

ĐIỀU KHIỂN TUYẾN TÍNH HÓA MÔ HÌNH CON LẮC NGƯỢC

Nguyễn Tử Đức¹, Đặng Thành Đạt², Nguyễn Văn Đông Hải^{1*}, Võ Quốc Anh²,
Võ Long Nhân², Nguyễn Ngọc Bảo², Nguyễn Thành Minh² và Nguyễn Lê Tiến Dũng²

¹Khoa Điện - Điện Tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Sinh viên, Khoa Đào tạo Chất lượng cao,

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Đông Hải, Email: hainvd@hcmute.edu.vn

Lịch sử bài báo

Ngày nhận: 23/8/2021; Ngày nhận chỉnh sửa: 08/02/2022; Ngày duyệt đăng: 07/3/2022

Tóm tắt

Điều khiển phi tuyến cho hệ SIMO như con lắc ngược là một bài toán khó trong điều khiển ổn định hệ thống. Trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành xây dựng phần cứng mô hình của một hệ thống con lắc ngược trên xe và áp dụng giải thuật hồi tiếp tuyến tính hóa để điều khiển hệ thống trên. Qua đó, nhóm tiến hành xây dựng chương trình nhúng Matlab giải thuật trên vào board TMS320F28335 để chứng minh tính ổn định thông qua thực nghiệm. Trong đó, con lắc ngược được giữ không ngã và xe dao động vị trí qua lại quanh vị trí cân bằng chứ không bị dịch xa quá 10 cm khỏi vị trí chuẩn. Đồng thời, một khảo sát về ảnh hưởng của các thông số điều khiển khi được thay đổi cũng được thực hiện để tìm hiểu quy luật điều chỉnh bộ điều khiển cũng được nhóm tác giả trình bày.

Từ khóa: Con lắc ngược, điều khiển cân bằng, TMS320F28335, tuyến tính hóa hồi tiếp.

FEEDBACK LINEARIZATION CONTROL FOR INVERTED PENDULUM

Nguyen Tu Duc¹, Dang Thanh Dat², Nguyen Van Dong Hai^{1*}, Vo Quoc Anh²,
Vo Long Nhan², Nguyen Ngoc Bao², Nguyen Thanh Minh², and Nguyen Le Tien Dung²

¹Faculty of Electrical Electronics Engineering,

Ho Chi Minh city University of Technology and Education, Vietnam

²Student, Faculty for High Quality Training,

Ho Chi Minh city University of Technology and Education, Vietnam

*Corresponding author: Nguyen Van Dong Hai, Email: hainvd@hcmute.edu.vn

Article history

Received: 23/8/2021; Received in revised form: 08/02/2022; Accepted: 07/3/2022

Abstract

Nonlinear control for SIMO (single input-multi output) system, such as inverted pendulum, is a difficult problem in system stabilizing. In this paper, we build a hardware platform of an inverted pendulum on cart and apply feedback linearization algorithm to control that system. Thence, we create an embedded Matlab program of that algorithm on TMS320F28335 to operate system and prove the stability under experiment. From that, inverted pendulum is kept not to fall and cart fluctuates around the equilibrium point within 10 cm from standard position. Also, a survey about effects of each control parameters is operated to examine the rules of calibration.

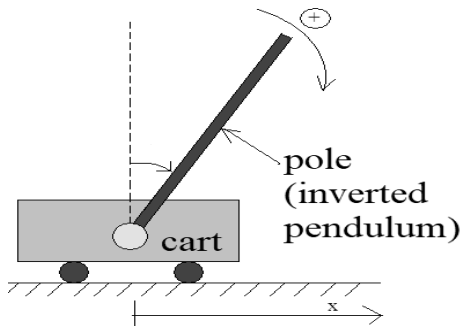
Keywords: Inverted pendulum, balancing control, TMS320F28335, feedback linearization.

DOI: <https://doi.org/10.52714/dthu.12.2.2023.1032>

Trích dẫn: Nguyễn, T. Đức, Đặng, T. Đạt, Nguyễn, V. Đông H., Võ, Q. A., Võ, L. N., Nguyễn, N. B., Nguyễn, T. M., & Nguyễn, L. T. D. (2023). Điều khiển tuyến tính hóa mô hình con lắc ngược. *Tạp chí Khoa học Đại học Đồng Tháp*, 12(2), 50-58. <https://doi.org/10.52714/dthu.12.2.2023.1032>.

1. Mở đầu

Hệ con lắc ngược là một hệ cổ điển trong điều khiển tự động (Aracil & Gordillo, 2004). Nhiều dạng khác nhau của mô hình này được nghiên cứu quan tâm tới như pendubot, con lắc ngược quay,... Hệ con lắc ngược trên xe (hay còn gọi là hệ “Cart and Pole” - C&P) cũng là một dạng hệ tương tự các hệ trên với cấu trúc là một con lắc được gắn trên xe (Hình 1).



Hình 1. Mô hình toán C&P

Sự di chuyển của xe giúp con lắc được giữ thẳng đứng hướng lên. Bên cạnh đó, một giải thuật điều khiển phù hợp không chỉ giữ được con lắc thẳng đứng hướng lên mà còn giữ cho xe ở vị trí xác định. Nhiều giải thuật đã được đề nghị để thực hiện tốt quá trình này như PID và LQR (Shehu & cs., 2015). Đối với giải thuật PID, việc hệ thống có ổn định hay không phụ thuộc vào quá trình tinh chỉnh thông số K_p , K_i , K_d chứ không dựa trên nguyên tắc toán học nào. Bộ điều khiển (BĐK) LQR có thể ổn định hệ thống tại điểm làm việc tĩnh (xe đứng yên tại chỗ và con lắc thẳng đứng hướng lên) nhưng việc giải phương trình Ricatti sẽ chỉ đảm bảo hệ thống hoạt động tốt lân cận điểm làm việc. Nếu hệ thống ở trạng thái xa điểm làm việc thì không về lại được điểm cân bằng nữa. Việc gần hay xa điểm làm việc thì phương pháp LQR không đề cập tới.

Để có thể kéo hệ thống về vị trí cân bằng và quá trình bám giá trị đặt được đảm bảo bởi toán học, giải thuật phi tuyến là một giải pháp. Việc ổn định hệ thống của giải thuật điều khiển phi tuyến được đảm bảo bằng tiêu chuẩn Lyapunov. Giải thuật trượt là một giải thuật phi tuyến thông dụng. Ban đầu, giải thuật này được thiết kế cho các hệ SISO (Nguyễn, 2012) và MIMO với số ngõ vào và ra bằng nhau (Nguyễn, 2010). Các nghiên cứu tiếp theo đã phát triển được cách đặt mặt trượt để giải thuật áp dụng được cho hệ SIMO (Aguilar-Ibáñez & cs., 2014). Tuy nhiên, hiện tượng chattering là

một vấn đề cần giải quyết của giải thuật này. Một cách để khắc phục hiện tượng trên là áp dụng mô hình mờ kết hợp với BĐK trượt (Nguyễn, 2010). Một hướng đi khác là chọn một phương pháp phi tuyến khác như backstepping, tuyến tính hóa hồi tiếp hay thụ động để tránh hiện tượng chattering.

Bên cạnh điều khiển trượt, một giải thuật phi tuyến được giới thiệu ở (Nguyen & cs., 2014) - giải thuật hồi tiếp tuyến tính hóa (HTTTH) - được trình bày đã ổn định được hệ thống và khắc phục được hiện tượng chattering thông qua mô phỏng. Đồng thời, giải thuật phi tuyến này cũng được chứng minh là có khoảng hoạt động rộng hơn LQR. Tuy nhiên, trong nghiên cứu đó, giải thuật chưa được thể hiện và khảo sát trên thực nghiệm mà chỉ được kiểm chứng trên mô phỏng. Trong bài báo này, nhóm tác giả hoàn thiện thêm những thiếu sót của nghiên cứu đó. Nhóm xây dựng một mô hình cơ khí-điện C&P để khảo sát thực tế. Thông qua kiểm chứng thực nghiệm giải thuật HTTTH, nhóm tác giả đã khẳng định áp dụng thực tế cho giải thuật trên ở một đối tượng SIMO điển hình là hệ C&P. Ngoài ra, một số kinh nghiệm tinh chỉnh cũng được nhóm tác giả trình bày trong bài báo này.

2. Phương trình động lực học

Theo nghiên cứu (Nguyen Van Dong Hai & cs., 2014), thông số và biến số hệ thống được thể hiện ở Bảng 1, thông số động cơ được thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 1. Thông số hệ thống

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
x_1	m	Vị trí xe
x_2	m/s	Vận tốc xe
x_3	rad	Góc lệch con lắc ngược
x_4	rad/s	Vận tốc góc quay
g	m/s^2	Gia tốc trọng trường
M	kg	Khối lượng xe
m	kg	Khối lượng con lắc
C_1	M	Chiều dài con lắc ngược
J_1	kgm/s^2	Momen quán tính con lắc ngược
d_1		Tỉ số truyền động giữa bánh xe và trục, R - bán kính bánh xe
τ	Nm	Momen do động cơ gây ra tác động lên xe

Bảng 2. Thông số hệ thống

Ký hiệu	Đơn vị	Mô tả
R_m	ohm	Điện trở động cơ
L_m	H	Hệ số điện kháng
K_b	V/(rad/s)	Hằng số phản điện
K_t	Nm/A	Hằng số momen
J_m	kgm ²	Momen quán tính của rôto
C_m	Nm/(rad/sec)	Hệ số ma sát nhớt
T_f	Nm	Momen ma sát
τ_1	Nm	Momen xoắn cản
ω	rad/s	Vận tốc motor
τ_m	Nm	Mô men xoắn nội
θ_m	rad	Góc xoay trục động cơ
e	V	Điện áp cấp cho động cơ
d_1		Tỉ số truyền động giữa bánh xe và trục, R - bán kính bánh xe

Cũng từ nghiên cứu (Nguyen & cs., 2014), hệ phương trình toán học của hệ C&P được thể hiện như sau:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (1)$$

Trong đó, ta có:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [x \quad \dot{x} \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T,$$

$$a(x) = [x_2 \quad a_2 \quad x_4 \quad a_4]^T, \quad b(x) = [0 \quad b_2 \quad 0 \quad b_4]^T,$$

$$f_2 = \frac{-\alpha_3 \sin x_3 \cos x_3 - k_2 x_2 + \alpha_4 x_4^2 \sin x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3},$$

$$f_4 = \left[\frac{\alpha_5}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \cos^2 x_3 + \alpha_6 \right] \sin x_3 + \frac{\alpha_7 x_2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{\alpha_5}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ 0 \\ \frac{-\alpha_8 \cos x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ 0 \\ g_4 \end{bmatrix}, \quad \alpha_1 = M + m + k_3,$$

$$\alpha_2 = \frac{m^2 C_1^2}{h_1}, \quad \alpha_3 = \frac{m^2 g C_1^2}{h_1}, \quad \alpha_4 = m C_1, \quad \alpha_5 = \frac{m^3 C_1^3 g}{h_1^2},$$

$$\alpha_6 = \frac{m C_1 g}{h_1}, \quad \alpha_7 = \frac{m C_1 k_2}{h_1}, \quad \alpha_8 = \frac{m C_1}{h_1},$$

$$M_f(q) = \begin{bmatrix} m + M + k_3 & m C_1 \cos \theta \\ m C_1 \cos \theta & J_1 + m C_1^2 \end{bmatrix};$$

$$V_{mf} = \begin{bmatrix} k_2 & -m C_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad G_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -m C_1 g \sin \theta \end{bmatrix};$$

$$k_1 = \frac{d_l K_t}{R_m R}; \quad k_2 = \frac{d_l^2 K_t K_b}{R^2 R_m} + \frac{d_l^2 C_m}{R^2}; \quad k_3 = \frac{d_l^2 J_m}{R^2}$$

Dù tác giả trên có đề cập mô hình toán học với ngõ vào là điện áp nhưng cũng chỉ dừng ở mô phỏng. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiếp tục phát triển phần cứng trên nền tảng hệ phương trình động lực học ở (1).

3. Giải thuật điều khiển hồi tiếp tuyến tính hoá

Trong sách “Hệ thống điều khiển đa biến” của tác giả Dương (2003), theo phương pháp HTTTH, một hệ phi tuyến SISO có thể được biến đổi về dạng xấp xỉ tuyến tính bằng cách áp dụng đạo hàm Lie. Bên trong công thức điều khiển tuyến tính đó, các thành phần phi tuyến được gom lại thành các hàm, đóng vai trò như các biến số trong công thức tuyến tính chung đó. Do đó, công thức chung là đơn giản nhưng thông tin phi tuyến của hệ thống không bị mất đi. Như vậy, giải thuật điều khiển vẫn ổn định được hệ thống trong toàn không gian hoạt động.

Đối với hệ C&P là một hệ SISO, theo nghiên cứu (Nguyen & cs., 2014), các tác giả trên chọn hàm $h(x)$ bao gồm các biên cần điều khiển về 0 như ở (2). Bằng cách đặt biến này, nhóm tác giả trên đã chuyển hệ SIMO trên về xấp xỉ hệ SISO để có thể áp dụng giải thuật HTTTH.

$$h(x) = \text{biensol} \times x_1 + \text{biensol2} \times \ln \left(\frac{1 + \sin x_3}{\cos x_3} \right) \quad (2)$$

Nhóm tác giả trên cũng đưa ra các nhận định về tinh chỉnh thông số hệ thống như sau:

- biensol1, biensol2 là các trọng số tương ứng với x_1 (vị trí xe) và x_3 (góc con lắc).

- Sau khi tuyến tính hoá, nhiệm vụ điều khiển của ta là làm sao cho $h(x)$ tiến về 0. Do đó, để thành phần nào (góc teta (x_3) hay vị trí xe (x_1)) được gần vị trí cân bằng nhanh nhất thì ta tăng thông số tuyến tính hoá ứng với thành phần đó. Mục tiêu của nhóm tác giả trong trường hợp điều khiển xe tại vị trí 0,

góc con lắc ở vị trí thẳng đứng hướng lên thì mục tiêu là điều khiển sao cho hàm $h(x)$ về 0. Lúc đó, x_1 và x_3 cũng bị điều khiển về vị trí 0 để hệ thống đạt trạng thái điều khiển mong muốn.

- Quá trình khảo sát mô phỏng, nhóm tác giả trên chọn ma trận Q và R là các ma trận đơn vị.

Tín hiệu điều khiển ở (Nguyen & cs., 2014) được đề nghị là:

$$u = (L_g L_f^{(p-1)} h(x))^{-1} [v - L_f^{(p-1)} h(x)] \quad (3)$$

Với p là bậc hệ thống (trong trường hợp hệ con lắc ngược trên xe là $p=4$), đạo hàm Lie $L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$, $v = -K_1 \xi_1 - K_2 \xi_2 - K_3 \xi_3 - K_4 \xi_4$, $\xi_1 = h(x)$, $\xi_2 = L_f h(x)$, $\xi_3 = L_f^2 h(x)$, $\xi_4 = L_f^3 h(x)$; K_1, K_2, \dots, K_4 là các thông số dương được chọn phù hợp được tính toán như sau:

$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R) \quad (4)$$

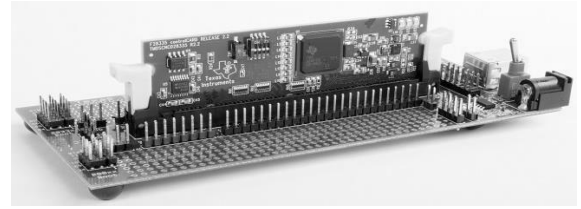
Với $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$; ma trận Q và R là

các ma trận dương

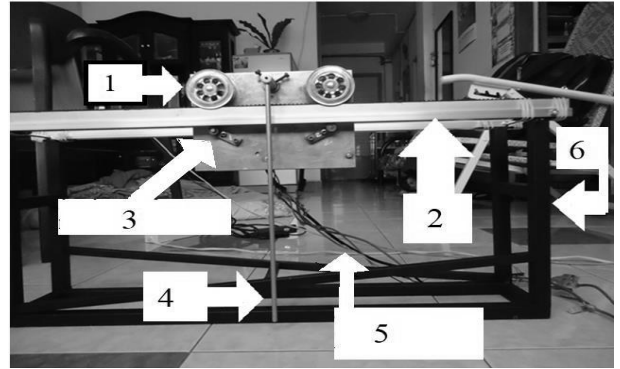
Để tối ưu hóa các thông số K_i này, giải thuật di truyền (genetic algorithm - GA) thường được sử dụng.

4. Mô hình thực nghiệm

Board điều khiển được sử dụng là TMS320F28335 (Hình 2) có thể lập trình nhúng bằng Matlab/Simulink. Việc nhúng bằng Matlab giúp người thiết kế giải thuật không quá rành về lập trình vẫn có thể áp dụng các khối có sẵn của Matlab để giảm công sức xây dựng phần mềm. Ngoài ra, tốc độ cao của board giúp cho việc tính toán giải thuật HTTTT - có tính toán đạo hàm Lie- nhanh đủ kịp để kịp xuất tín hiệu điều khiển cho mô hình thực. Động cơ được sử dụng trong hệ thống là động cơ Tamagawa cũ của Nhật - loại 30W - (thông số động cơ ở Bảng 2 được nhà sản xuất cung cấp và được liệt kê ở (5)). Thông qua các thiết bị trên, một mô hình cơ khí-điện tử thực nghiệm C&P được xây dựng như ở Hình 3 và Hình 4.

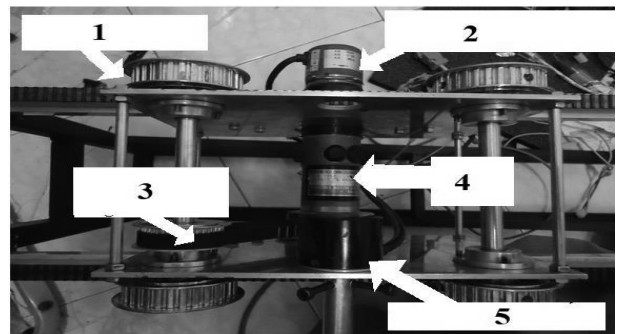


Hình 2. Board STM320F28335



Hình 3. Mô hình cơ khí C&P nhìn từ trước

- 1-Bánh xe;
- 2-Đường ray mà xe chạy phía trên;
- 3-Kẹp giữ xe chạy sát trên mô hình, không bị rung;
- 4-Con lắc ngược;
- 5-Dây điện truyền tín hiệu điện và tín hiệu cảm biến qua lại giữa mô hình và board điều khiển;
- 6-Khung đỡ con lắc ngược.

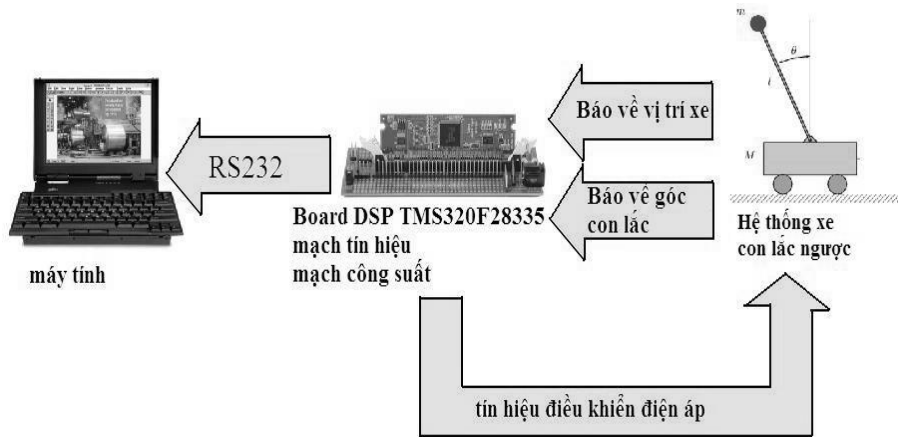


Hình 4. Mô hình xe (Cart) nhìn từ trên xuống

- 1-Bánh xe của mô hình;
- 2-Encoder nối động cơ để báo về tín hiệu vị trí xe;
- 3-Dây đai nối động cơ và bánh xe;
- 4-Động cơ DC;
- 5-Encoder được kết nối với con lắc ngược để hồi tiếp tín hiệu góc lệch của con lắc ngược.

Thông số mô hình ở Bảng 1 và Bảng 2 được đo đạc và được nhà sản xuất cung cấp như sau:

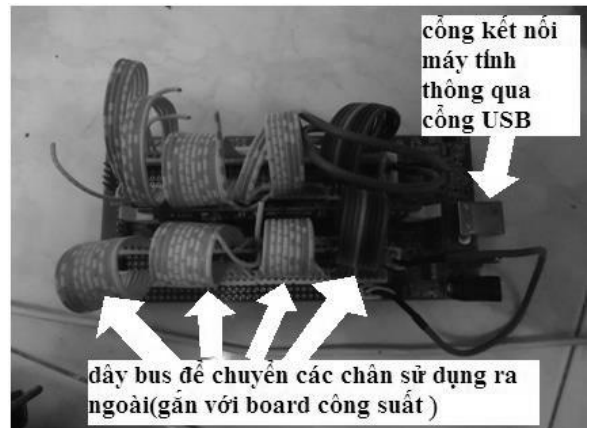
$$\begin{aligned}
 R_m=2,7; \quad d_1=40/25; \quad R=57,2958*10^{-3}; \quad J_m=0,049*10^{-4}; \quad m=0,027; \quad M=1,68; \\
 K_b=K_r=5,3*10^{-3}; \quad C_m=5*10^{-4}; \quad (5) \quad J_1=1,1664*10^{-3}; \quad C_1=0,36; \\
 K_f=7,8*10^{-3}; \quad L_m=1,4*10^{-3}; \quad J_m=0,049*10^{-4}; \quad g=9,81.
 \end{aligned}$$



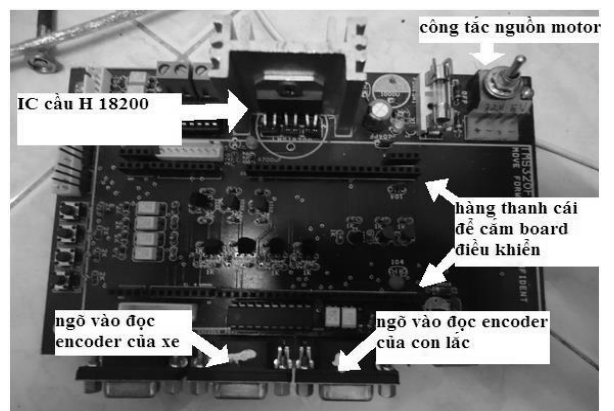
Hình 5. Sơ đồ kết nối điều khiển

Sơ đồ kết nối điều khiển của hệ thống được thể hiện ở Hình 5. Ngoài ra, cách kết nối board điều khiển và mạch điện hệ thống được thể hiện ở Hình 6 và Hình 7. Tín hiệu xung của encoder được đưa về các chân đọc xung của DSP. Các chân này được quy định trong các khối được đánh số 1 và trong Hình 8. Tín hiệu điều khiển được xuất ra chân PWM của DSP ở khối số 6 ở Hình 8. Mạch cầu H bên cạnh việc tiếp nhận xung PWM để điều khiển động cơ chạy nhanh hay chậm thì mạch này còn có ngõ vào xung số (0 hay 1) để động cơ quay chiều thuận hay nghịch. Tín hiệu số này được board DSP chuyển đến ngõ vào xung này của PWM thông qua quy định ở khối số 7 trong Hình 8. Các kết quả cảm biến và điều khiển được tổng hợp để gửi qua dây cáp kết nối DSP và cổng USB máy tính (được quy định ở khối số 8 của Hình 8).

Trong quá trình thực nghiệm, nhóm tác giả giới hạn sự di chuyển của xe trong khoảng -40 cm đến 40 cm vì chiều dài thanh ngang cơ khí là 80 cm. Ngoài ra, góc lệch con lắc được giới hạn trong khoảng -20 độ đến 20 độ. Nếu góc lệch ra ngoài khoảng đó thì hệ thống bị ngừng cấp tín hiệu điều khiển. Đó là vì nếu góc lệch hơn khoảng đó, vị trí xe sẽ phải vượt 40 cm để có thể cân bằng được con lắc. Như thế, đáp ứng mô hình cơ khí không cho phép sự di chuyển của xe ngoài phạm vi cơ khí cho phép.

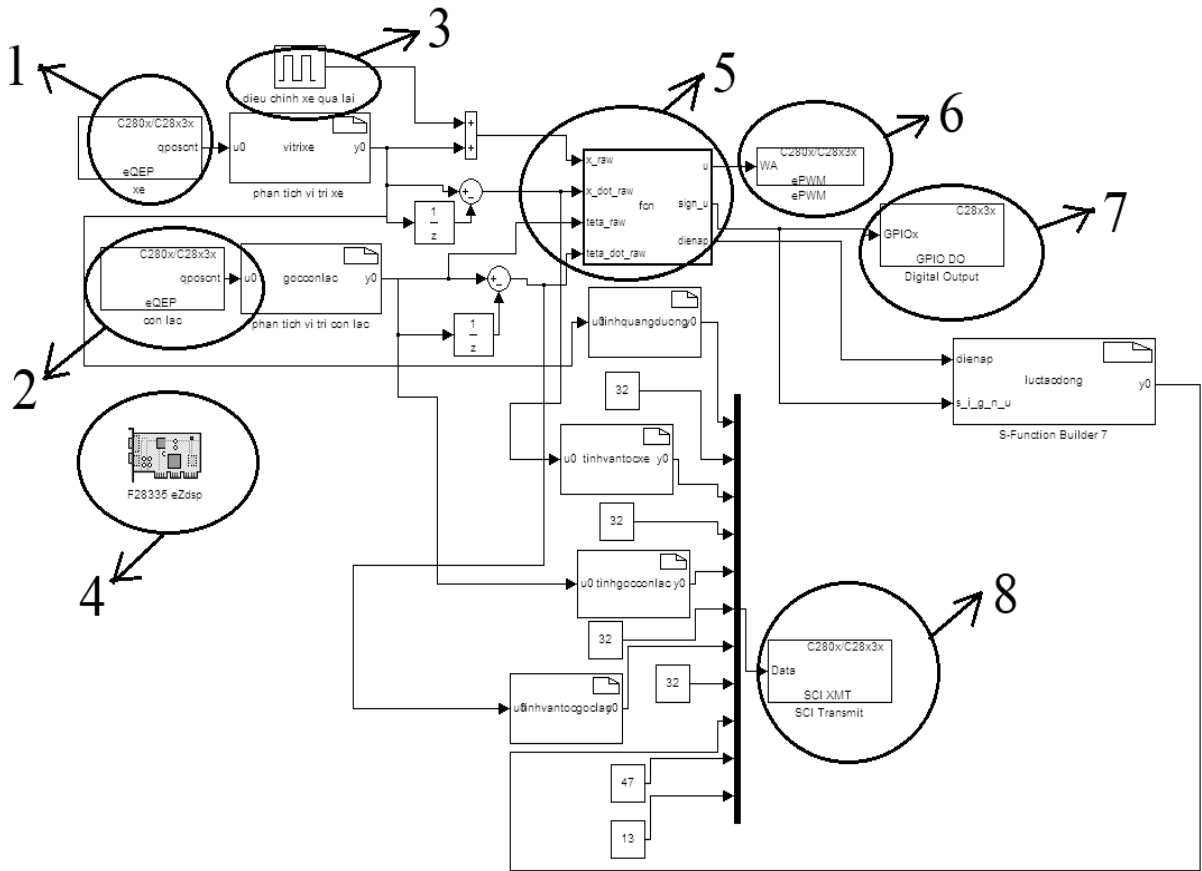


Hình 6. Board TMDSDOCK320F28335



Hình 7. Board công suất và thu dữ liệu từ DSP

Cấu trúc phần mềm Matlab/Simulink nhưng cho DSP TMS320F28335 để điều khiển phần cứng thực tế được thể hiện ở Hình 8.



Hình 8. Cấu trúc chương trình Matlab nhúng cho DSP TMS 320F28335 để điều khiển hệ C&P

- 1- Khối đọc xung encoder để báo vị trí xe;
- 2- Khối đọc xung encoder để báo góc lệch con lắc;
- 3- Khối quỹ đạo đặt. Trong trường hợp điều khiển ổn định tại chỗ thì người điều khiển sẽ chọn tín hiệu xung với biên độ bằng 0 ở khối này;
- 4- Khối khai báo để Matlab hiểu chương trình này nhúng cho DSP TMS320 F28335;
- 5- Khối chương trình điều khiển. Giải thuật HTTTH được lập trình trong khối này;
- 6- Khối tín hiệu xuất xung tương ứng ra cầu H để điều khiển động cơ;
- 7- Khối tín hiệu xuất tín hiệu số (0 hay 1) để quyết định chiều quay của động cơ DC;
- 8- Khối gửi dữ liệu lên cổng USB máy tính để thu thập dữ liệu thực nghiệm. Trên board DSP, có chip chuyển đổi kết nối từ RS232 về USB thông qua cáp.

5. Kết quả thực nghiệm

5.1. Với thông số chuẩn

Với giá trị Q và R ở (4) là các ma trận đơn vị, tín hiệu điều khiển ở (3) không điều khiển được ổn định mô hình thực. Do đó, trong bài báo này, nhóm tác giả chọn lại ma trận Q và R thông qua thử sai. Việc xác định khoảng phù hợp của các thành phần bên trong ma trận Q và R là rất khó khăn nên nhóm chỉ thử với một bộ thông số Q và R mà nhóm thấy cho kết quả ổn định nhất. Các giá trị này được liệt kê ở (6). Với giá trị Q và R như ở (6) thì khoảng

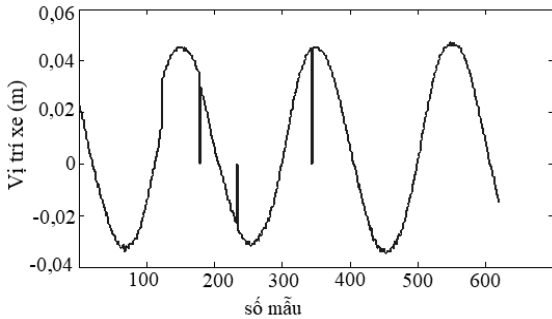
biensol và biensol2 để hệ thống còn ổn định được lần lượt là [0,1; 20] và [0,1; 10]. Do đó, nhóm tác giả chọn theo trực giác giá trị biensol1 và biensol2 nằm ở khoảng giữa các đoạn trên để tạo một bộ thông số chuẩn ở (6). Dựa trên bộ thông số chuẩn này, nhóm tác giả thay đổi tuần tự các thông số để kiểm chứng ảnh hưởng của chúng đến chất lượng điều khiển.

Với giá trị này thì BDK HTTTH ổn định được hệ thống thực tế ở Hình 3. Với thông số chuẩn, các kết quả điều khiển được liệt kê từ Hình đến Hình

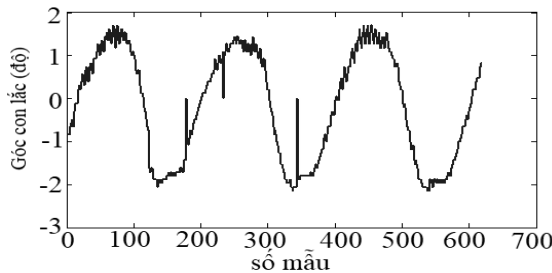
11. Ta thấy xe dao động qua lại trong khoảng -3,5 cm đến 4,5 cm quanh vị trí 0 (Hình 9) và con lắc được giữ ở vị trí thẳng đứng nhưng dao động từ -2 độ đến 2 độ quanh vị trí 0 (Hình 10). Tín hiệu điện áp cấp cho động cơ DC được hiển thị ở Hình 11.

$$Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

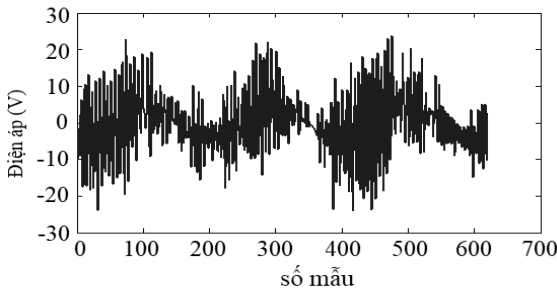
R=0,1 bienso1=3; bienso2=1



Hình 9. Vị trí xe (m) khi thông số chuẩn trong 700 mẫu (7s)



Hình 10. Góc con lắc (độ) khi thông số chuẩn trong 700 mẫu (7s)

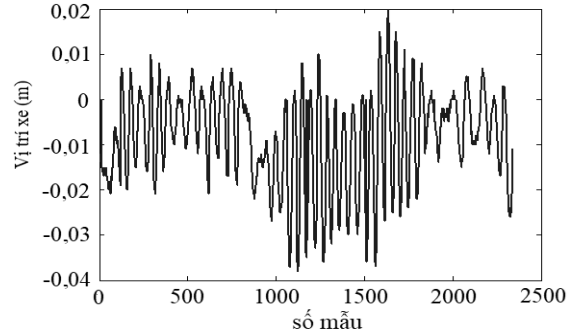


Hình 11. Điện áp (V) điều khiển khi thông số chuẩn trong 700 mẫu (7s)

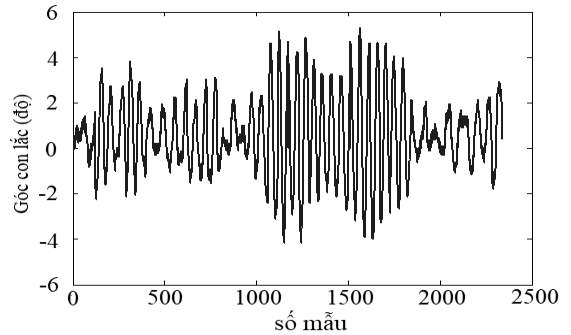
5.2. Khi thay đổi thông số tuyến tính hóa

Khi tăng bienso1 so với thông số chuẩn: chọn bienso1=7

Ở Hình 12, dao động của xe quanh vị trí cân bằng là -4 cm đến 2 cm. Khoảng dao động nhỏ hơn dao động của xe quanh vị trí cân bằng ở Hình 9.



Hình 12. Vị trí xe (m) khi bienso1=7 (tăng) trong 2500 mẫu (25s)

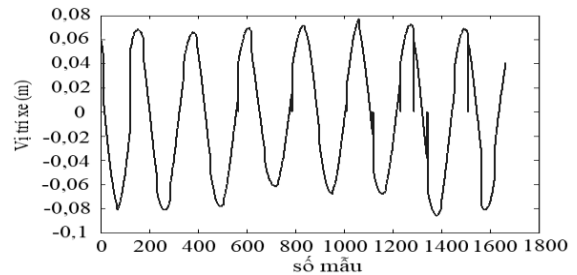


Hình 13. Góc con lắc (độ) khi bienso1=7 (tăng) trong 2500 mẫu (25s)

Ở Hình 13, dao động con lắc quanh vị trí cân bằng là từ -4 độ đến 5 độ. Khoảng dao động này lớn hơn khoảng dao động ở Hình 10.

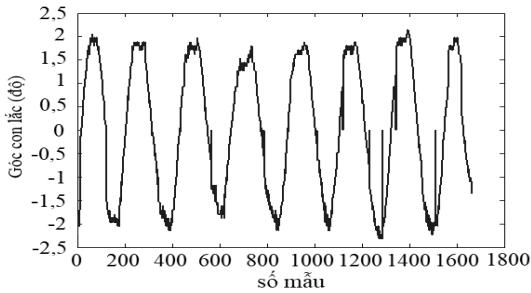
Nhận xét 1: như vậy, nếu việc tăng hay giảm bienso1 sẽ làm tương ứng việc đặt trọng tâm cho việc điều khiển vị trí xe nhiều hay ít. Khi đó, sự ổn định của góc con lắc sẽ bị kém đi ít hay nhiều, tương ứng.

Khi giảm bienso1 so với thông số chuẩn: chọn bienso1 mới là 2 (so với ban đầu là 1), nhóm tác giả được các kết quả thực nghiệm thể hiện từ Hình 14 và Hình 15.



Hình 14. Vị trí xe (m) khi bienso1=2 (giảm) trong 1800 mẫu (18s)

Trong Hình 14, dao động của xe quanh vị trí cân bằng là từ -8 cm cho đến 8 cm. Khoảng dao động này là lớn hơn so với khoảng này trong Hình 9.



Hình 15. Góc con lắc (độ) khi $biensol=2$ (giảm) trong 1800 mẫu (18s)

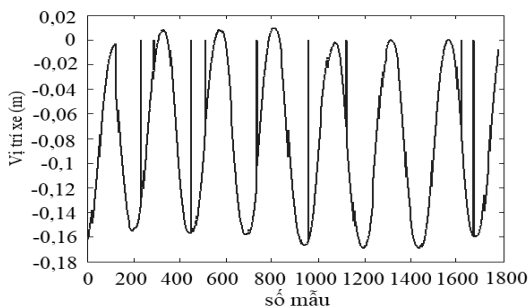
Dù vị trí xe dao động mạnh hơn nhưng góc con lắc dao động từ -2 độ đến 2 độ (Hình 15), không thay đổi so với Hình 10.

Khi giảm $biensol$ so với $biensol2$ thì xe sẽ dao động nhiều hơn. Trong một chừng mực giảm nào đó thì xe sẽ ổn định hơn. Tuy nhiên, do mô hình thanh ngang của ta bị giới hạn nên nếu xe dao động vượt quá giới hạn thì ta có thể xem như hệ không ổn định được.

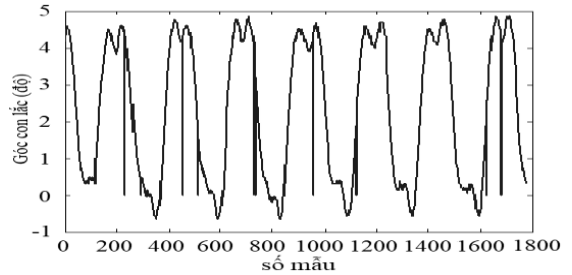
Nhận xét 2: Khi giảm $biensol$ đến một mức nhất định thì việc ổn định góc con lắc không cải thiện được chất lượng dù vị trí xe chất lượng có giảm đi nữa.

5.3. Khi thay đổi thông số điều khiển

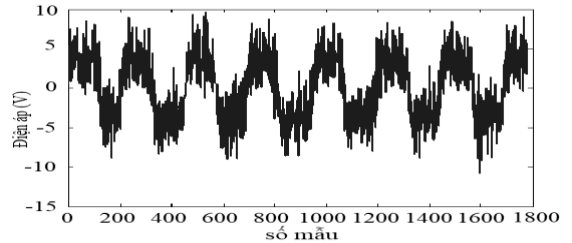
Khi tăng R : nhóm tác giả chọn $R=0,5$ (lớn gấp 5 lần so với R chuẩn). Các kết quả thực nghiệm được hiển thị từ Hình 16 đến Hình 18. Trong Hình 16, vị trí xe được dao động trong khoảng từ -18 cm đến 0 cm, lớn hơn so với ở Hình 9. Trong Hình 17, góc con lắc dao động trong khoảng -1 độ đến 5 độ, lớn hơn so với dao động ở Hình 10. Trong Hình 18, điện áp cấp cho động cơ chỉ dao động trong khoảng -10 V đến 9 V. Sự dao động điện áp là nhỏ hơn so với điện áp ở bộ thông số chuẩn ở Hình 11.



Hình 16. Vị trí xe (m) trong 1800 mẫu (18s) khi $R=0,5$ (tăng)



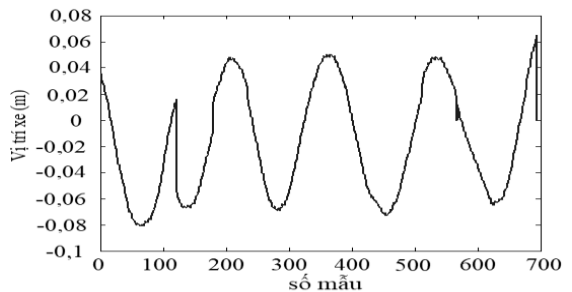
Hình 17. Góc con lắc (độ) trong 1800 mẫu (18s) khi $R=0,5$ (tăng)



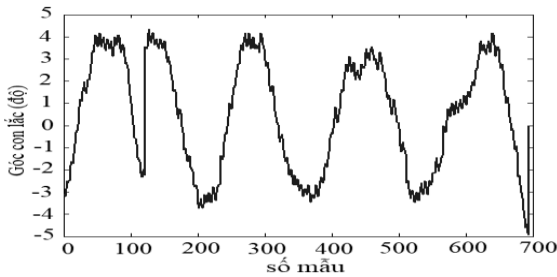
Hình 18. Điện áp (V) điều khiển trong 1800 mẫu (18s) khi $R=0,5$ (tăng)

Nhận xét 3: việc tăng R làm hệ thống vẫn ổn định nhưng dao động nhiều hơn quanh vị trí cân bằng. Tuy vậy, điện áp cấp được tối ưu hóa hơn. Trong trường hợp điện áp thay đổi liên tục thường xuyên sẽ ảnh hưởng đến tuổi thọ mạch điện và cơ cấu chấp hành thì việc điều chỉnh R phù hợp là điều cần thiết.

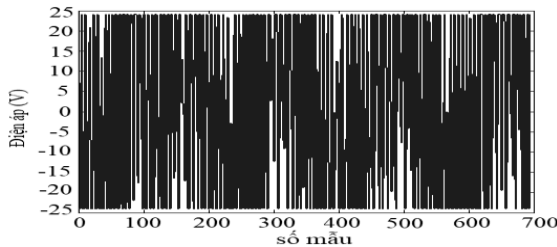
Khi giảm R : chọn $R=0,01$ (nhỏ hơn 10 lần so với R chuẩn), các kết quả thực nghiệm được thể hiện từ Hình 19 đến Hình 21. Ở Hình 19 (khi R tăng), dao động của vị trí xe từ -8 cm đến 6 cm. Khoảng dao động này lớn hơn so với dao động ở bộ thông số chuẩn (Hình 9) và gần như tương đương với trường hợp ở Hình 16 (khi R giảm). Ở Hình 20, sự dao động của góc con lắc là từ -5 độ đến 4 độ. Sự dao động này là lớn hơn sự dao động đối với trường hợp bộ thông số chuẩn ở Hình 10. Sự dao động này còn lớn hơn dao động ở Hình 17.



Hình 19. Vị trí xe (m) trong 700 mẫu (7s) khi $R=0,01$ (giảm)



Hình 20. Góc con lắc (độ) trong 700 mẫu (7s) khi $R=0,01$ (giảm)



Hình 21. Điện áp (V) điều khiển trong 700 mẫu (7s) khi $R=0,01$ (giảm)

Điện áp ở Hình 21 dao động rất mạnh so với trường hợp chuẩn (ở Hình 11).

Nhận xét 4: việc giảm trọng số R đã làm điện áp dao động mạnh hơn và làm góc con lắc cũng như vị trí xe dao động mạnh hơn, hệ thống rung hơn. Điều này củng cố Nhận xét 3. Ngoài ra, thông qua thực nghiệm này, nhóm tác giả thấy rằng việc điều chỉnh R chỉ làm tín hiệu điện áp êm hơn hay dao động hơn chứ không ảnh hưởng tốt đến việc điều khiển các biến trạng thái của hệ thống.

6. Kết luận

Thông qua kết quả thực nghiệm, nhóm tác giả đã cho thấy BDK HTTTH ổn định được hệ thống thực. Tuy nhiên, góc con lắc và vị trí xe dao động qua lại quanh vị trí cân bằng chứ chưa về hẳn 0 như mô phỏng. Việc dao động qua lại này, theo quan điểm của nhóm tác giả, là do sự sai lệch nhất định giữa thông số hệ thống được đo đạc có sự chênh lệch nhất định so với thông số thực của hệ thống. Ngoài ra, nhiều xấp xỉ được giả thiết để đơn giản hóa trong phương trình toán học như: xem như con lắc là thanh đồng chất hoàn toàn, xe là một khối đồng chất cân đối hoàn toàn... Ngoài ra, các thông số điều khiển cũng đã được trình bày và phân tích để đưa ra quy tắc hiệu chỉnh điều khiển cho hệ thống thực tế thông qua thực nghiệm trong bài báo này như:

- Thay đổi tăng hay giảm $bienso1$ và $bienso2$ để ưu tiên việc giảm dao động trong quá trình điều khiển vị trí xe hoặc góc con lắc.

- Việc tăng giá trị R để tín hiệu điện áp điều khiển ít dao động hơn nhưng sẽ làm sự dao động của xe và góc con lắc bị lớn ra đáng kể. Việc giảm giá trị R quá mức sẽ làm tín hiệu điện áp điều khiển dao động mạnh và dao động của các biến trạng thái cũng không được cải thiện. Do đó, việc chọn R phù hợp là cần thiết. Hiện thời, trong thí nghiệm của nhóm tác giả, việc xác định giá trị R vẫn phải thông qua thử sai.

Lời cảm ơn: Công trình này thuộc về đề tài nghiên cứu khoa học năm 2022, được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh (HCMUTE), Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

- Aracil, J., & Gordillo, F. (2004). The inverted pendulum: a benchmark in nonlinear control. *Proceedings World Automation Congress, 2004*, 468-482.
- Dương, H. N. (Biên tập). (2003). *Điều khiển hệ thống đa biến*. Thành phố Hồ Chí Minh: NXB Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- Nguyễn, H. D. (2010). Điều khiển trượt thích nghi hệ phi tuyến dùng mạng neuron hàm cơ sở xuyên tâm. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 15(a), 263-272.
- Nguyễn, H. D. (2010). Điều khiển trượt hệ phi tuyến dùng mô hình mờ. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 15(b), 46-55.
- Nguyễn, H. D. (2012). Điều khiển trượt dựa trên hàm trượt kiểu PID. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 21(a), 30-36.
- Nguyen, V. D. H., Nguyen, M. T., Do, D. T., & Tran, V. D. (2014). Application of Leedback Linearization Control in Balancing Cart-Pole system. *Journal of Technical Education Science*, 28, 58-62.
- Shehu, M., Ahmad, M.R., Shehu, A., & Alhassan, A. (2015). LQR, double-PID and pole placement stabilization and tracking control of single link inverted pendulum. *International Conference on Control System, Computing and Engineering, 2015*, 218-223.