

SO SÁNH GIẢI THUẬT ĐIỀU KHIỂN SWING-UP DỰA VÀO PHƯƠNG PHÁP NĂNG LƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP HỒI QUY TUYẾN TÍNH HÓA CỤC BỘ KẾT HỢP NĂNG LƯỢNG

COMPARATIVE ANALYSIS OF SWING-UP STRATEGIES: ENERGY-BASED METHOD VERSUS COMBINED PARTIAL FEEDBACK LINEARIZATION – ENERGY-BASED METHOD

Trần Minh Đức¹, Nguyễn Khánh Duy², Hà Phạm Trọng Phú², Trần Thanh Phong^{3,4}, Nguyễn Văn Đông Hải², Võ Minh Tài^{1,5*}

¹Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh, Hồ Chí Minh, Việt Nam

³Trường Đại học Tiền Giang, Tiền Giang, Việt Nam

⁴Đại học Angers, Pháp

⁵Đại học RMIT Việt Nam, Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tai.vo3@rmit.edu.vn

(Nhận bài / Received: 13/7/2023; Sửa bài / Revised: 21/11/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 23/11/2023)

Tóm tắt - Giải thuật điều khiển swing-up đối với hệ con lắc ngược quay (viết tắt là RIP) là một trong những chủ đề trọng tâm và có nhiều nghiên cứu trong lĩnh vực lý thuyết điều khiển tự động. Nhiệm vụ của bộ điều khiển (viết tắt là BDK) swing-up là đưa con lắc từ vị trí ban đầu về vị trí cân bằng mong muốn. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ dựa trên nghiên cứu trước đó là BDK swing up năng lượng (viết tắt là EBM), sau đó phát triển BDK kết hợp với giải thuật hồi quy tuyến tính hóa cục bộ (PFL) tạo ra một BDK mới (viết tắt là CPFL-EBM) loại bỏ hạn chế từ BDK cũ. Trong quá trình thực hiện nghiên cứu, nhóm tác giả đã trình bày mô hình hóa toán học cho hệ RIP cũng như là phân tích và triển khai hai BDK swing-up lên đối tượng RIP với sự hỗ trợ của công cụ MATLAB/Simulink. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy CPFL-EBM hoạt động tốt hơn EBM ở nhiều khía cạnh và giải quyết được điểm yếu của BDK này.

Từ khóa - BDK swing-up; Phương pháp hồi quy tuyến tính hóa cục bộ; Phương pháp năng lượng; Phương pháp kết hợp hồi quy tuyến tính hóa cục bộ; Con lắc ngược quay.

1. Giới thiệu

Kỹ thuật điều khiển swing-up được đưa ra vào năm 1976 bởi nhà nghiên cứu Mori và cộng sự [1] nhằm thiết kế sơ đồ điều khiển swing-up cho hệ thống không ổn định. Mục đích của BDK swing-up cho hệ thống con lắc ngược quay (viết tắt là RIP) là đưa con lắc từ vị trí ổn định bền vững hướng xuống lên vị trí ổn định không bền vững hướng lên. Hiện nay đã có nhiều giải thuật điều khiển swing-up được nghiên cứu và đề xuất cho các hệ thống under-actuated. Tác giả Pierallini và các cộng sự đã trình bày một nghiên cứu về việc ứng dụng giải thuật điều khiển học vòng lặp để thiết kế BDK swing-up cho hệ thống [2]. Tiếp theo đó, tác giả Homburger đã thiết kế BDK swing-up cho hệ RIP thông qua thuật toán điều khiển dự đoán mô

Abstract - A swing-up control algorithm for a rotating inverted pendulum system (abbreviated as RIP) is a prominent subject of extensive research in automatic control theory. The primary objective of the swing-up controller is to transition the pendulum from its initial position to the desired equilibrium. In this study, the authors build upon prior research on the energy swing-up controller (EBM) and subsequently devise a new controller, CPFL-EBM, by integrating a Partial Feedback Linearization (PFL) method. This new controller is developed to address limitations observed in the EBM. The authors have conducted mathematical modeling of the RIP system and analyzed and implemented both swing-up controllers on the RIP system using the MATLAB/Simulink tool. Simulation and experimental results demonstrate that CPFL-EBM outperforms EBM in various aspects, effectively overcoming weaknesses inherent in the latter.

Key words - Swing-up controller; Partial Feedback Linearization; Energy Based Method; Combined Partial Feedback Linearization - Energy Based Method; Rotary inverted pendulum.

hình [3]. Sau đó, nhiều tác giả cũng đã đề xuất và thực hiện các ý tưởng điều khiển swing-up như là thiết kế BDK swing-up bằng cách kết hợp giải thuật Q-Learning và giải thuật PID [4], ứng dụng Lyapunov để tối ưu BDK mở cho hệ con lắc ngược (viết tắt IP) [5], thiết kế BDK swing-up cho hệ thống con lắc ngược trên xe bằng cách sử dụng phương pháp Monte Carlo [6], swing-up bằng cách chuyển tiếp năng lượng kết hợp mạng thần kinh nhân tạo cho hệ RIP [7], sử dụng phương pháp tối ưu năng lượng để thiết kế BDK swing-up cho hệ IP [8], swing-up cho hệ thống Pendubot bằng giải thuật điều khiển fuzzy PI+PFD [9].

Điều khiển swing-up cho hệ under-actuated bằng EBM được giới thiệu bởi tác giả Furuta vào năm 1996 [10]. Trong công trình nghiên cứu đó, nhóm tác giả đã sử dụng

¹ Ho Chi Minh City University of Technology, VNU-HCM, Hochiminh, Vietnam (Minh-Duc Tran, Minh-Tai Vo)

² Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Hochiminh, Vietnam (Khanh-Duy Nguyen, Pham-Trong-Ha Phu, Van-Dong-Hai Nguyen)

³ Tien Giang University, Tiengiang, Vietnam (Thanh Phong TRAN)

⁴ University of Angers, France (Thanh Phong TRAN)

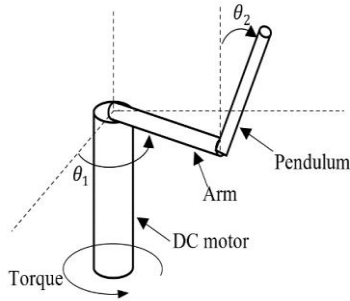
⁵ RMIT University Vietnam, Hochiminh, Vietnam (Minh-Tai Vo)

hệ RIP để làm đối tượng nghiên cứu cho giải thuật swing-up dựa vào phương pháp EBM. BDK này được thiết kế từ việc tính toán thế năng của con lắc tại vị trí cân bằng hướng lên và luật điều khiển được thành lập thông qua hàm Lyapunov [11]. Và cũng trong nghiên cứu này, nhóm tác giả cũng đã thực hiện so sánh hai BDK gồm EBM và phương pháp hồi quy tuyến tính hóa cục bộ (PFL) [11] [12]. Trong quá trình nghiên cứu, nhóm tác giả nhận thấy rằng BDK EBM đặt trọng tâm vào điều khiển vị trí thanh con lắc mà không quan tâm đến vị trí thanh cánh tay của hệ RIP. Điều này sinh ra hai vấn đề mà nhóm tác giả quan tâm, bao gồm: Một là nếu không kết hợp BDK cân bằng thì vị trí góc cánh tay sẽ đi về vô cùng, gây hư hại mô hình; Hai là khi kết hợp BDK cân bằng, góc cánh tay sẽ dao động với biên độ lớn theo sự hắt lên qua lại liên tục theo hoạt động của con lắc, làm cho việc swing-up từ vị trí thẳng đứng hướng xuống lên vị trí cân bằng mất nhiều thời gian và tổn hao năng lượng. Chính vì vậy, nhóm tác giả đề xuất phương pháp CPFL-EBM. Hai giải thuật swing-up kết hợp với BDK cân bằng LQR cho đối tượng RIP được thực hiện cả mô phỏng và mô hình thực nghiệm.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Hệ thống RIP

Hệ thống RIP được trình bày ở Hình 1.



Hình 1. Mô hình RIP

Bảng 1. Thông số hệ thống

Thông số	Ý nghĩa	Giá trị
m_2	Khối lượng con lắc (kg)	0.5
l_2	Chiều dài con lắc (m)	0.2
I_2	Mo-men quán tính con lắc (kgm)	1e-4
l_1	Chiều dài cánh tay quay (m)	0.3
I_1	Mo-men quán tính cánh tay (kgm)	1e-4
g	Giá tốc trọng trường (m/s ²)	9.81
b_1	Ma sát cánh tay quay (N m s/rad)	0.1
b_2	Ma sát con lắc (N m s/rad)	1e-3
τ_1	Mo-men đầu vào hệ thống (Nm)	NA

Phương trình Euler-Lagrange với hai biến θ_1, θ_2 được trình bày như sau [13]:

$$\begin{aligned} & (m_2 l_2^2 \sin(\theta_2)^2 + m_2 l_1^2 + m_1 l_1^2 + I_1) \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \ddot{\theta}_2 \\ & + m_2 l_2^2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 = \tau_1 - b_1 \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$-m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_2^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \quad (2)$$

$$-m_2 l_2^2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 - m_2 g l_2 \sin(\theta_2) = -b_2 \dot{\theta}_2$$

Từ phương trình vi phân (1) và (2), nhóm tác giả trình bày lại theo dạng hệ phương trình trạng thái hệ thống.

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = f_{11} + g_{11} \tau_1 & (a) \\ \dot{\theta}_2 = f_{22} + g_{22} \tau_1 & (b) \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó, các phần thành của hệ phương trình trạng thái được thể hiện trong phần Phụ lục từ A1 đến A4 của bài báo.

Phương trình năng lượng của hệ thống được tính toán như sau:

$$E_2 = \frac{1}{2} (m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2^2 + m_2 g l_2 \cos(\theta_2) \quad (4)$$

Thông qua một số bước tính toán, ta thu được phương trình đạo hàm của E_2 có dạng như phương trình (5). Phần tính để ra được phương trình (5) được trình bày trong phần Phụ lục A5.

$$\begin{aligned} \dot{E}_2 &= m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \ddot{\theta}_1 \\ &+ m_2 l_2^2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1^2 - b_2 \dot{\theta}_2^2 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2. Thiết kế BDK EBM

BDK swing-up EBM theo hàm Lyapunov, kết quả thu được như sau:

$$V = \frac{1}{2} (E_2 - E_0)^2 \quad (6)$$

$$\text{Trong đó, } E_0 = E_2 \Big|_{\substack{\theta_2=0 \\ \dot{\theta}_2=0}} = m_2 g l_2$$

Sau đó, đạo hàm phương trình (6), thu được kết quả là:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= (E_2 - E_0) \dot{E}_2 m_2 l_1 l_2 \\ &= (E_2 - E_0) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \ddot{\theta}_1 - b_2 (E_2 - E_0) \dot{\theta}_2^2 \\ &+ m_2 l_2^2 (E_2 - E_0) \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Để $\dot{V} < 0$, nhóm tác giả lựa chọn hàm mục tiêu v_e là mo-men xoắn của động cơ được tạo ra từ tác động của động cơ DC servo lên cánh tay quay của hệ thống như sau:

$$v_e = \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2}{l_1} - k * \text{sign}(\cos(\theta_2) \dot{\theta}_2) (E_2 - E_0) \quad (8)$$

Từ hệ phương trình (3) và (8), nhóm tác giả tính toán ra mo-men xoắn của hệ thống có kết quả như sau:

$$\begin{aligned} \tau_{1_energy} &= \frac{-f_{11} + v_e}{g_{11}} \\ &= \frac{-f_{11} + \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2}{l_1} - k * \text{sign}(\cos(\theta_2) \dot{\theta}_2) (E_2 - E_0)}{g_{11}} \end{aligned} \quad (9)$$

Trong đó hệ số k được lựa chọn $k > b_2 \dot{\theta}_2^2$

Theo phương trình (10) thì τ_{1_energy} sẽ luôn làm cho hàm Lyapunov âm

$$\dot{V} = -m_2 l_1 l_2 (E_2 - E_0)^2 k \left| \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \right| - b_2 (E_2 - E_0) \dot{\theta}_2^2 \quad (10)$$

$$\Rightarrow \dot{V} < 0$$

2.3. Thiết kế BDK CPFL-EBM

Hàm trạng thái của BDK swing-up dựa theo phương pháp PFL được lựa chọn như sau:

$$h = (E_2 - E_0) + \frac{1}{2} \theta_1^2 \quad (11)$$

Đạo hàm phương trình (11), kết quả thu được là:

$$\dot{h} = \dot{E}_2 + \theta_1 \dot{\theta}_1 = m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1^2 - b_2 \dot{\theta}_2^2 + \theta_1 \dot{\theta}_1 \quad (12)$$

Để các phương trình (11) và (12) đạt được trạng thái ổn định và các tín hiệu điều khiển có thể về tiến về 0. Nhóm tác giả lựa chọn hàm mục tiêu như sau:

$$v = \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 + b_2 \dot{\theta}_2^2 - \theta_1 \dot{\theta}_1 - k_1 h}{m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2} \quad (13)$$

Từ đó, nhóm tác giả tính toán và thu được phương trình mô tả mô-men theo phương pháp PFL như sau:

$$\begin{aligned} \tau_{1_linearization} &= \frac{-f_{11} + v}{g_{11}} \\ &= \frac{-f_{11} + \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 + b_2 \dot{\theta}_2^2 - \theta_1 \dot{\theta}_1 - k_1 h}{m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2}}{g_{11}} \end{aligned} \quad (14)$$

Trong đó, $\alpha = m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2$

Sau khi đã thành lập phương trình mô-men xoắn, một vấn đề được đặt ra là khi trạng thái hoạt động của hệ thống được hình thành từ phương trình (12) càng gần 0 thì mô-men xoắn từ phương trình (14) được tạo ra càng lớn. Để giải quyết vấn đề này, nhóm tác giả đã sử dụng phương trình (15) để chuyển đổi.

$$\alpha = m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 < k_{bound} \quad (15)$$

Với k_{bound} là hằng số được tính toán và suy ra từ mô-men xoắn cực đại của động cơ tạo ra, để điều khiển hệ thống. Chọn k_{bound} nằm trong khoảng giới hạn từ $(\varepsilon \rightarrow 1)$ với ε là một số nhỏ tùy ý.

Luật điều khiển cuối cùng như sau:

Nếu $m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 < k_{bound}$ thì,

$$\tau_{1_energy} = \frac{-f_{11} + \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2}{l_1} - k * \text{sign}(\cos(\theta_2) \dot{\theta}_2) (E_2 - E_0)}{g_{11}} \quad (16)$$

Nếu không thì,

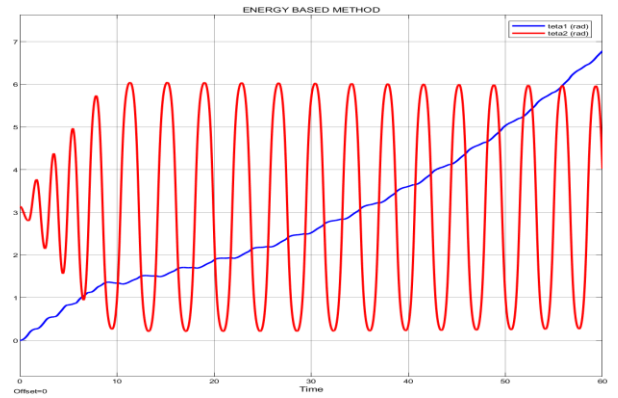
$$\tau_{1_linearization} = \frac{-f_{11} + \frac{-l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2}{l_1} + b_2 \dot{\theta}_2^2 - \theta_1 \dot{\theta}_1 - k_1 ((E_2 - E_0) + \frac{1}{2} \theta_1^2)}{g_{11}} \quad (17)$$

3. Kết quả và nhận xét

3.1. Kết quả mô phỏng

3.1.1. Điều khiển swing-up bằng EBM

Trong phần này, nhóm tác giả trình bày đáp ứng ngõ ra của hệ thống khi áp dụng EBM. Theo Hình 2, đáp ứng tín hiệu ngõ ra gồm đáp ứng góc cánh tay quay rad, đáp ứng con góc con lắc rad. EBM được triển khai lên hệ thống với tham số $k = 25$. Trong khoảng thời gian từ khi bắt đầu điều khiển, góc của con lắc di chuyển từ vị trí cân bằng ổn định hướng xuống đến điểm cân bằng hướng lên mong muốn và dao động với biên độ tối đa sau khoảng 10s đầu tiên. Cùng với đó, nhóm tác giả nhận thấy rằng đáp ứng của góc cánh tay trong trường hợp này là hoàn toàn không ổn định. Sau 15s từ khi bắt đầu chương trình, cánh tay có xu hướng di chuyển đến vô cùng khi không có BDK cân bằng tác động. Đây được xem là nhược điểm khi sử dụng EBM.

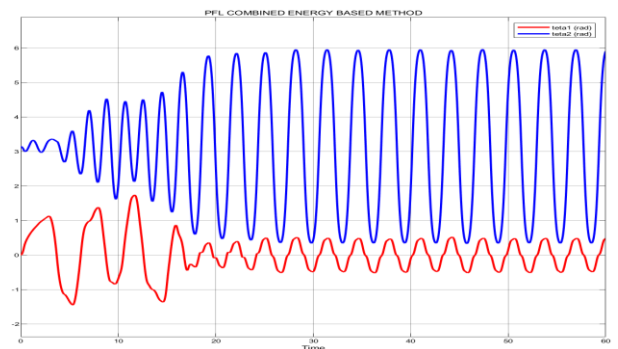


Hình 2. Đáp ứng hệ thống khi sử dụng EBM*

*Lưu ý Hình 2: Góc cánh tay θ_1 được scale tỉ lệ 1:10 góc thực tế.

3.1.2. Điều khiển swing-up bằng CPFL-EBM

Để thực hiện quá trình mô phỏng hệ RIP với BDK swing-up CPFL-EBM, nhóm tác giả khai báo các thông số điều khiển như sau: $k = 25; k_1 = 55; k_{bound} = 0,2$



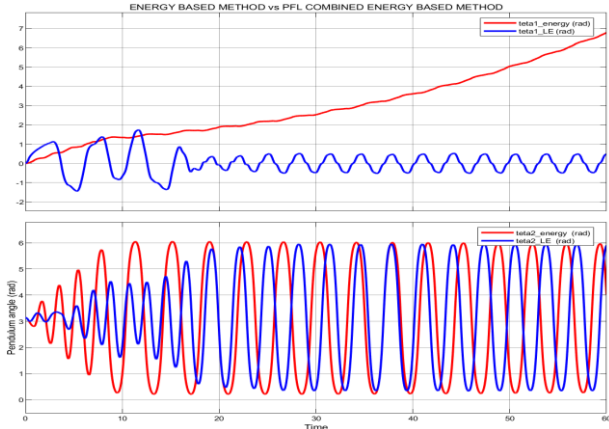
Hình 3. Đáp ứng hệ thống khi sử dụng CPFL-EBM**

**Lưu ý Hình 3: Góc cánh tay θ_1 được scale tỉ lệ 1:10 góc thực tế.

Từ Hình 3, tác giả nhận thấy rằng phương pháp đề xuất CPFL-EBM đã khắc phục được nhược điểm của EBM. Bằng chứng là CPFL-EBM giúp kiểm soát vị trí góc quay của cánh tay với biên độ lớn nhất $[-1,4; 1,8]$ rad. Sau 15s, cánh tay dao động với biên độ nhỏ $[-0,5; 0,5]$ rad. CPFL-EBM giúp cho cánh tay không có xu hướng về vô cùng.

Cùng với đó, góc lệch con lắc khi di chuyển từ điểm hướng xuống đến điểm cân bằng hướng lên và dao động với biên độ tối đa sau khoảng thời gian 25s. Qua đó, CPFL-EBM có thể kiểm soát tốt vị trí góc cánh tay và con lắc đúng như mục đích của tác giả đề xuất.

3.1.3. So sánh hai phương pháp swing-up



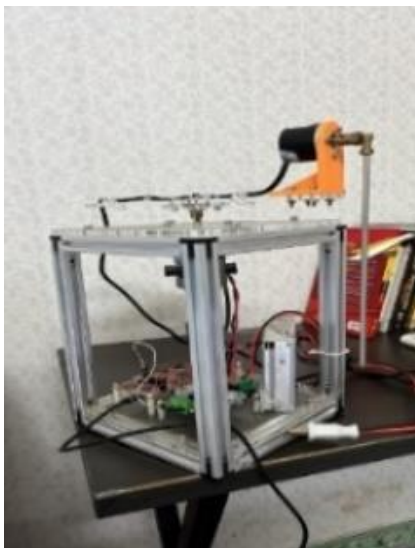
Hình 4. So sánh ngõ ra theo hai phương pháp swing-up***

***Lưu ý Hình 4: Góc cánh tay θ_1 được scale tỉ lệ 1:10 góc thực tế.

Thông qua Hình 4, góc của cánh tay đơn khi sử dụng EBM có xu hướng di chuyển ra vô cùng. Trong khi đó, CPFL-EBM đã giải quyết được vấn đề này, góc cánh tay dao động với biên độ nhỏ. Tuy nhiên, góc con lắc khi sử dụng CPFL-EBM mất 30s để giúp con lắc lên vị trí cân bằng hướng lên. Trong khi đó, chỉ cần mất 10s thì con lắc có thể di chuyển lên vị trí cân bằng hướng lên bằng EBM.

3.2. Kết quả thực nghiệm

3.2.1. Hệ thống thực nghiệm



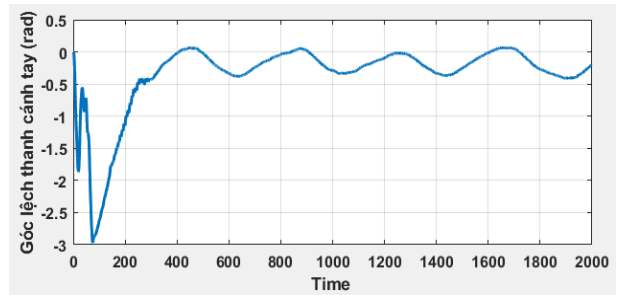
Hình 5. Phần cứng hệ RIP

Các thành phần trong Hình 5:

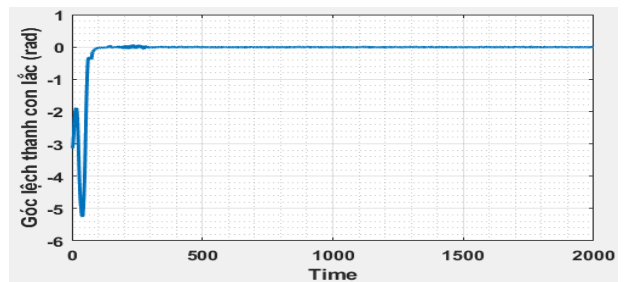
1. Thanh cánh tay quay của hệ thống.
2. Servo Nisca NF5475 motor với encoder 600ppr.
3. Nguồn cung cấp cho hệ thống.
4. Vi xử lí LAUNCHXL-F28379D.

5. Kit CP2102 USB 2.0 to TTL UART.
6. Encoder 600ppr dùng để đọc tín hiệu từ con lắc.
7. Thanh con lắc.
8. Điện trở kéo lên.
9. H-BRIDGE-IR2184.

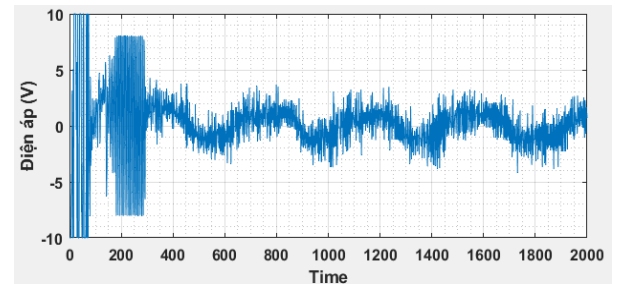
3.2.2. Phương pháp EBM



Hình 6. Đáp ứng thực tế thanh cánh tay khi sử dụng EBM và ổn định bằng LQR



Hình 7. Đáp ứng thực tế thanh con lắc khi sử dụng EBM và ổn định bằng LQR



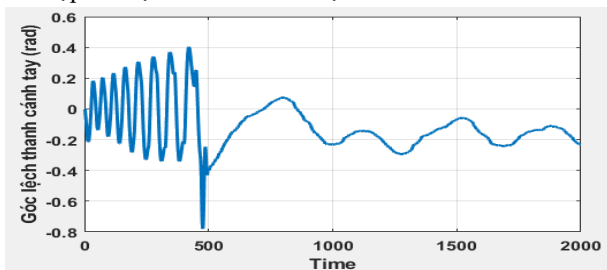
Hình 8. Điện áp cấp khi sử dụng EBM và ổn định bằng LQR

Kết quả được trình bày từ Hình 6 đến Hình 8. Nhóm tác giả thực hiện điều khiển swing-up EBM với BDK cân bằng LQR để kiểm chứng cũng như tránh gây ra thiệt hại về phần cứng. Trong 300ms đầu tiên, góc cánh tay di chuyển một góc rất lớn so với vị trí ban đầu. Khoảng thời gian này BDK swing-up tác động giúp cho con lắc thẳng đứng lên vị trí cân bằng mong muốn. Sau khi đã đưa con lắc thẳng đứng lên vị trí mong muốn, BDK cân bằng LQR sẽ có trách nhiệm giúp cho con lắc duy trì trạng thái ổn định quanh điểm làm việc. Tuy nhiên, cánh tay vẫn dao động với một biên độ nằm trong $[-0,4; 0,1]$ rad. Đây là hạn chế của BDK swing-up EBM và có thể gây ra các thiệt hại. Đối với tín hiệu điện áp, trong khi hệ thống swing-up thì động cơ sẽ cung cấp điện áp với giá trị tối đa khoảng 8 V để giúp cho con lắc có thể tự động di chuyển lên vị trí cân bằng hướng lên thông qua cánh tay. Sau 300ms động cơ sẽ duy trì điện áp khoảng nhất định $[-4; 4]$ V để giúp giữ cân bằng con lắc

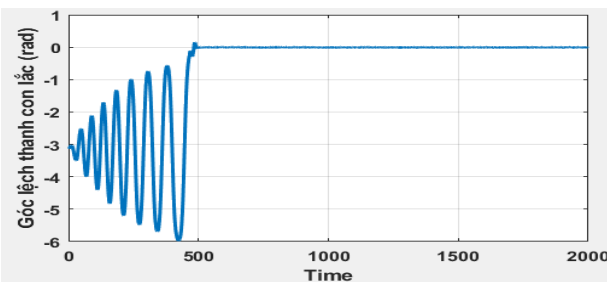
tại vị trí mong muốn. Video minh chứng điều khiển swing-up bằng EBM và cân bằng áp dụng LQR xem tại địa chỉ: <https://youtu.be/Jr5LAvxqzdY>. Một lưu ý về video minh chứng là nhóm tác giả thực hiện thu hình trong một lần thí nghiệm khác với lần thí nghiệm thu thập dữ liệu để vẽ các đồ thị từ Hình 6 đến Hình 8.

3.2.3. Phương pháp CPFL-EBM

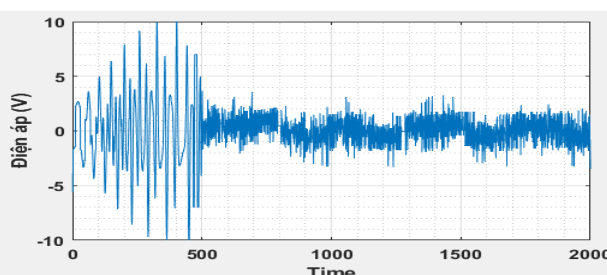
Kết quả được trình bày ở từ Hình 9 đến Hình 11. Có thể thấy rằng, CPFL-EBM đã khắc phục nhược điểm của EBM. CPFL-EBM đã giúp kiểm soát vị trí góc cánh tay với vùng làm việc nằm trong $[-0,3; 0,4]$ rad. Sau khi BDK swing-up đã đưa con lắc thẳng đứng hướng lên, tiếp đến BDK cân bằng LQR sẽ tiếp tục tác động vào hệ thống giúp cho con lắc duy trì trạng thái ổn định quanh điểm làm việc. Khi này, cánh tay dao động với biên độ $[-0,3; 0,1]$ rad. Đối với tín hiệu điện áp, động cơ sẽ cung cấp điện áp với giá trị tối đa 10 V để giúp cho con lắc có thể tự động di chuyển lên vị trí cân bằng hướng lên thông qua cánh tay. Tiếp sau khoảng thời gian 500ms động cơ sẽ duy trì điện áp với biên độ $[-3,8; 3,8]$ V để giữ cân bằng con lắc. Video minh chứng điều khiển swing-up bằng CPFL-EBM và cân bằng bằng LQR xem tại địa chỉ sau: <https://youtu.be/QIO7kONcJJE>. Một lưu ý về video minh chứng là nhóm tác giả thực hiện thu hình trong một lần thí nghiệm khác với lần thí nghiệm thu thập dữ liệu để vẽ các đồ thị từ Hình 9 đến Hình 11.



Hình 9. Đáp ứng thực tế thanh cánh tay khi sử dụng CPFL-EBM và ổn định bằng LQR



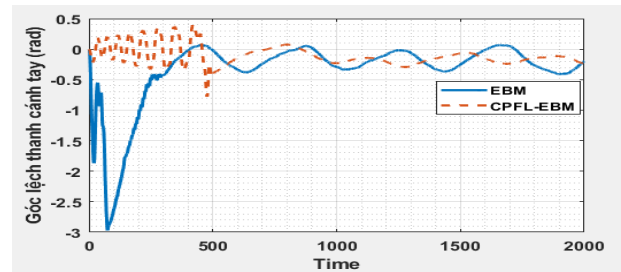
Hình 10. Đáp ứng thực tế thanh con lắc khi sử dụng CPFL-EBM và ổn định bằng LQR



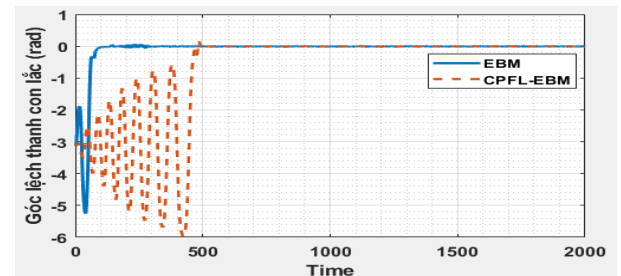
Hình 11. Điện áp cung cấp khi sử dụng CPFL-EBM và ổn định bằng LQR

3.2.4. So sánh hai phương pháp swing-up

Trong phần này, nhóm tác giả thực hiện so sánh đáp ứng ngõ ra hệ thống RIP với giải thuật swing-up EBM và CPFL-EBM và điều khiển cân bằng ứng dụng phương pháp LQR. Kết quả so sánh được trình bày trong Hình 12 và 13.



Hình 12. So sánh đáp ứng thanh cánh tay trên thực nghiệm khi sử dụng hai phương pháp swing-up



Hình 13. So sánh đáp ứng thanh con lắc trên thực nghiệm khi sử dụng hai phương pháp swing-up

Khi sử dụng EBM, cánh tay có xu hướng dao động mạnh và đi ra vô cùng nếu không có BDK LQR giúp ổn định trở lại. Còn khi sử dụng CPFL-EBM, BDK giúp kiểm soát tương đối tốt vị trí góc quay của cánh tay không còn hiện tượng dao động mạnh lúc ban đầu mà thay vào đó cánh tay quay sẽ dao động trong vùng làm việc với biên độ tương đối nhỏ $[-0,3; 0,4]$ rad. Khi sử dụng BDK swing-up dựa vào năng lượng sẽ giúp con lắc mau di chuyển lên vị trí cân bằng nhanh chóng hơn so với khi sử dụng CPFL-EBM cụ thể là sau khoảng 300ms so với 500ms. Sau khi ổn định được con lắc quanh vị trí cân bằng mong muốn, cánh tay hoạt động khoảng biên độ nhỏ hơn để duy trì sự ổn định con lắc. Cụ thể là khi sử dụng EBM góc cánh tay sẽ hoạt động $[-0,4; 0,1]$ rad. Còn đối với CPFL-EBM, góc cánh tay sẽ hoạt động $[-0,3; -0,1]$ rad.

4. Kết luận

Nhóm tác giả đã đề xuất hai giải thuật swing-up gồm có BDK swing-up EBM và CPFL-EBM. Cả hai giải thuật đều được triển khai cho đối tượng điều khiển trên cả mô phỏng và thực nghiệm. Kết quả cho thấy rằng, khi sử dụng EBM thì cánh tay quay có xu hướng dao động mạnh và tiến ra vô cùng. Nhờ vào CPFL-EBM thì vấn đề này đã được giải quyết, cánh tay không còn dao động mạnh mà thay vào đó dao động ổn định trong khoảng biên độ nhỏ nhất định. Đối với đáp ứng con lắc có thể thấy rằng, EBM giúp cho đáp ứng con lắc nhanh hơn so với khi áp dụng CPFL-EBM. Qua đó có thể thấy rằng, nhóm tác giả đã đề xuất và kiểm nghiệm thành công phương pháp swing-up cải tiến từ EBM trên hệ RIP trong cả mô phỏng và thực nghiệm. Trong tương lai nhóm dự định phát triển BDK

swing-up CPFL-EBM cho hệ thống con lắc ngược quay song song [14], [15].

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin cảm ơn các bạn Lương Trung Nam, Nguyễn Hằng Ri, Nguyễn Trần Nhất Phi (sinh viên Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM) đã hỗ trợ thực hiện sửa chữa phần cứng để nghiên cứu này được hoàn thiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Mori, H. Nishihara, and K. Furuta, "Control of unstable mechanical system: Control of pendulum", *International Journal of Control*, Vol. 23, No. 5, pp. 673-692, 1976.
- [2] M. Pierallini, F. Angelini, A. Bicchi, and M. Garabini, "Swing-Up of Underactuated Compliant Arms Via Iterative Learning Control", *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 3186-3193, 2022.
- [3] H. Homburger, S. Wirtensohn, and J. Reuter, "Swinging Up and Stabilization Control of the Furuta Pendulum using Model Predictive Path Integral Control", in *2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Vouliagmeni, Greece, 2022.
- [4] A. Zeynivand and H. Moodi, "Swing-up Control of a Double Inverted Pendulum by Combination of Q-Learning and PID Algorithms", in *2022 8th International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCIA)*, Tehran, Iran, 2022.
- [5] A. Jain, A. Sharma, V. Jatly, B. Azzopardi, and S. Choudhury, "Real-Time Swing-Up Control of Non-Linear Inverted Pendulum Using Lyapunov Based Optimized Fuzzy Logic Control", *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 50715-50726, 2021.
- [6] S. Nakatani and H. Date, "Swing up Control of Inverted Pendulum on a Cart with Collision by Monte Carlo Model Predictive Control", in *2019 58th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Hiroshima, Japan, 2019.
- [7] Z. Ping, D. Xu, H. Tang, S. Ge, J. -G. Lu, and H. Wang, "Switched Energy and Neural Network-Based Approach for Swing-Up and Tracking Control of Double Inverted Pendulum", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 53, No. 9, pp. 5536-5544, 2023.
- [8] M. Gulan, P. Minarčík, and J. Kulhánek, "Energy-efficient Swing-up and MPC Stabilization of an Inverted Pendulum", in *2019 22nd International Conference on Process Control (PC19)*, Strbske Pleso, Slovakia, 2019.
- [9] S. Edgar and F. Victor, "Real-time Underactuated Robot Swing-up via Fuzzy PI+PD Control", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, Vol. 17, no. 1, pp. 1-13, 2006.
- [10] M. Iwashiro, K. Furuta, and K. J. Astrom, "Energy based control of pendulum", in *Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications IEEE International Conference on Control Applications held together with IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Dearborn, MI, USA, 1996.
- [11] G. B. Hong, T. T. H. Le, M. T. Nguyen, D. D. Vu, and V. D. H. Nguyen, "Comparison between two swing-up algorithms: partial feedback linear and energy based method", *Journal of Technical Education Science*, No. 55, pp. 1-6, 2019.
- [12] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Taipei Publications Trading Company, 1989.
- [13] X. -Q. Nguyen *et al.*, "An Application of Sliding Mode Control Scheme combined Energy-Based Method for Swinging Up Rotary Inverted Pendulum System", in *2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, Ho Chi Minh, Vietnam, 2023.
- [14] Z. Yu, L. Liu, J. Yu, X. Zhang, Y. Guo, and S. Wang, "EFC/H ∞ Based Dual-mode Switching Global Control of the First-order Parallel Rotating Double Inverted Pendulum System", in *IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022.
- [15] M.-T. Vo, M.-D. Vo, V.-D. Nguyen, M.-D. Tran, V.-D.-H. Nguyen, H.-N. Duong and T.-T. Tran, "Development and Control of Underactuated Parallel Rotary Double Inverted Pendulum System", in *The 12th International Conference on Robotics, Vision, Signal Processing and Power Applications (RoViSP)*, Penang, Malaysia, 2023 (Accepted).

PHỤ LỤC A

$$f_{11} = \frac{-\left(\frac{\sin(2\theta_2)l_2^4 m_2 \dot{\theta}_2}{2} - l_1(\sin(\theta_2) - \sin(\theta_2)^3)l_2^3 m_2 \dot{\theta}_2 - l_1 \sin(\theta_2)l_2^3 m_2 \dot{\theta}_2 - \frac{1}{2}g \sin(2\theta_2)l_2^2 m_2^2 + \frac{1}{2}I_2 \sin(2\theta_2)l_2^2 m_2 \dot{\theta}_2 + b_1 l_2^2 m_2 \dot{\theta}_1 + I_2 l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + b_2 l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2) \dot{\theta}_2 + I_2 b_1 \dot{\theta}_1}{I_1 I_2 + l_2^4 m_2^2 - l_2^4 m_2^2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_2^2 + I_2 l_1^2 m_1 + I_1 l_1^2 m_1 + I_2 l_1^2 m_2 + I_1 l_2^2 m_2 - I_2 l_2^2 m_2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_1 m_2 - l_1^2 l_2^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2}} \quad A1$$

$$g_{11} = \frac{m_2 l_2^2 + I_2}{I_1 I_2 + l_2^4 m_2^2 - l_2^4 m_2^2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_2^2 + I_2 l_1^2 m_1 + I_1 l_1^2 m_1 + I_2 l_1^2 m_2 + I_1 l_2^2 m_2 - I_2 l_2^2 m_2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_1 m_2 - l_1^2 l_2^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2} \quad A2$$

$$f_{22} = \frac{(b_2 \dot{\theta}_2 - gl_2 m_2 \sin(\theta_2) - l_2^2 m_2 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) + \frac{l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2)(m_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) l_2^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 + b_1 \dot{\theta}_1)}{I_1 + l_1^2 m_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_2^2 \sin(\theta_2)^2})}{I_2 + l_1^2 m_2 - \frac{l_1^2 l_2^2 m_2 \cos(\theta_2)^2}{I_1 + l_1^2 m_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_2^2 \sin(\theta_2)^2}} \quad A3$$

$$g_{22} = \frac{l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2)}{I_1 I_2 + l_2^4 m_2^2 - l_2^4 m_2^2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_2^2 + I_2 l_1^2 m_1 + I_1 l_1^2 m_1 + I_2 l_1^2 m_2 + I_1 l_2^2 m_2 - I_2 l_2^2 m_2 \cos(\theta_2)^2 + l_1^2 l_2^2 m_1 m_2 - l_1^2 l_2^2 m_2^2 \cos(\theta_2)^2} \quad A4$$

Chứng minh cho phương trình (5):

Ta có như sau: $E_2 = \frac{1}{2}(m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2^2 + m_2 g l_2 \cos(\theta_2)$. Đạo hàm E_2 , ta có: $\dot{E}_2 = (m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 g l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2$.

Từ phương trình (2), ta rút được $\ddot{\theta}_2$ có dạng $\ddot{\theta}_2 = \frac{1}{m_2 l_2^2 + I_2} (m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \sin \theta_2 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 g l_2 \sin \theta_2 - b_2 \dot{\theta}_2)$. A5

Sau đó, ta thực hiện thế $\ddot{\theta}_2$ vào phương trình $\dot{E}_2 = (m_2 l_2^2 + I_2) \dot{\theta}_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 g l_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2$ và rút gọn thì thu được phương trình \dot{E}_2 có dạng như (5).