

MỘT PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ BÓNG THANH METHOD OF SLIDING MODE CONTROL FOR BALL – BEAM SYSTEMS

¹Nguyễn Minh Tâm, ²Đào Minh Tiến, ³Vũ Đình Đạt, ⁴Hồ Trọng Nguyễn,

⁵Nguyễn Minh Hoàng, ⁶Nguyễn Văn Đông Hải, ⁷Nguyễn Thị Oanh

^{1,2,3,4,5,6} Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

⁷Trường Trung cấp nghề Cơ điện Đông Nam Bộ

Ngày tòa soạn nhận bài 15/8/2016, ngày phản biện đánh giá 28/10/2016, ngày chấp nhận đăng 5/12/2016

TÓM TẮT

Giải thuật điều khiển phi tuyến là giải thuật thường được áp dụng cho các hệ thống đã được biết rõ về phương trình toán học. Trong các giải thuật phi tuyến, giải thuật điều khiển trượt là thông dụng nhất. Mô hình được áp dụng trong đề tài này là hệ bóng thanh trục lệch - một hệ thống thông dụng trong nghiên cứu lý thuyết điều khiển. Bài báo này giới thiệu một phương pháp điều khiển trượt cho hệ thống bóng thanh trục lệch. Giải thuật trượt được thiết kế thỏa mãn các giá trị đặt của vị trí hòn bi khác nhau và được đảm bảo bằng toán học. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm tại các giá trị điểm làm việc khác nhau cho thấy bộ điều khiển trượt hoạt động tốt.

Từ khóa: bóng thanh; điều khiển trượt; điều khiển phi tuyến; Matlab; Simulink; lý thuyết điều khiển; thực nghiệm; mô phỏng; phương pháp điều khiển.

ABSTRACT

Nonlinear control algorithms are often used to control systems that have explicit dynamic equations. Out of such algorithms, sliding control mode is the most popular. The model in this paper is a ball -beam system - a popular model in control theory research. This paper presents a method of sliding mode control for ball - beam systems. The sliding mode control is designed to satisfy different set points of position of ball and guaranteed by mathematics. Simulation and experimental results at different working points prove that the sliding mode controller works well.

Keywords: Ball and beam; sliding control; nonlinear control; Matlab; Simulink; control theory; experiment; simulation; control method.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống bóng thanh trục lệch là một mô hình thông dụng trong các giải thuật điều khiển. Đây là một mô hình được phát triển từ mô hình bóng thanh trục giữa. Tuy các giải thuật điều khiển thông minh được áp dụng nhiều cho hệ thống này [1], [2] nhưng một khuyết điểm cơ bản là điều khiển thông minh là do thuật điều khiển không xuất phát từ mô hình toán học của hệ thống nên ta không tận dụng được thông tin hệ thống thông qua phương trình toán học. Từ

đó, độ ổn định hệ thống không được đảm bảo bởi giải thuật toán học.

Giải thuật tuyến tính cũng được áp dụng cho hệ thống [3], [4]. Tuy nhiên, bản chất hệ thống là phi tuyến nên giải thuật tuyến tính chỉ đảm bảo hệ thống hoạt động tại một số điểm làm việc nhất định và dãy hoạt động của hệ thống là không được lớn. Do đó, giải thuật phi tuyến tỏ ra phù hợp trong trường hợp hệ thống đã được biết rõ về phương trình toán học.

Trong giải thuật điều khiển phi tuyến, giải thuật trượt (Sliding Mode Control –SMC) là thông dụng nhất [5] và đã được áp dụng cho một hệ phi tuyến “underactuated” [6]. Do đó, trong khuôn khổ bài báo này, tác giả áp dụng một phương pháp điều khiển trượt cho một hệ tương tự, đó là hệ bóng thanh trục lệch.

Các mục tiếp theo của bài báo được trình bày theo thứ tự sau: Mục II trình bày mô hình toán học hệ bóng thanh. Mục III trình bày cách thức xây dựng một bộ điều khiển trượt và áp dụng bộ điều khiển đó cho hệ bóng thanh. Mục IV trình bày kết quả mô phỏng của thuật toán được đề xuất cho hệ bóng thanh. Mục V trình bày kết quả điều khiển thực tế cho hệ thống. Phần kết luận được trình bày trong Mục VI của bài báo.

II. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Hệ quả bóng được đặt trên một thanh nằm ngang và lăn tự do dọc theo chiều dài thanh. Cánh tay di động được gắn với thanh beam ở 1 đầu và đầu còn lại gắn với đĩa quay. Đĩa quay có thể thay đổi 1 góc là θ , và cánh tay di động hợp với thanh một góc α (như hình 1).

Theo tài liệu [7], ta có phương trình toán học mô tả hệ thống bóng thanh:

$$\ddot{\alpha} = \frac{\left[u - (2mr\dot{r} + K_2)\dot{\alpha} + (mg(L-r) + \frac{L}{2}Mg)\cos\alpha \right]}{(mr^2 + K_1)} \quad (1)$$

$$\ddot{r} = \frac{1}{K_4} (r\dot{\alpha}^2 + g \sin\alpha) \quad (2)$$

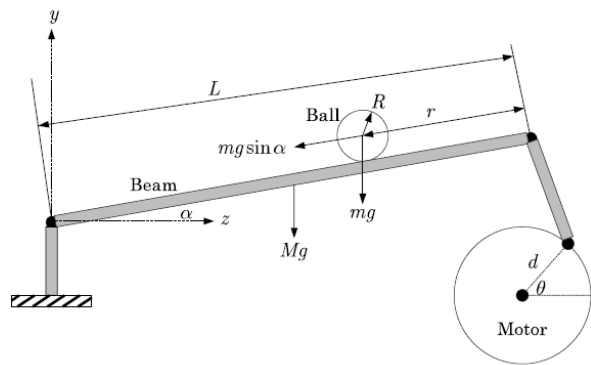
Với:

$\alpha(t)$: góc thanh beam (rad/s)

$r(t)$: vị trí quả bóng (m)

$\theta(t)$: góc quay của bánh đà (rad/s)

- m : khối lượng quả bóng (kg)
 M : khối lượng thanh beam (Kg)
 L : Chiều dài thanh beam (m)
 R_m : Trở kháng motor (Ω)
 J_m : Moment motor (Kg.m^2)
 K_m : Hằng số motor
 K_g : hệ số tỉ lệ
 d : chiều dài cánh tay động (m)
 J_1 : Moment thanh beam (kg.m^2)
 K_b : Hằng số Back EMF (V/rad/s)



Hình 1. Mô hình hệ bóng thanh

Với các thông số K_1, K_2, K_3, K_4 được xác định như sau:

$$K_1 = \frac{R_m J_m L}{K_m K_g d} + J_1;$$

$$K_2 = \frac{L}{d} \left(\frac{K_m K_b}{R_m} + K_b + \frac{R_m B_m}{K_m K_g} \right);$$

$$K_3 = 1 + \frac{K_m}{R_m}; K_4 = \frac{7}{5}$$

$V_{in}(t)$: điện áp cấp cho động cơ;

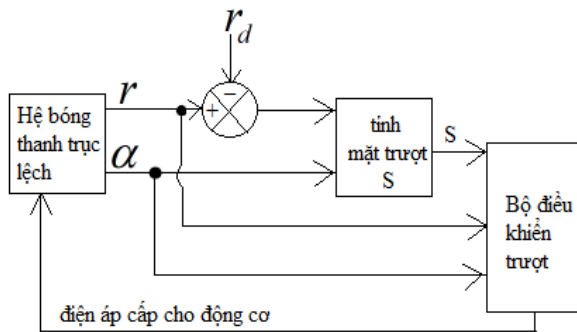
$u(t) = K_3 V_{in}$: là điện áp điều khiển hệ ball and beam.

Đặt: $x_1 = r, x_2 = \dot{r}, x_3 = \alpha, x_4 = \dot{\alpha}$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{g}{K_4} \sin x_3 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{u - (2mx_1x_2 + K_2)x_4 - (mg(L-x_1) + \frac{L}{2}Mg) \cos x_3}{(mx_1^2 + K_1)} \end{cases}$$

III. BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Bộ điều trượt được diễn tả thông qua sơ đồ sau:



Hình 2. Sơ đồ bộ điều khiển mờ trượt

Thiết kế SMC:

Gọi e là tín hiệu sai lệch:

$$e_\alpha = \alpha - \alpha_e = \alpha$$

$$e_r = r - r_d$$

Trong đó, $\alpha_e = 0$ và r_d là giá trị đặt.

Chọn mặt trượt như sau:

$$\begin{aligned} S_1 &= \dot{e}_\alpha + \gamma_1 e_\alpha + \gamma_2 \dot{e}_r + \gamma_3 e_r \\ &= \dot{\alpha} + \gamma_1 \alpha + \gamma_2 \dot{r} + \gamma_3 (r - r_d) \end{aligned} \quad (3)$$

Với $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ và $\gamma_1 > 0, \gamma_2 < 0, \gamma_3 < 0, \gamma_3 > \gamma_1 \gamma_2$.

Lấy đạo hàm S_1 theo thời gian ta được:

$$\dot{S}_1 = \ddot{\alpha} + \gamma_1 \dot{\alpha} + \gamma_2 \ddot{r} + \gamma_3 \dot{r} \quad (4)$$

Thay (1) và (2) vào (4) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= \frac{1}{(mr^2 + K_1)} \left[u - (2mr\dot{r} + K_2)\dot{\alpha} + \right. \\ &\quad \left. + (mg(L-r) + \frac{L}{2}Mg) \cos \alpha \right] + \\ &\quad + \gamma_1 \dot{\alpha} + \gamma_3 \dot{r} + \gamma_2 \frac{r\dot{\alpha}^2 - g \sin \alpha}{K_4} \end{aligned} \quad (5)$$

Chọn luật điều khiển u như sau:

$$\begin{aligned} u &= (2mr\dot{r} + K_2)\dot{\alpha} + (mgr + \frac{L}{2}) \cos \alpha \\ &\quad - (\gamma_1 \dot{\alpha} + \gamma_3 \dot{r} + \gamma_2 \frac{r\dot{\alpha}^2 - g \sin \alpha}{K_4})(mr^2 + K_1) \\ &\quad - (mr^2 + K_1)\Gamma_3 \operatorname{sgn}(S_1) \end{aligned} \quad (6)$$

Thay (6) vào (5) ta có: $\dot{S}_1 = -\Gamma_3 \operatorname{sgn}(S_1)$

Nếu chọn Γ là hằng số dương thì ta sẽ được $S_1 \dot{S}_1 < 0$, do vậy S_1 dần về 0 thỏa mãn yêu cầu.

VI. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Các thông số mô hình của mô phỏng được lựa chọn như sau:

$$m = 60.47 \times 10^{-3} (kg); R = 1.23 \times 10^{-2};$$

$$d = 0.075; g = 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right); L = 0.55;$$

$$J_b = \frac{2}{5} mR^2; K_b = 0.0535; R_m = 3.5;$$

$$J_b = \frac{2}{5} mR^2; M = 346.6 \times 10^{-3}; J_1 = \frac{ML^2}{3};$$

$$K_g = 7.5; J_m = 0.049 \times 10^{-4}; B_m = 5 \times 10^{-4};$$

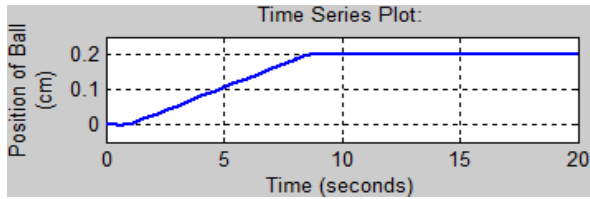
$$\gamma_1 = 14; \gamma_2 = -6.85; \gamma_3 = -11.42; \Gamma = 0.3.$$

Các giá trị thông số ban đầu của biến trạng thái hệ thống được chọn như sau:

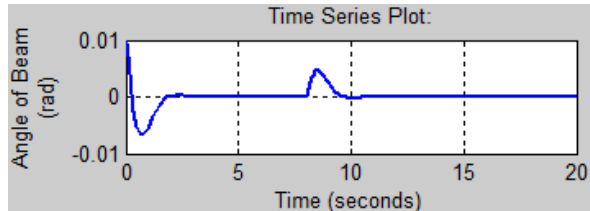
$$x_{1_init} = 0.01(m); \quad x_{2_init} = 0 \left(\frac{m}{s} \right);$$

$$x_{3_init} = 0.002(rad); \quad x_{4_init} = 0 \left(\frac{rad}{s} \right)$$

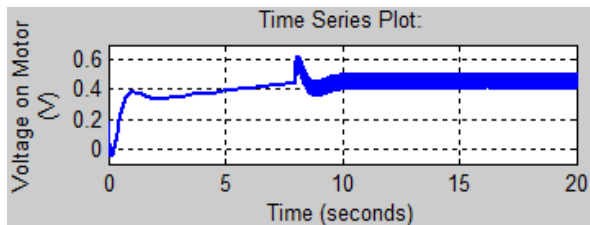
- **Trường hợp 1:** Điểm làm việc thay đổi tương ứng với sự thay đổi giá trị đặt $r_d = 20cm$



Hình 3. Vị trí của viên bi



Hình 4. Góc lệch của thanh beam

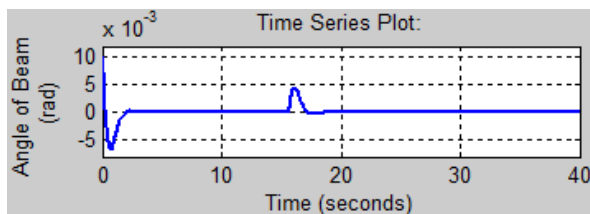


Hình 5. Điện áp cấp cho động cơ

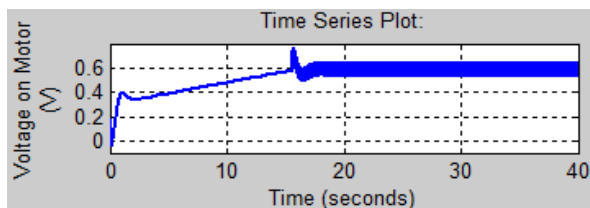
- **Trường hợp 2:** Điểm làm việc thay đổi tương ứng với sự thay đổi giá trị đặt $r_d = 40\text{cm}$



Hình 6. Vị trí của viên bi



Hình 7. Góc lệch của thanh beam



Hình 8. Điện áp cấp cho động cơ

Nhận xét:

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống hoạt động tốt với bộ điều khiển trượt. Với vị trí đặt của trái banh càng nhỏ thì thời gian xác lập của góc lệch thanh beam và vị trí hòn bi càng nhanh, từ dưới 10s đến dưới 20s (hình 3 và hình 6). Tuy nhiên, do trong giải thuật điều khiển có hàm dấu sign(). Do đó, điện áp cấp cho động cơ bị dao động chattering (như ở hình 5 và hình 8). Mặt khác, tại vị trí hòn bi ổn định, thanh beam nằm ngang hoàn toàn thì điện áp của động cơ cũng không về giá trị 0 được mà giữ ở mức 3V để giữ thanh beam không bị ngã xuống mà vẫn ở vị trí nằm ngang.

V. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Mô hình thực nghiệm là mô hình được chế tạo tại phòng Thí nghiệm điều khiển tự động của khoa điện-điện tử, đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM. Kết cấu cơ khí của mô hình được mô tả như hình dưới đây:



Hình 9. Mô hình nhìn từ phía trước

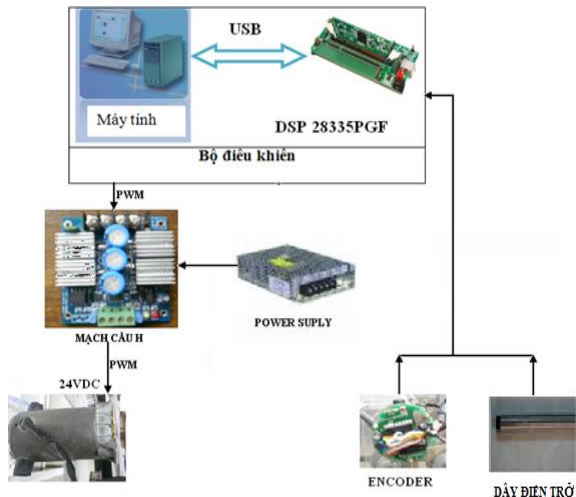


Hình 10. Mô hình nhìn từ trên xuống

Chú thích:

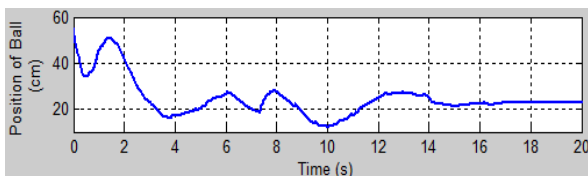
- | | |
|------------------|-----------------|
| 1. Thanh beam | 4. Encoder |
| 2. Quả bi (bóng) | 5. Bộ sắt |
| 3. Động cơ 24VDC | 6. Dây điện trở |

Sơ đồ phần cứng điện của mô hình được diễn tả như hình dưới đây. Trong đó, dây điện trở được quấn theo kiểu biến trở con chạy để đo vị trí trái banh (trong trường hợp này là một viên bi sắt). Encoder được gắn đồng trục với động cơ để đo góc lệch thanh beam.

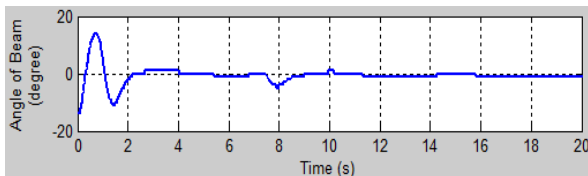


Hình 11. Sơ đồ phân cứng của hệ bóng thanh trục lệch

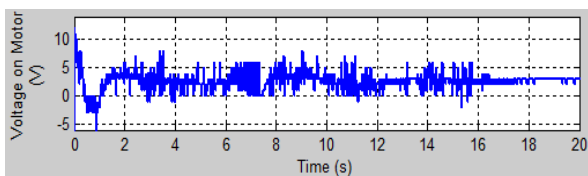
- **Kết quả thực tế khi dùng bộ điều khiển trượt với vị trí đặt viên bi 20 cm**



Hình 12. Vị trí quả bi đặt tại 20cm

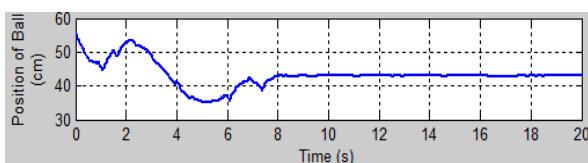


Hình 13. Góc lệch thanh beam (độ) đặt tại 20cm

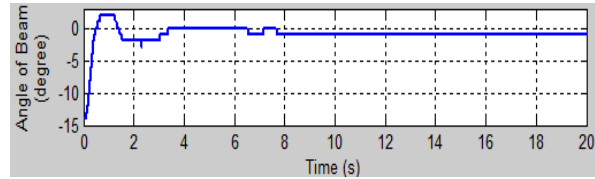


Hình 14. Điện áp cấp cho motor động cơ (V) đặt tại 20cm

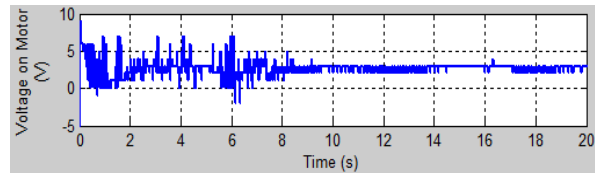
- **Kết quả thực tế khi dùng bộ điều khiển trượt với vị trí đặt viên bi 40 cm**



Hình 15. Vị trí quả bi đặt tại 40cm



Hình 16. Góc lệch thanh beam (độ) đặt tại 40cm



Hình 17. Điện áp cấp cho motor động cơ (V) đặt tại 40cm

Nhận xét:

Kết quả thực nghiệm cho thấy kết quả tương tự như những kết luận ở phần mô phỏng. Hệ thống hoạt động tốt với bộ điều khiển trượt được thiết kế theo công thức (6). Với vị trí đặt của trái banh càng nhỏ thì thời gian xác lập của góc lệch thanh beam và vị trí hòn bi càng nhanh, dưới 20s (hình 12, 13, 15, 16). Tại vị trí hòn bi ổn định, thanh beam nằm ngang hoàn toàn thì điện áp của động cơ cũng không về giá trị 0 được mà giữ ở mức 3V để giữ thanh beam không bị ngã xuống mà vẫn ở vị trí nằm ngang.

Đồng thời, ta cần lưu ý: khi giá trị đặt càng lớn thì thời gian xác lập trong kết quả mô phỏng càng lớn nhưng trong kết quả thực tế thì thời gian xác lập càng nhỏ. Đó là vì trong mô phỏng, giá trị đặt ban đầu của hòn bi là ở bên phía phải của Hình 9. Nhưng ở mô hình thực, ta cần thả hòn bi từ phía trái của Hình 9, để sự dao động ban đầu vật lý của hòn bi là không quá lớn.

Ngoài ra, kết quả thực tế và mô phỏng là khá sát nhau: thời gian xác lập của vị trí bi là khoảng trên dưới 10s, thời gian xác lập của góc lệch thanh beam là khoảng trên dưới 4s. Đó là vì thông số mô hình của đối tượng mô phỏng và thực tế khá sát do các thông số mô hình của phòng thí nghiệm đã được nhận

dạng chính xác thông qua đo đạc và thông số động cơ của nhà sản xuất.

VI. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một giải thuật trượt. Kết quả điều khiển mô phỏng và thực

tế cho thấy hệ thống hoạt động ổn định tại các giá trị khác nhau (như trong bài báo là các vị trí 20 cm và 40 cm so với vị trí gốc 0). Giải thuật trượt đã được thiết kế với giá trị đặt tùy ý giá và được đảm bảo bằng toán học.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Amjad, M. I. Kashif, S. S. Abdullah, Z. Shareef, “Fuzzy logic control of ball and beam”, 2nd International Conference on Education technology and Computer, pp. 489-493, Vol. 3, (IEEE), 2010.
- [2] Lại Khắc Lãi, Vũ Nguyên Hải, Lại Thị Thanh Hoa, “Hai giải pháp mới điều khiển hệ Ball and Beam”, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, đại học Thái Nguyên, 2014.
- [3] K. T. Prasad, Y. V. Hote, “Optimal PID controller for Ball and Beam system”, Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), pp. 1-5, (IEEE), 2014.
- [4] Zhong-Hua Pang, Geng Zheng, Chun-Xiang Luo, “Augmented state estimation and LQR control for a ball and beam system”, 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1328-1332, 2011.
- [5] Ahmad Taher Azar, Quanmin Zhu, “Advances and Applications in Sliding Mode Control systems”, Springer, doi: 10.1109/ ICNN.1995.488968.
- [6] Nguyen Van Dong Hai, Nguyen Minh Tam, Mircea Ivanescu, “A method of Sliding Mode Control of cart and Pole System”, The international Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE2015), Ho Chi Minh city, Vietnam, 2015.
- [7] Mohammad Keshmiri, Ali Fellah Jahromi, Abofazl Mohebbi, Mohammad Hadi Amoozgar and Wen-Fang Xie, “Modelling and Control of Ball and Beam system using model based and non-model based control approaches”, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, Vol. 5, No. 1, 2012.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết

Nguyễn Minh Tâm

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM

Email: tammn@hcmute.edu.vn