

## Implementing Backstepping Technique for Pendubot System Control: A Fusion of Simulation and Experimentation

Vu-Chi Dang<sup>1,\*</sup>, Hai-Dang Tran<sup>1</sup>, Tuyen Pham<sup>1</sup>, Vo-Hoang-Lap Tran<sup>1</sup>, Truong-An-Khang Nguyen<sup>1</sup>, Dai-Phuc Hoang<sup>1</sup>, Minh-Duc Tran<sup>2</sup>, Minh-Tai Vo<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Ho Chi Minh City University of Technology and Education (HCMUTE), 01 Vo Van Ngan St., Linh Chieu ward, Thu Duc city, HCMC, Vietnam

<sup>2</sup>Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam National University - Ho Chi Minh City (VNU-HCM), 268 Ly Thuong Kiet St., Ward 14, District 10, HCMC, Vietnam

<sup>3</sup>School of Science, Engineering & Technology (SSET), RMIT University Vietnam, 702 Nguyen Van Linh Blvd., Tan Phong ward, District 7, HCMC, Vietnam

### Article info

#### Type of article:

Original research paper

#### DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.27-37>

#### \*Corresponding author:

E-mail address:

[20151033@student.hcmute.edu.vn](mailto:20151033@student.hcmute.edu.vn)

Received: 3/9/2023

Accepted: 24/11/2023

Published: 5/12/2023

**Abstract:** In this paper, the backstepping nonlinear control algorithm with the Vietnamese name “cuốn chiếu” is proposed to control the Pendubot nonlinear system. Pendubot is a two-DOF underactuated system with a single input and multiple outputs, with high nonlinearity and an uncomplicated mechanical model. In this study, the authors propose a backstepping algorithm to control the Pendubot system at the TOP position by simulation and experiment. In addition, the stability analysis for the whole system using the Lyapunov method is also presented in detail in this article. After completing the construction of the controller and stability analysis, the simulation results using MATLAB/Simulink software and experiments on the experimental setup are presented by the authors to evaluate the quality of the controller. The results of applying the map to simulation and experimental systems show stability during Pendubot operation with many different tasks including stability at a balanced position and following given trajectories.

**Keywords:** Pendubot, backstepping, Lyapunov algorithm, underactuated system, simulation, experiment.

## Ứng dụng giải thuật Backstepping điều khiển ổn định hệ thống Pendubot: Mô phỏng và thực nghiệm

Đặng Vũ Chí<sup>1,\*</sup>, Trần Hải Đăng<sup>1</sup>, Phạm Tuyên<sup>1</sup>, Trần Võ Hoàng Lập<sup>1</sup>, Nguyễn Trường An Khang<sup>1</sup>, Hoàng Đại Phúc<sup>1</sup>, Trần Minh Đức<sup>2</sup>, Võ Minh Tài<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM (HCMUTE), 01 Võ Văn Ngân, phường Linh Chiểu, thành phố Thủ Đức, TP.HCM, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Bách Khoa (HCMUT), Đại học Quốc gia TP.HCM (VNU-HCM), 268 Lý Thường Kiệt, phường 14, Quận 10, TP.HCM, Việt Nam

<sup>3</sup>Khoa Khoa học, Kỹ thuật & Công nghệ (SSET), Đại học RMIT Việt Nam, 702 Nguyễn Văn Linh, phường Tân Phong, Quận 7, TP.HCM, Việt Nam

### Thông tin bài viết

#### Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

#### DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.27-37>

#### \*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ E-mail:

[20151033@student.hcmute.edu.vn](mailto:20151033@student.hcmute.edu.vn)

Ngày nộp bài: 3/9/2023

Ngày chấp nhận: 24/11/2023

Ngày đăng bài: 5/12/2023

**Tóm tắt:** Trong bài báo này, giải thuật điều khiển phi tuyến backstepping có tên tiếng Việt là bộ điều khiển cuốn chiếu được đề xuất để điều khiển hệ thống phi tuyến Pendubot. Pendubot là hệ thống cánh tay robot thiếu dẫn động hai bậc tự do (2-DOF underactuated system) với một ngõ vào và nhiều ngõ ra (single input – multiple outputs), có độ phi tuyến cao và mô hình cơ khí không phức tạp. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất giải thuật điều khiển backstepping để điều khiển hệ Pendubot tại vị trí TOP bằng mô phỏng và thực nghiệm. Ngoài ra, việc phân tích ổn định cho toàn hệ thống bằng phương pháp Lyapunov cũng được trình bày chi tiết trong bài viết này. Sau khi hoàn tất việc xây dựng bộ điều khiển (BĐK) và phân tích ổn định, các kết quả mô phỏng bằng phần mềm MATLAB/Simulink và thực nghiệm trên hệ thống thực được nhóm tác giả trình bày để đánh giá chất lượng BĐK. Kết quả khi ứng dụng BĐK vào mô phỏng và hệ thống thực nghiệm cho thấy sự ổn định trong quá trình Pendubot hoạt động với nhiều tác vụ khác nhau bao gồm ổn định tại vị trí cân bằng và bám quỹ đạo cho trước.

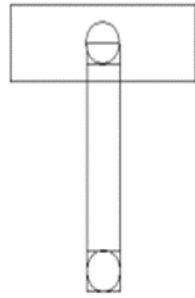
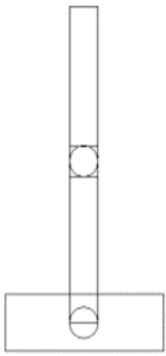
**Từ khóa:** Pendubot, backstepping, phương pháp Lyapunov, cánh tay robot thiếu dẫn động, mô phỏng, thực nghiệm.

### 1. Giới thiệu

Pendubot là một hệ thống cánh tay robot hai bậc tự do, có độ phi tuyến cao, và khó điều khiển. Xét về hình dáng bên ngoài, hệ Pendubot có hình dáng tương đồng với hệ thống Acrobot [1]. Tuy nhiên, điểm khác nhau của chúng ở chỗ, đối với mô hình Acrobot, động cơ được thiết kế ở khớp nối của hai thanh. Còn đối với hệ thống Pendubot, động cơ được kết nối ở thanh cánh tay của hệ và được gắn chặt vào một bộ đỡ. Kết cấu của hệ thống Pendubot thực bao gồm hai thanh đồng

chất, một động cơ DC servo kèm theo encoder, và một encoder được gắn tại điểm kết nối của hai thanh đồng chất. Chi tiết về kết cấu hệ thống và các thành phần trong hệ thống thực nghiệm sẽ được trình bày trong phần 5. Mục tiêu điều khiển cân bằng hệ Pendubot tại hai vị trí bao gồm vị trí TOP (tức là cả hai thanh thẳng đứng hướng lên như Hình 1a) và vị trí MIDDLE (tức là vị trí thanh cánh tay thẳng đứng xuống và thanh con lắc thẳng đứng hướng lên như Hình 1b). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả chỉ điều khiển hệ Pendubot tại vị

trí TOP.



**Hình 1a.** Hệ thống

**Hình 1b.** Hệ thống

Pendubot hoạt động tại vị trí TOP  $\left(\frac{\pi}{2}; 0\right)$

Pendubot hoạt động tại vị trí MIDDLE  $\left(-\frac{\pi}{2}; \pi\right)$

$$\text{vị trí TOP } \left(\frac{\pi}{2}; 0\right)$$

$$\text{vị trí MIDDLE } \left(-\frac{\pi}{2}; \pi\right)$$

Hệ thống Pendubot được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng để ứng dụng và đánh giá các bộ điều khiển khác nhau, bao gồm các bộ điều khiển tuyến tính (linear control) kết hợp điều khiển thông minh và bộ điều khiển phi tuyến (nonlinear control). Các BĐK tuyến tính kết hợp điều khiển thông minh được nhà nghiên cứu ứng dụng và khảo sát với hệ Pendubot, chẳng hạn như điều khiển toàn phương tuyến tính (LQR) kết hợp logic mờ, có tên gọi lên LQR-Fuzzy [2], PID kết hợp mờ [3, 4]. Tuy nhiên, để có thể sử dụng các BĐK tuyến tính này, chúng ta cần phải tìm được phương trình vi phân tuyến tính của hệ. Các phương pháp tuyến tính dựa trên các giả thiết về vùng hoạt động rất nhỏ của các biến trong hệ thống tuyến tính. Trong thực tế nhiều hệ thống rất khó tìm ra phương trình vi phân tuyến tính. Nếu chúng ta tăng số thanh của hệ Pendubot, các BĐK tuyến tính có khả năng không thể điều khiển được. Chính vì thế, việc ứng dụng các BĐK phi tuyến là cần thiết. Nhiều nghiên cứu khảo sát các BĐK phi tuyến cho hệ Pendubot đã được công bố, chẳng hạn như điều khiển trượt [5], mờ trượt [6], mờ trượt thích nghi [7], mạng thần kinh nhân tạo trượt thích nghi [8], điều khiển dựa vào tính thụ động [9, 10], kết nối liên kết và chỉ định giảm chấn tính thụ động - điều khiển dựa vào tính thụ động (Interconnection and Damping Assignment Passivity—Based Control) [11], backstepping [12].

Trong nghiên cứu này, ý tưởng tương đối giống với nghiên cứu [12] nhưng nghiên cứu này chỉ dừng lại mức độ khảo sát bằng mô phỏng. Chính vì thế, nhóm tác giả nhận thấy rằng cần thiết xây dựng hệ thống thực nghiệm để khảo sát BĐK phi tuyến backstepping. Năm 1990, Petar V. Kokotovic là người đầu tiên đề xuất kỹ thuật backstepping để xác định hàm điều khiển Lyapunov. Kỹ thuật này có khả năng áp dụng cho lớp đối tượng phi tuyến dạng truyền ngược [13]. Phương pháp dựa trên cách thiết kế từng bước bộ điều khiển phản hồi thỏa mãn ổn định Lyapunov. Bằng việc sử dụng phương pháp thiết kế đệ quy để xây dựng hàm điều chỉnh, Backstepping cho phép xây dựng luật điều khiển phản hồi chế ngự được tính phi tuyến của đối tượng. Việc áp dụng phương pháp vào thiết kế bộ điều khiển cho hệ Pendubot cho ta kết quả đáng tin cậy và hiệu quả.

Bài báo này được tổ chức theo cấu trúc như sau: phần 1 giới thiệu khái quát về hệ Pendubot, lược sử tài liệu và giới thiệu mục tiêu nghiên cứu, trong phần 2 của bài viết, hệ phương trình động lực học của hệ và mục tiêu điều khiển được trình bày, thiết kế bộ điều khiển backstepping và phân tích ổn định được trình bày trong phần 4, phần 5 trình bày về hệ thống thực nghiệm, kiểm nghiệm phương pháp điều khiển bằng mô phỏng và thực nghiệm được trình bày trong phần 6, tổng kết và hướng phát triển được thảo luận ở phần 7.

## 2. Mô hình toán học của hệ thống

Phương trình động lực học của hệ thống Pendubot được mô tả trong phương trình (1) và (2) như sau:

$$D_{11} \ddot{q}_1 + D_{12} \ddot{q}_2 + C_{11} \dot{q}_1 + C_{12} \dot{q}_2 + G_1 = \tau_1 - b_1 \dot{q}_1 \quad (1)$$

$$D_{21} \ddot{q}_1 + D_{22} \ddot{q}_2 + C_{21} \dot{q}_1 + G_2 = -b_2 \dot{q}_2 \quad (2)$$

Trong đó

$$D_{11} = (\theta_1 + \theta_2 + 2\theta_3)$$

$$D_{12} = (\theta_2 + \cos(q_2)\theta_3)$$

$$C_{11} = -\theta_3 \sin(q_2)\dot{q}_2$$

$$C_{12} = -(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2)\theta_3$$

$$G_1 = \theta_4 g \cos(q_1) + \theta_4 g \cos(q_1 + q_2)$$

$$D_{21} = (\theta_2 + \cos(q_2)\theta_3)$$

$$D_{22} = \theta_2$$

$$C_{21} = \theta_3 \sin(q_2)\dot{q}_1$$

$$G_2 = \theta_5 g \cos(q_1 + q_2)$$

$$\theta_1 = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_{c2}^2 + l_{c1}$$

$$\theta_2 = m_2 l_{c2}^2 + l_{c2}$$

$$\theta_3 = m_1 l_{c1} l_{c2}$$

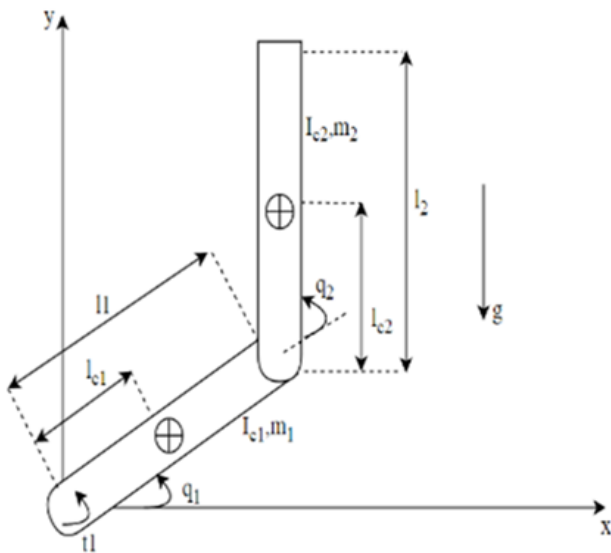
$$\theta_4 = (m_1 + m_2) l_{c1}$$

$$\theta_5 = m_2 l_{c2}$$

$$\theta_6 = C + \frac{k_t^2}{R}$$

$$\theta_7 = \frac{k_t}{R}$$

$b_2$	Ma sát góc thanh con lắc
$l_{c1}$	Quán tính thanh cánh tay
$l_{c2}$	Quán tính thanh con lắc
$R$	Điện trở động cơ DC
$k_t$	Hằng số mô men xoắn
$J_m$	Mô men quán tính động cơ
$\tau_1$	Mô men xoắn được tạo ra bởi động cơ tại trục quay của thanh cánh tay
$u$	Điện áp cấp động cơ
$q_1$	Góc thanh cánh tay
$q_2$	Góc thanh con lắc
$\dot{q}_1$	Vận tốc góc thanh cánh tay
$\dot{q}_2$	Vận tốc góc thanh con lắc
$\ddot{q}_1$	Gia tốc góc thanh cánh tay
$\ddot{q}_2$	Gia tốc góc thanh con lắc



Hình 2. Mô hình phân tích hệ thống Pendubot

Các kí hiệu của hệ thống và ý nghĩa của chúng được trình bày lần lượt trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số hệ Pendubot

Tham số	Thông tin
$m_1$	Khối lượng thanh cánh tay
$l_{c1}$	Chiều dài tâm thanh cánh tay
$m_2$	Khối lượng thanh con lắc
$l_{c2}$	Chiều dài tâm thanh con lắc
$g$	Gia tốc trọng trường
$b_1$	Ma sát góc thanh cánh tay

Vì tín hiệu đầu vào thực tế của hệ thống Pendubot là điện áp cấp vào động cơ DC nên việc chuyển đổi phương trình toán học đầu tiên được biểu thị trong (1) của hệ thống sang phương trình mới được trình bày theo công thức dưới đây:

$$u = \frac{\tau_1 + J_m \ddot{q}_1 + \theta_6 \dot{q}_1}{\theta_7} \tag{3}$$

### 3. Thiết kế bộ điều khiển backstepping

Trong phần này, phương pháp đề xuất backstepping được nhóm tác giả xây dựng để điều khiển trực tiếp hệ thống phi tuyến Pendubot bằng cách thay thế (3) vào (1), các phương trình toán học mới của hệ thống Pendubot sử dụng  $v$  làm đầu vào như sau:

$$(D_{11} + J_m)\ddot{q}_1 + D_{12}\ddot{q}_2 + (C_{11} + \theta_6 + b_1)\dot{q}_1 + C_{12}\dot{q}_2 + G_1 = \theta_7 u \tag{4}$$

$$D_{21}\ddot{q}_1 + D_{22}\ddot{q}_2 + C_{21}\dot{q}_1 + b_2\dot{q}_2 + G_2 = 0 \tag{5}$$

Chúng ta biến đổi (4) và (5) thành dạng như mô tả trong (6). Do đó, ta có phương trình mới như sau:

$$\ddot{q}_1 = F_1(q, \dot{q}) + B_1(q, \dot{q})u \tag{6}$$

$$\ddot{q}_2 = F_2(q, \dot{q}) + B_2(q, \dot{q})u \tag{7}$$

Trong đó

$$F_1(q, \dot{q}) = \frac{-D_{12}D_{21}(C_{11} + \theta_6 + b_1 + C_{12} + G_1)}{(D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21})(D_{11} + J_m)} + \frac{(C_{21}\dot{q}_1 + b_2\dot{q}_2 + G_2)D_{12}}{D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21}} - \frac{C_{11} + \theta_6 + b_1 + C_{12} + G_1}{D_{11} + J_m}$$

$$B_1(q, \dot{q}) = \frac{\theta_7 [D_{12}D_{21} + D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21}]}{(D_{11} + J_m)(D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21})}$$

$$F_2(q, \dot{q}) = \frac{D_{21}(C_{11} + \theta_6 + b_1) + C_{12}D_{21} + D_{21}G_1 - (C_{21}\dot{q}_1 + b_2\dot{q}_2 + G_2)(D_{11} + J_m)}{D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21}}$$

$$B_2(q, \dot{q}) = -\frac{D_{21}\theta_7}{D_{22}(D_{11} + J_m) - D_{12}D_{21}}$$

Áp dụng đầu vào như sau để chuyển hệ (6), (7) sang hệ mới như sau:

$$u = \frac{-F_1(q, \dot{q}) + u_t}{B_1(q, \dot{q})} \quad (8)$$

Với  $u_t$  là ngõ vào điều khiển của phương pháp backstepping sẽ được trình bày bên dưới.

Vì đầu vào trong (8) áp dụng cho hệ thống nên chúng ta chuyển đổi thành hệ thống mới được mô tả như sau:

$$\ddot{q}_1 = u_t \quad (9)$$

$$\ddot{q}_2 = F(q, \dot{q}) + B(q, \dot{q})u_t \quad (10)$$

Trong đó

$$F(q, \dot{q}) = F_2(q, \dot{q}) - \frac{F_1(q, \dot{q})B_2(q, \dot{q})}{B_1(q, \dot{q})}$$

$$B(q, \dot{q}) = \frac{B_2(q, \dot{q})}{B_1(q, \dot{q})}$$

Chúng ta định nghĩa biến điều khiển mới của hệ thống như sau:

$$z_1 = c_1(q_1 - q_{1d}) + c_2(q_2 - q_{2d}) - c_3((\dot{q}_2 - \dot{q}_{2d}) - (\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})B(q, \dot{q})) \quad (11)$$

Lấy đạo hàm của (11), ta được:

$$\dot{z}_1 = c_1\dot{q}_1 + c_2\dot{q}_2 - c_3(F(q, \dot{q}) - (q_1 - q_{1d})\dot{B}(q, \dot{q})) \quad (12)$$

Hàm ổn định phù hợp được xác định như sau:

$$\alpha = c_3(F(q, \dot{q}) - (\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})B(q, \dot{q})) - k_1z_1 - c_2\dot{q}_2 \quad (13)$$

Biến  $z_2$  được định nghĩa như sau:

$$z_2 = c_1\dot{q}_1 - \alpha \quad (14)$$

Khi  $z_2 \rightarrow 0$ , ta có  $c_1\dot{q}_1 \rightarrow \alpha$ , sau đó ta được:

$$\dot{z}_1 = z_2 - k_1z_1 \quad (15)$$

Đạo hàm  $z_2$ , ta được:

$$\dot{z}_2 = c_1u_t + c_2F(q, \dot{q}) + c_2B(q, \dot{q})u_t + c_3\dot{F}(q, \dot{q}) - c_3(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})\dot{B}(q, \dot{q}) - c_3\dot{B}(q, \dot{q})u_t + k_1\dot{z}_1 \quad (16)$$

Trong đó

$$\dot{F}(q, \dot{q}) = \frac{\partial F(q, \dot{q})}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial F(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1}\ddot{q}_1 + \frac{\partial F(q, \dot{q})}{\partial q_2}\dot{q}_2 + \frac{\partial F(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2}\ddot{q}_2 = f_1(q, \dot{q}) + g_1(q, \dot{q})u_t$$

$$\dot{B}(q, \dot{q}) = \frac{\partial B(q, \dot{q})}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial B(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1}\ddot{q}_1 + \frac{\partial B(q, \dot{q})}{\partial q_2}\dot{q}_2 + \frac{\partial B(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2}\ddot{q}_2 = f_2(q, \dot{q}) + g_2(q, \dot{q})u_t$$

$$\dot{\dot{B}}(q, \dot{q}) = \frac{\partial \dot{B}(q, \dot{q})}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial \dot{B}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1}\ddot{q}_1 + \frac{\partial \dot{B}(q, \dot{q})}{\partial q_2}\dot{q}_2 + \frac{\partial \dot{B}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2}\ddot{q}_2 = f_3(q, \dot{q}) + g_3(q, \dot{q})u_t$$

Để đảm bảo cho hệ thống ổn định thì

$$\dot{z}_2 = -z_1 - k_2z_2 \quad (17)$$

Thay (16) vào (17), ta có luật điều khiển cho hệ thống:

$$u_t = \frac{-c_2F(q, \dot{q}) - c_3f_1 - c_3(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})f_3 - c_3f_2 + k_1z_1 - z_1 - k_2z_2}{c_1 + c_2B(q, \dot{q}) + c_3g_1 - c_3(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})g_3 + c_3g_2} \quad (18)$$

Luật điều khiển cuối cùng đạt được bằng cách thay (18) vào (8), ta có:

$$u = \frac{-F_1(q, \dot{q}) + u_t}{B_1(q, \dot{q})} \quad (19)$$

Trong đó

$$u_t = \frac{-c_2F(q, \dot{q}) - c_3f_1 - c_3(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})f_3 - c_3f_2 + k_1z_1 - z_1 - k_2z_2}{c_1 + c_2B(q, \dot{q}) + c_3g_1 - c_3(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d})g_3 + c_3g_2}$$

**4. Phân tích ổn định của hệ thống với giải thuật backstepping**

Hàm Lyapunov được định nghĩa như sau:

$$V = \frac{1}{2}k_1z_1^2 + \frac{1}{2}k_2z_2^2 \tag{20}$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov đã xác định có thể được tính như sau:

$$\dot{V} = k_1z_1\dot{z}_1 + k_2z_2\dot{z}_2 \tag{21}$$

Sau khi áp dụng luật điều khiển (19) cho Pendubot, thu được kết quả:

$$\dot{V} = -k_1z_1^2 - k_2z_2^2 \tag{22}$$

Phương trình trong (22) đảm bảo rằng  $V(t) \leq V(0)$  theo thời gian, do đó,  $z_2 \rightarrow 0$  và  $z_1 \rightarrow 0$

Khi  $z_1 \rightarrow 0$  và  $z_2 \rightarrow 0$ , nếu vị trí ban đầu của hệ thống gần với điểm cân bằng, chúng ta có thể đạt được độ ổn định tiệm cận tổng thể của hệ thống, điều đó có nghĩa là  $\dot{q}_2$  và  $q_2$  sẽ hội tụ đến điểm đặt hay  $(q_2 - q_{2d}) \rightarrow 0$ , và  $(\dot{q}_2 - \dot{q}_{2d}) \rightarrow 0$ .

$$\ddot{q}_2 = F(q_2, \dot{q}_2) + B(q_2, \dot{q}_2)u \Big|_{z_1=0} = 0 \tag{23}$$

Khi  $q_2$  và  $\dot{q}_2$  tiến về vị trí đặt, thì ta có được:

$$q_1 - q_{1d} = -\frac{c_3}{c_1}B(q, \dot{q})(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d}) \tag{24}$$

Vì  $B(q_2, \dot{q}_2) = \frac{4I_2 + 3I_1}{4I_2} > 0$  khi  $z_1 \rightarrow 0$ , Do

đó,  $(q_1 - q_{1d}) \rightarrow 0$  và  $(\dot{q}_1 - \dot{q}_{1d}) \rightarrow 0$ .

**5. Hệ thống thực nghiệm Pendubot**

Trong phần này, nhóm tác giả giới thiệu về hệ thống thực nghiệm Pendubot mà nhóm tác giả xây dựng để phục vụ cho nghiên cứu này. Hình 3 và Hình 4 trình bày lần lượt về hệ Pendubot đang ở trạng thái nghỉ và cân bằng tại vị trí TOP khi nhúng giải thuật backstepping vào hệ thực.

Trong Hình 4, các thành phần cấu tạo nên hệ thống thực nghiệm được đánh số và mô tả theo thứ tự như sau:

1. Vi điều khiển STM32F407VG Discovery.
2. Động cơ Nidec DC servo series F có kèm cảm biến encoder 200 xung.

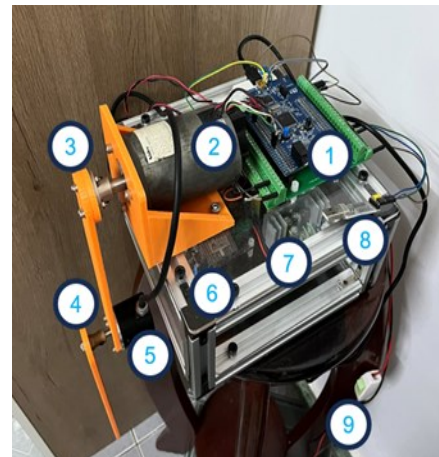
3. Thanh cánh tay của hệ.
4. Thanh con lắc của hệ.
5. Cảm biến encoder thanh con lắc 600 xung.
6. Driver IR2184.
7. Bộ chuyển đổi nguồn cung cấp 220 VAC – 24 VDC.
8. Mạch chuyển đổi CP2102 USB UART.
9. Nguồn cung cấp 220 VAC.



Hình 3. Hệ Pendubot ở trạng thái nghỉ



Hình 4. Hệ Pendubot cân bằng ổn định tại vị trí TOP khi ứng dụng BDK backstepping



Hình 5. Thành phần hệ thống thực nghiệm



### 6. Kết quả kiểm nghiệm trên mô phỏng và thực nghiệm

Trước tiên, nhóm tác giả trình bày các thông số hệ thống Pendubot mà nhóm dùng trong nghiên cứu này. Các thông số hệ thống này được nhóm tác giả cung cấp dựa trên hệ thống thực nghiệm.

Thông số hệ thống được trình bày chi tiết trong Bảng 2 sau đây:

**Bảng 2.** Thông số hệ Pendubot

Giá trị thông số hệ thống	Đơn vị
$m_1 = 0.11129$	kg
$I_{c1} = 0.13063$	m
$m_2 = 0.02929$	kg
$I_{c2} = 0.10165$	m
$g = 9.81$	m/s <sup>2</sup>
$b_1 = 0.0067476$	1/s
$b_2 = 9.8684e-10$	1/s

$$I_{c1} = \frac{1}{3} m_1 l_{c1}^2 \quad \text{kg m}^2$$

$$I_{c2} = \frac{1}{3} m_2 l_{c2}^2 \quad \text{kg m}^2$$

$$R = 3.233 \quad \Omega$$

$$k_t = 0.14752 \quad \text{Nm/A}$$

$$J_m = 2.4863e-07 \quad \text{kg m}^2$$

Thông số bộ điều khiển backstepping được chọn và trình bày trong Bảng 3 như sau:

**Bảng 3.** Thông số bộ điều khiển backstepping

$$c_1 = 90$$

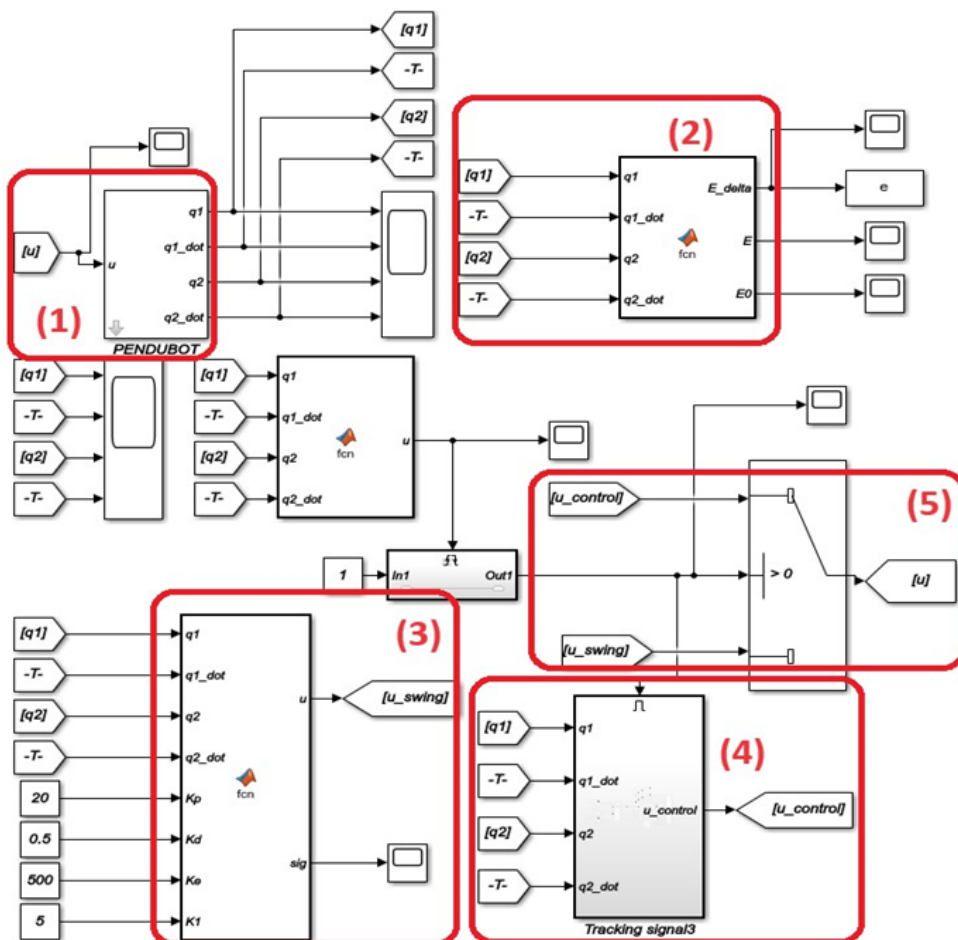
$$c_2 = 70$$

$$c_3 = 4$$

$$k_1 = 10$$

$$k_2 = 20$$

#### 6.1. Kết quả mô phỏng

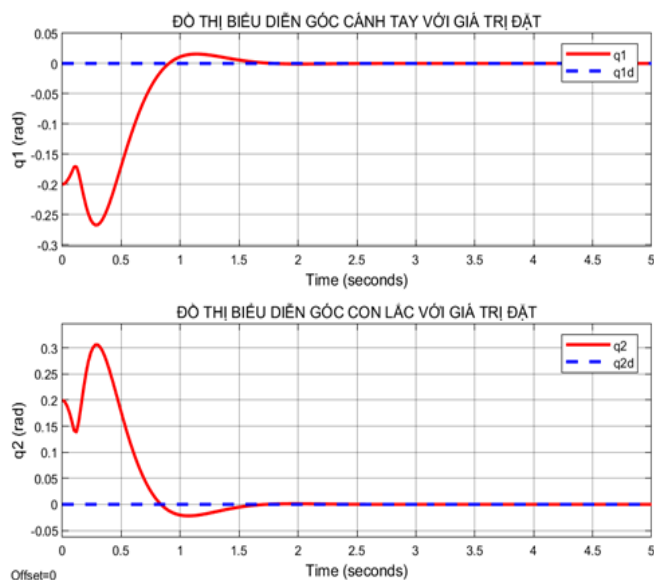


**Hình 6.** Chương trình mô phỏng điều khiển hệ thống Pendubot bằng giải thuật backstepping

Trong phần này, nhóm tác giả thực hiện ba trường hợp để kiểm tra đánh giá giải thuật backstepping khi ứng dụng vào hệ Pendubot bằng phần mềm Matlab/Simulink. Chương trình mô phỏng điều khiển hệ thống Pendubot bằng phương pháp backstepping được mô tả trong Hình 6 bao gồm các khối như sau:

1. Khối hệ thống Pendubot: mô hình toán học của hệ thống được lập trình trên Matlab.
2. Khối tính toán năng lượng dùng cho bộ điều khiển swing-up.
3. Khối bộ điều khiển swing-up: bộ điều khiển swing-up bằng phương pháp năng lượng được tích hợp trong mô phỏng để đưa hệ thống lên vị trí cân bằng thẳng đứng hướng lên. Tuy nhiên, bài nghiên cứu này tập trung vào điều khiển cân bằng bằng phương pháp backstepping cho hệ thống Pendubot nên nhóm tác giả không bàn bạc sâu về bộ điều khiển swing-up.
4. Khối bộ điều khiển cân bằng bằng phương pháp backstepping: chức năng của khối này là điều khiển cân bằng hệ thống và điều khiển bám quỹ đạo.
5. Khối chuyển tiếp giữa bộ điều khiển swing-up và bộ điều khiển cân bằng backstepping.

**Trường hợp 1: giá trị ban đầu là  $q_1 = -0.2$  (rad) và  $q_2 = 0.2$  (rad)**

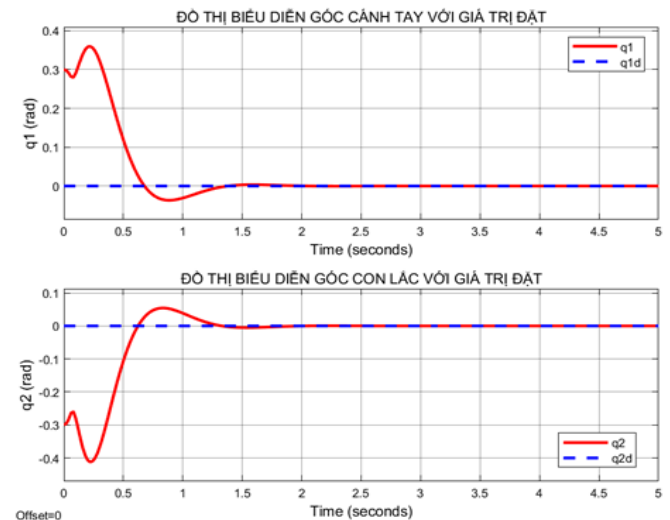


**Hình 7.** Trạng thái đầu vào của cánh tay và góc

con lắc của hệ thống Pendubot

Theo Hình 7, với giá trị đầu là  $q_1 = -0.2$  (rad) và  $q_2 = 0.2$  (rad), thì hệ thống ổn định sau 1 khoảng thời gian là 1.5 giây với bộ thông số được chọn. Điều này cho thấy khả năng ổn định của hệ thống với giá trị đặt là 0 (rad) của bộ điều khiển backstepping.

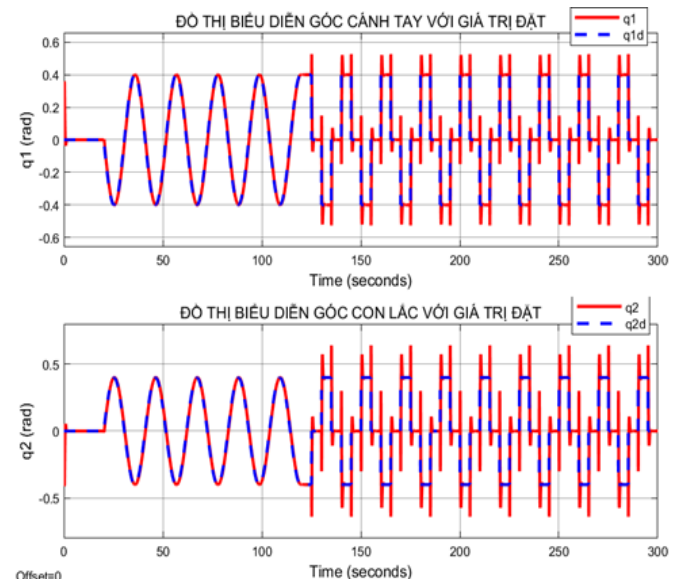
**Trường hợp 2: giá trị ban đầu là  $q_1 = -0.3$  (rad) và  $q_2 = 0.3$  (rad)**



**Hình 8.** Trạng thái đầu vào của cánh tay và góc con lắc của hệ thống Pendubot

Theo Hình 8, tăng giá trị ban đầu là  $q_1 = -0.3$  (rad) và  $q_2 = 0.3$  (rad), thì hệ thống ổn định sau 1.5 giây giống với trường hợp 1 trước đó.

**Trường hợp 3: bám quỹ đạo đặt là sóng sine và xung vuông**





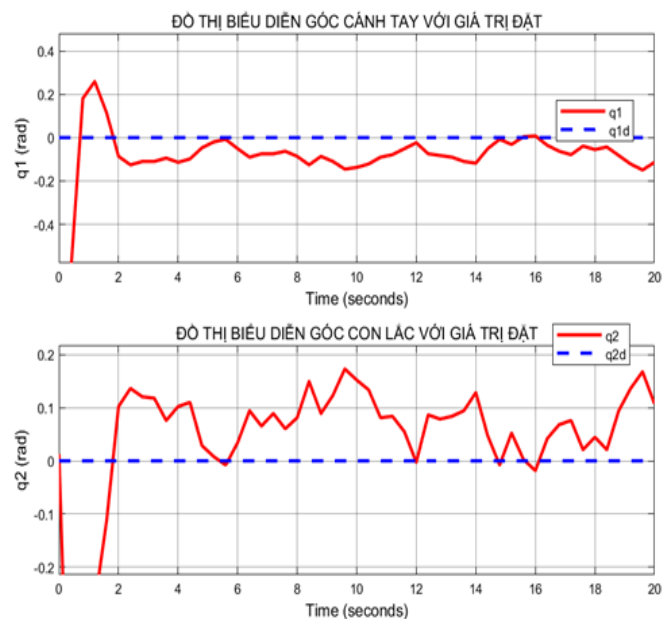
**Hình 9.** Trạng thái đầu vào của cánh tay và góc con lắc của hệ thống Pendubot

Mục tiêu trong trường hợp này là điều khiển bám quỹ đạo để nâng cao thêm tác vụ của hệ thống khi áp dụng BDK backstepping vào hệ thống. Kết quả trường hợp này được trình bày trong Hình 9 là đưa ngõ vào sóng sine và xung vuông. Ta có thể thấy được khả năng bám quỹ đạo của bộ điều khiển với nhiều giá trị đặt khác nhau.

**6.2. Kết quả thực nghiệm**

Sau khi có được kết quả khả quan từ mô phỏng, tác giả áp dụng vào mô hình thực tế của hệ Pendubot. Trong phần này, kết quả nghiên cứu cũng được trình bày thành hai trường hợp.

**Trường hợp 1: điều khiển cân bằng ổn định cả hai thanh quanh vị trí 0 (rad)**



**Hình 10.** Trạng thái đầu vào của cánh tay và góc con lắc của hệ thống Pendubot

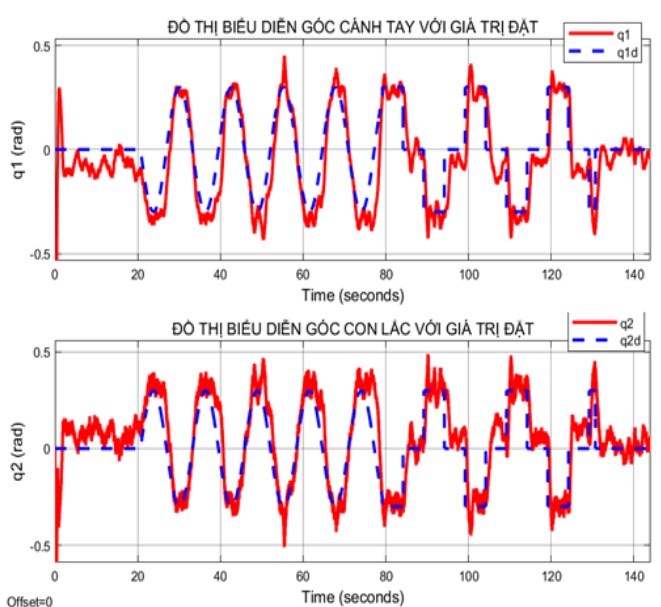
Trong phần thí nghiệm này, tác giả thực hiện nâng hai thanh con lắc và cánh tay của hệ lên vị trí cân bằng 0 (rad) và tại thời điểm 2 giây thì tác giả bật nguồn cung cấp cho hệ. Sau khi có nguồn cung cấp thì hai thanh con lắc và cánh tay bám quanh vị trí cân bằng nhưng vẫn còn dao động xung quanh điểm đặt, do nhiều nguyên nhân có thể liệt kê như vẫn còn sai số khi nhận dạng hệ thống, tham số động cơ thay đổi khi nhiệt độ thay đổi, và một số lí do khác. Mặc cho những cản trở như thế, bộ điều

khiển vẫn chứng minh được khả năng điều khiển ổn định hệ thống.

**Trường hợp 2: điều khiển bám quỹ đạo đặt**

Trong trường hợp này, quỹ đạo mà nhóm tác giả đề xuất có dạng như sau:

- Giây thứ 0 đến giây thứ 20, điều khiển bám quanh vị trí 0 rad.
- Giây thứ 21 đến giây thứ 90, điều khiển bám quỹ đạo hình sin, có biên độ  $(\pm)0.3$  (rad).
- Giây thứ 90 đến giây thứ 130, điều khiển bám quỹ đạo hình xung vuông.
- Giây thứ 131 đến vô cùng, điều khiển bám quanh vị trí 0 (rad).



**Hình 11.** Trạng thái đầu vào của cánh tay và góc con lắc của hệ thống Pendubot

Khi thay đổi các giá trị đặt bằng sóng sine hay xung vuông thì đáp ứng hệ thống như Hình 11 cho thấy khả năng bám quỹ đạo của bộ điều khiển.

Video thực nghiệm trên hệ thống thực Pendubot có thể được xem tại địa chỉ Youtube: <https://youtu.be/IC9QXhCikno>. Đoạn video 2.12 phút mô tả về quá trình điều khiển hệ Pendubot khi nhúng giải thuật điều khiển backstepping. Hệ thống Pendubot cân bằng ổn định tại vị trí TOP đúng như yêu cầu điều khiển đề ra.

**7. Kết luận**

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã ứng

dụng thành công giải thuật điều khiển backstepping cho đối tượng cánh tay robot thiếu dẫn động Pendubot bằng mô phỏng thực nghiệm. Các trường hợp được đề xuất để đánh giá chất lượng điều khiển trong quá trình khảo sát bao gồm điều khiển cân bằng tại vị trí TOP và điều khiển bám quỹ đạo để nâng cao thêm tác vụ của hệ thống. Mục tiêu nghiên cứu trong tương lai của nhóm bao gồm thiết kế hệ thống pendubot ba thanh và điều khiển bằng giải thuật pendubot, con lắc là kết hợp phương pháp điều khiển backstepping và giải thuật tối ưu bầy đàn để tối ưu thông số điều khiển nhằm cải thiện chất lượng bộ điều khiển.

#### Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về kiến thức, kinh nghiệm và những lời khuyên bổ ích của Tiến sĩ Nguyễn Văn Đông Hải, giảng viên Khoa Điện – Điện tử trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TPHCM (HCMUTE).

#### Tài liệu tham khảo

- [1] A. Moran-MacDonald, M. Maggiore and X. Wang. (2023). From Gymnastics to Virtual Nonholonomic Constraints: Energy Injection, Dissipation, and Regulation for the Acrobot. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pp. 1 - 14, 2023, doi: 10.1109/TCST.2023.3294065..
- [2] T.N. Nguyễn, P.L. Nguyễn, và V. Đông H. Nguyễn. (2019). Điều khiển hệ Pendubot sử dụng dạng toàn phương tuyến tính dựa trên logic mờ. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, vol. 38, pp. 89-93, 2019.
- [3] H.-C. Tran, M.-T. Nguyen, and Đ.-H.V. Nguyen. (2017). Application of pid-fuzzy control for pendubot,” *JTE*, vol. 44A, p. 61–67, 2017.
- [4] H.T. Nguyen, M.T. Nguyen, V.D.H. Nguyen, T. T. Doan, C. P. Vo. (2017). Designing PID-Fuzzy controller for pendubot system. *Robotica & Management*, vol. 22, no. 2, pp. 21-27, 2017.
- [5] D. S. Yoo. (2013). Balancing control for the pendubot using sliding mode. in *IEEE ISR* 2013, Seoul, Korea (South), 2013, doi: 10.1109/ISR.2013.6695735.
- [6] V. D. Dat, H. X. Dung, P. V. Kiem, N. M. Tam, N. V. D. Hai. (2017). Phương pháp điều khiển mờ-trượt cho hệ pendubot,” *UD-JST*, vol. 11, no. 120.1, p. 12–16, 2017.
- [7] A. K. V. e. al. (2020). Simulation of adaptive fuzzy hierarchical sliding mode control for Pendubot. *JTE*, vol. 57, p. 25–34, 2020.
- [8] V.-T. Nguyen, X.-T. Vu, H.-B. Giap. (2022). Adaptive Neural Network Hierarchical Sliding-Mode Control for Pendubot Based Genetic Algorithm Optimization,” in *Intelligent Systems and Networks: Selected Articles from ICISN 2022*, Vietnam, 471, doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3394-3\\_66](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3394-3_66).
- [9] I. Fantoni, R. Lozano and M. W. Spong. (1999). Passivity based control of the Pendubot. in *Proceedings of the 1999 American Control Conference (Cat. No. 99CH36251)*, San Diego, CA, USA, 1999, doi: 10.1109/ACC.1999.782782.
- [10] O. Kolesnichenko and A. Shiriaev. (2000). On global properties of passivity based control for swinging Pendubot. in *2000 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521)*, St. Petersburg, Russia, 2000, doi: 10.1109/COC.2000.873502.
- [11] J. Sandoval, R. Ortega, R. Kelly. (2008). Interconnection and damping assignment passivity—based control of the pendubot. *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 7700-7704, 2008, doi: <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01302>.
- [12] S. Rudra and R. K. Ba. (2016). Design of block backstepping based nonlinear state feedback controller for pendubot. in *IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI)*, Kolkata, India, 2016, doi: 10.1109/CMI.2016.7413794.

- [13] Miroslav Krstic, Ioannis Kanellakopoulos, Petar V. Kokotovic. (1995). Nonlinear and Adaptive Control Design, New York: Wiley, 1995.