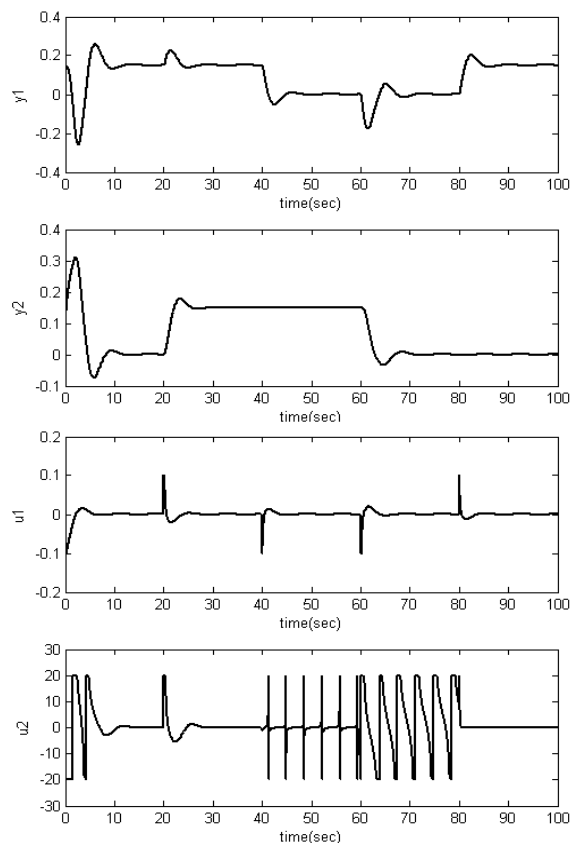
Hình 4. Tín hiệu ra góc bánh lái y_1 , góc nghiêng của xe y_2 và tín hiệu điều khiển moment quay bánh lái u_1 , động năng của chuyển động tịnh tiến u_2 với $m_2=36$ kg, $L_1=0.9$ m, $h=0.8$ m, $K_P=diag\{1, 1\}$ và $K_D=diag\{1, 1\}$.

4.2 Khâu bổ chính bậc 1

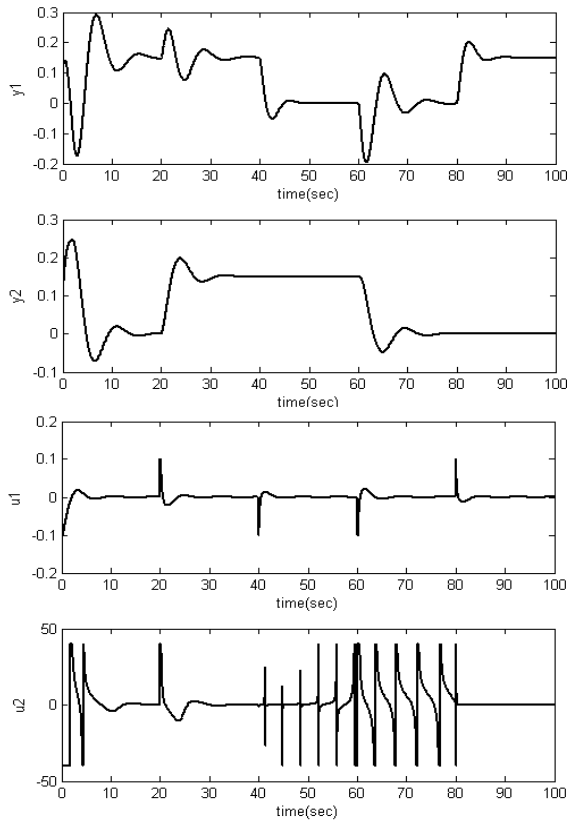
Từ phương trình (14), đề $H_1(s)$ và $H_2(s)$ có cực tại -5 , $-0.5 \pm j0.866$, ta có $a_i=6$, $T_{1i}=5$, $T_{2i}=6$. Kết quả mô phỏng được cho ở hình 5. Ta thấy tín hiệu ra bám khá tốt theo tín hiệu đặt. Góc bánh lái y_1 có độ vọt lố là 33% và thời gian quá độ 4.5 s. Góc nghiêng của xe y_2 có độ vọt lố là 17.33%, thời gian quá độ 3.9 s.

Hình 5 cho thấy khi y_2 thay đổi, y_1 không đổi. Còn khi y_1 thay đổi, y_2 không đổi. Như vậy y_1 và y_2 có thể được điều khiển độc lập. Hệ kín ổn định vì nghiệm cực nằm ở bán trái mặt phẳng phức.

Hình 6 trình bày kết quả mô phỏng khi xe mang tải: khối lượng xe và tọa độ trọng tâm xe thay đổi ($m_2 = 36$ kg, $L_1=0.9$ m $h=0.8$ m) nhưng bộ điều khiển không đổi. Tương tự như trường hợp bộ điều khiển PD, ta thấy hệ thống có tính bền vững đối với sai số mô hình.



Hình 5. Tín hiệu ra góc bánh lái y_1 , góc nghiêng của xe y_2 và tín hiệu điều khiển moment quay bánh lái u_1 , động năng của chuyển động tịnh tiến u_2 với $m_2=18$ kg, $L_1=0.7$ m, $h=0.92$ m.



Hình 6. Tín hiệu ra góc bánh lái y_1 , góc nghiêng của xe y_2 và tín hiệu điều khiển moment quay bánh lái u_1 , động năng của chuyển động tịnh tiến u_2 với $m_2=36$ kg, $L_1=0.9$ m, $h=0.8$ m.

So sánh điều khiển PD, khâu bù chính bậc 1 với [3]

Trong [3], luật điều khiển hồi tiếp trạng thái dùng phân bố cực được áp dụng cho hệ robot xe đạp được tuyến tính hóa vào-ra. Kết quả so sánh được trình bày ở bảng 2 và bảng 3.

Bảng 2. Góc bánh lái $y_1=\alpha$

	Tuyến tính hóa vào-ra + PD	Tuyến tính hóa vào-ra + Khâu bù chính bậc 1	[3]
Sai số xác lập	0	0	0
Thời gian quá độ (s)	4.2	4.5	4
Độ vọt lố (%)	24,66	33	5

Bảng 3. Góc nghiêng của xe $y_2=\beta$

	Tuyến tính hóa vào-ra + PD	Tuyến tính hóa vào-ra + Khâu bù chính bậc 1	[3]
Sai số xác lập	0	0	0
Thời gian quá độ (s)	5	3.9	5
Độ vọt lố (%)	16,66	17.33	20

Kết quả cho thấy bộ điều khiển PD và khâu bù chính bậc 1 là tốt và tương đương với [3] (bảng 3).

5 KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất hệ thống điều khiển robot xe đạp dựa trên phương pháp tuyến tính hóa vào-ra. Robot xe đạp là hệ phi tuyến, đa biến. Hai tín hiệu vào của hệ là moment bánh lái và động năng. Hai tín hiệu ra là góc bánh lái và góc nghiêng của xe. Hệ thống điều khiển đề xuất có hai vòng điều khiển. Vòng điều khiển trong có nhiệm vụ tuyến tính hóa và phân ly hệ robot xe đạp thành hai hệ thống một đầu vào một đầu ra. Vòng điều khiển ngoài là vòng điều khiển tuyến tính được thiết kế dùng phương pháp gán cực. Hai bộ điều khiển của vòng điều khiển ngoài đã được khảo sát: điều khiển PD và khâu bù chính bậc 1.

Kết quả mô phỏng đã cho thấy cả hai bộ điều khiển PD và khâu bù chính bậc 1 đều có chất lượng danh định tốt, như là thời gian quá độ ngắn và độ vọt lố bé. Hơn nữa, kết quả mô phỏng cho thấy rằng hệ thống điều khiển có tính bền vững đối với sai số mô hình, như là tải trọng và trọng tâm xe thay đổi. Hai tín hiệu ra được điều khiển độc lập nhau. Kết quả mô phỏng dùng điều khiển PD và khâu bù chính bậc 1 là tốt và tương đương với kết quả của hồi tiếp trạng thái dùng phân bố cực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Tanaka and T. Murakami, Self sustaining bicycle robot with steering controller, *Proceedings of the 8th IEEE International workshop on Advanced motion control*, Kawasaki, Japan, 2004, pp. 193-197.
- [2] K.J. Astrom, *Bicycle dynamics and control*, 66 pages, LTH, Lund University, Sweden, 2005.
- [3] L. Guo, Q. Liao, S. Wei and Y. Huang, A kind of bicycle robot dynamic modeling and nonlinear control, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, Harbin, China, 2010, pp. 1613-1617.
- [4] L. Guo, Q. Liao, and S. Wei, Design of fuzzy sliding mode controller for bicycle robot nonlinear system, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, 2006, pp.176-180.
- [5] Bui Trung Thanh and M. Parnichkun, Balancing control of bicyrobo by particle swarm optimization-based structure-specified mixed H_2/H_∞ control, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 5, pp. 395-402, 2008.
- [6] S. Chittaand and V. Kumar, Biking without pedaling, *Proceedings of IDETC'05 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, California, USA, 2005, pp. 659-668.
- [7] H.K. Khalil, *Nonlinear systems*, 768 pages, Prentice-Hall, 3rd Edition, 2002.
- [8] Dương Hoài Nghĩa, *Điều khiển hệ thống đa biến*, số trang 199, NXB ĐHQG Tp. HCM, 2013.
- [9] E. Nuno and R. Ortega, Achieving consensus of Euler-Lagrange agents with interconnecting delays and without velocity measurements via Passivity-based control, *IEEE Transactions on control systems technology*, 26, pp. 222-232, 2018.
- [10] M. B. Suarez, J. C. Romero, J. A. Legarda and H.C. Enriquez, A robust two-stage active disturbance rejection control for the stabilization of a riderless bicycle, *Multibody System Dynamics*, 45, pp. 7-35, 2019.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Dương Hoài Nghĩa
Trường Đại học Quốc tế Miền Đông
Email: nghia.duong@eiu.edu.vn

Huỳnh Minh Ngọc
Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM
Email: huynhminhngoc@iuh.edu.vn