

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT CHO HỆ TRUYỀN ĐỘNG DÂY MỀM DỰA TRÊN MÔ HÌNH MÔ-MEN XOẮN PHI TUYẾN

SLIDING MODE CONTROL DESIGN FOR FLEXIBLE SHAFT TRANSMISSION BASED ON NONLINEAR TORQUE MODELING

Nguyễn Hữu Cường Thịnh¹, Ngô Xuân Quang^{1,2}, Nguyễn Huy Hùng⁴, Dương Văn Tú^{1,2,3},
Nguyễn Tấn Tiến^{1,2,3}

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²DCSELab, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Sài Gòn

Email: nttien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ truyền động dây mềm có ưu điểm nhẹ, linh hoạt và an toàn, nên được ứng dụng rộng rãi trong robot và thiết bị tự động hóa. Tuy nhiên, đặc tính phi tuyến mạnh và trễ lớn của dây mềm khiến việc mô hình hóa và điều khiển trở nên phức tạp. Bài báo này trình bày một phương pháp điều khiển trượt dựa trên mô hình mô-men xoắn phi tuyến được xấp xỉ bằng chuỗi Fourier, nhằm điều khiển góc quay tải bám theo quỹ đạo mong muốn thông qua dây mềm. Mô hình được xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm, có xét đến ảnh hưởng của bán kính uốn dây. Kết quả mô phỏng trên MATLAB cho thấy bộ điều khiển trượt duy trì độ bám theo chính xác và ổn định ngay cả khi hệ chịu nhiễu và phi tuyến, đồng thời vượt trội hơn bộ điều khiển PID truyền thống trong các kịch bản thử nghiệm.

Từ khóa: Hệ truyền động dây mềm; Mô hình phi tuyến; Điều khiển trượt; PID.

ABSTRACT

Flexible shaft transmissions offer advantages in terms of lightweight design, flexibility, and safety, making them widely used in robotics and automation. However, their strong nonlinearities and significant time delays make modeling and control challenging. This paper presents a sliding mode control approach based on a nonlinear torque model approximated by a Fourier series to control the load angle to track a desired trajectory through a flexible shaft. The model is identified from experimental data, with additional compensation for the shaft's bending radius. MATLAB simulations demonstrate that the proposed sliding mode controller achieves accurate and stable tracking performance even under disturbances and nonlinearities, outperforming a conventional PID controller in various test scenarios.

Keywords: Flexible shaft transmission; Nonlinear modeling; Sliding mode control; PID. 

1. TỔNG QUAN

Hệ truyền động dây mềm là cơ cấu truyền chuyển động quay giữa hai phần tử cơ khí thông qua một trục hoặc dây có khả năng chịu mô-men xoắn, thay vì sử dụng liên kết cứng trực tiếp giữa động cơ và tải [1]. Cấu trúc này mang lại nhiều ưu điểm nổi bật như khối lượng nhẹ, khả năng bố trí linh hoạt và an toàn hơn khi tương tác với con người, nên được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống robot và thiết bị tự động hóa [2].

Trong robot tay máy, dây mềm cho phép đặt động cơ ở vị trí cố định trên khung hoặc chân đế, giảm khối lượng và quán tính tại các khâu chuyển động, từ đó nâng cao hiệu suất và khả năng điều khiển chính xác [2]. Ở robot di động phục vụ tìm kiếm và cứu hộ, truyền động dây mềm giúp loại bỏ động cơ và pin ở bộ phận chấp hành, giảm kích thước và trọng lượng tổng thể [3]. Trong thiết bị hỗ trợ phục hồi chức năng, dây mềm cho phép truyền mô-men xoắn từ động cơ đặt ở lưng bệnh nhân đến các khớp chi dưới, hỗ trợ vận động một cách an toàn và thoải mái [4]. Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây còn khai thác dây mềm trong robot đeo người và robot y tế, nơi tính đàn hồi và khả năng bố trí linh hoạt đóng vai trò quan trọng [8], [9], [14].

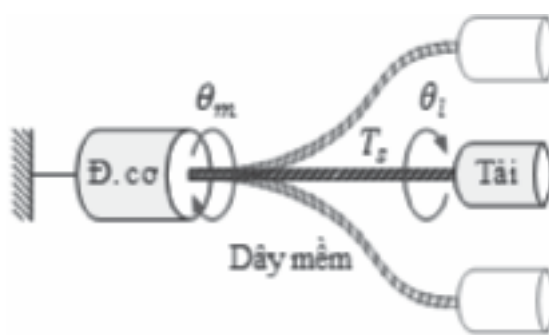
Tuy nhiên, việc tích hợp dây mềm vào hệ truyền động cũng đặt ra những thách thức lớn về mô hình hóa và điều khiển. Đặc tính đàn hồi xoắn, dao động và trễ phi tuyến của dây mềm khiến mô hình động lực học trở nên phức tạp và khó xác định chính xác [5]. Các mô hình tuyến tính đơn giản như lò xo xoắn với độ cứng hằng số [6], [7] thường không phản ánh đầy đủ hành vi động lực học thực tế. Do đó, nhiều nghiên cứu đã đề xuất sử dụng các mô hình phi tuyến dựa trên dữ liệu thực nghiệm để mô tả

chính xác hơn quan hệ giữa góc xoắn và mô-men xoắn [2], [8].

Những đặc tính phi tuyến và bất định này đòi hỏi các chiến lược điều khiển tiên tiến nhằm đảm bảo độ chính xác và độ bền vững của hệ thống. Trong đó, điều khiển trượt (Sliding Mode Control) được xem là ứng viên phù hợp nhờ khả năng khử nhiễu và đối phó với bất định tham số [5], [6], [13]. Trên cơ sở đó, bài báo này đề xuất một thuật toán điều khiển trượt dựa trên mô hình mô-men xoắn phi tuyến xấp xỉ bằng chuỗi Fourier, nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo và khả năng chống nhiễu của hệ truyền động dây mềm.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Hệ truyền động dây mềm được minh họa ở Hình 1, trong đó động cơ tạo ra chuyển động quay tại đầu vào, làm dây mềm bị xoắn. Độ lệch góc giữa đầu vào và đầu ra (góc xoắn) sinh ra mô-men xoắn truyền đến tải, tạo ra chuyển động quay tại đầu ra. Hai encoder được bố trí ở hai đầu để đo góc quay đầu vào và đầu ra, từ đó xác định góc xoắn và tốc độ xoắn của dây mềm [2], [8], [14].



Hình 1. Mô hình truyền động từ động cơ đến tải thông qua dây mềm.

Mô hình động lực học của hệ truyền động dây mềm có thể được biểu diễn bởi phương trình:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = T_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) \quad (1)$$

Với: - J_1 : Mô-men quán tính của tải;

- $\ddot{\theta}_1$: Gia tốc góc của tải;

- $T_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta})$: Mô-men xoắn sinh ra từ dây mềm, phụ thuộc vào góc xoắn $\Delta\theta = \theta_m - \theta_l$ và tốc độ xoắn $\Delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_m - \dot{\theta}_l$. Trong đó, θ_m là góc quay đầu vào của dây mềm (cũng chính là góc quay của động cơ), còn θ_l là góc quay đầu ra, nối với tải của dây mềm.

Do quan hệ giữa góc xoắn và mô-men xoắn trong dây mềm mang tính phi tuyến và không thể mô hình hóa chính xác bằng độ cứng hằng số [6], [7], nghiên cứu [8] đã đề xuất xấp xỉ mô-men xoắn bằng chuỗi Fourier:

$$\hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) = f_{nl}(\Delta\theta) + c\Delta\dot{\theta} \quad (2)$$

$$f_{nl}(\Delta\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} a_n \cos(n\Delta\theta w) \\ + b_n \sin(n\Delta\theta w) \end{matrix} \right) \quad (3)$$

Với: - a_0, a_n, b_n : Các hệ số Fourier;

- w : Tần số cơ bản;

- n : Bậc của chuỗi;

- c : Hệ số phản ánh ảnh hưởng của vận tốc xoắn.

Các hệ số này được xác định offline từ dữ liệu thực nghiệm thông qua phương pháp bình phương tối thiểu [8], [12].

Ngoài ra, để xét đến ảnh hưởng của bán kính uốn R , mô-men xoắn được hiệu chỉnh theo:

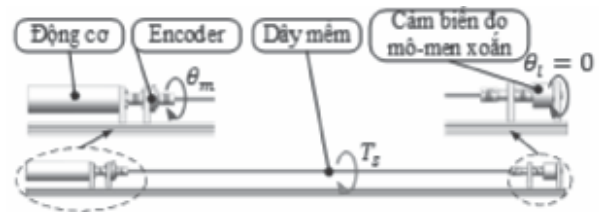
$$\hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}, R) = \mu(R, \text{sign}(\Delta\theta)) \times \hat{T}_s(\Delta\theta, \Delta\dot{\theta}) \quad (4)$$

với, μ là hệ số hiệu chỉnh được xác định từ sai số giữa mô hình ước tính và dữ liệu thực nghiệm.

Quy trình thu thập và xử lý dữ liệu để xác định hệ số Fourier trong phương trình

(2) và (3) được thực hiện như sau: Dữ liệu về mô-men xoắn và góc xoắn của dây mềm được thu thập từ mô hình thực nghiệm minh họa ở Hình 2. Đầu ra của dây mềm được gắn với cảm biến đo mô-men xoắn, với cảm biến được giữ cố định. Động cơ điều khiển đầu vào của dây mềm theo quỹ đạo tham chiếu dạng đa sin, với nhiều tần số và biên độ khác nhau. Góc xoắn được xác định thông qua encoder đo góc quay đầu vào, kết hợp với điều kiện cố định ở đầu ra. Đồng thời, cảm biến mô-men xoắn ghi nhận mô-men xoắn truyền qua dây mềm.

Hai tập dữ liệu này được xử lý để xác định mối quan hệ giữa mô-men xoắn và góc xoắn. Chuỗi Fourier được xấp xỉ bằng công cụ nội suy đường cong do phần mềm MATLAB cung cấp. Bậc của chuỗi Fourier được lựa chọn offline thông qua quá trình thực nghiệm, dựa trên tiêu chí tối thiểu hóa sai số bình phương, nhằm đảm bảo độ khớp tối ưu giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm.



Hình 2. Mô hình thực nghiệm dùng để nhận diện đặc tính mô-men xoắn phi tuyến của dây mềm.

3. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

Từ phương trình (1), hệ truyền động dây mềm có thể được viết lại dưới dạng phương trình trạng thái:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{J_1} [f_{nl}(\Delta\theta) + c(u_{eq} - x_2)] \end{aligned} \quad (5)$$

với, $x_1 = \theta_1, x_2 = \dot{\theta}_1$ là trạng thái của

hệ; $u_{eq} = \dot{\theta}_m$ là tín hiệu điều khiển.

Đặt sai số bám theo là $e = \theta_1^r - x_1$, với θ_1^r là quỹ đạo mong muốn của tải. Mặt trượt được chọn dưới dạng:

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (6)$$

với, λ là hằng số dương.

Luật điều khiển trượt được thiết kế nhằm đảm bảo hệ ổn định tiệm cận theo tiêu chuẩn Lyapunov:

$$u_{eq} = \frac{1}{c} [-f_{nl}(\Delta\theta) + J_1 \times \left(\frac{\ddot{\theta}_1^r}{+\lambda(\dot{\theta}_1^r - x_2) + k \operatorname{sgn}(s)} \right)] + x_2 \quad (7)$$

với, $k > 0$ là hệ số điều khiển, đảm bảo tính bền vững và khử nhiễu.

Để giảm hiện tượng chattering, trong thực tế $\operatorname{sgn}(s)$ thường được thay thế bằng hàm bão hòa $\operatorname{sat}(s/\varphi)$ với $\varphi > 0$ là vùng biên của lớp rãnh trượt [6].

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các mô phỏng được thực hiện trong MATLAB/Simulink để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển trượt so với bộ điều khiển PID truyền thống. Mô hình hệ truyền động dây mềm sử dụng các thông số của dây MasterFlex08 được tham khảo từ [8], trong đó các tham số quán tính, độ cứng xoắn và hệ số cản được xác định cho hai trường hợp thử nghiệm:

*Trường hợp 1, $\Delta\theta \geq 0$:

$a_0 = 4.20200$; $a_1 = -4.20100$; $a_2 = 0$; $a_3 = 0$; $b_1 = 0.16220$; $b_2 = 0$; $b_3 = 0$; $c = 0.00003$; $w = 0.03322$.

* Trường hợp 2, $\Delta\theta < 0$:

$a_0 = -3.10700$; $a_1 = 2.33500$; $a_2 = 0.74840$; $a_3 = 0.02559$; $b_1 = -1.48700$; $b_2 = 0.36180$; $b_3 =$

0.19760 ; $c = 0.00003$; $w = 0.04357$.

Dây mềm được giả thiết là thẳng. Thông số điều khiển của thuật toán điều khiển trượt: $\lambda = 5$; $k = 2$. Thông số điều khiển của thuật toán PID: $k_p = 700$; $k_i = 600$; $k_d = 4$, được tinh chỉnh theo phương pháp Ziegler-Nichols.

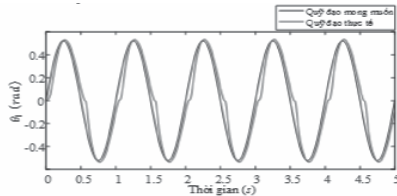
Kết quả mô phỏng cho thấy:

- Về đáp ứng bám quỹ đạo: Cả hai bộ điều khiển đều bám sát quỹ đạo mong muốn trong điều kiện lý tưởng (Hình 3a). Tuy nhiên, với nhiễu và phi tuyến của dây mềm, bộ PID xuất hiện sai số xác lập đáng kể, với biên độ dao động lớn nhất khoảng 0.2 rad (Hình 3b), trong khi bộ điều khiển trượt duy trì sai số thấp hơn rõ rệt, với biên độ dao động tối đa khoảng 0.015 rad (Hình 4b).

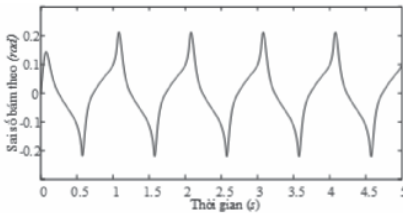
- Về tính bền vững: Bộ điều khiển trượt duy trì ổn định trong toàn bộ dải thử nghiệm ngay cả khi thông số hệ thay đổi hoặc có nhiễu xung tác động, điều này phù hợp với các nghiên cứu lý thuyết về khả năng kháng nhiễu của điều khiển trượt [5], [13].

- Về độ trễ và dao động: PID nhạy với độ trễ của dây mềm, dễ gây dao động khi tăng hệ số khuếch đại, trong khi điều khiển trượt ít bị ảnh hưởng do cơ chế ràng buộc quỹ đạo trong không gian trạng thái. Kết quả trong Hình 4b cho thấy, khi tăng các thông số điều khiển lên $\lambda = 10$; $k = 4$ và $\lambda = 25$; $k = 10$, sai số giảm đáng kể, với biên độ dao động lần lượt là 0.01 rad và 0.005 rad. Điều này chứng minh việc tăng thông số điều khiển giúp cải thiện khả năng bám theo và tăng độ kháng nhiễu của hệ thống. Tuy nhiên, nếu các thông số này vượt quá ngưỡng phù hợp, hệ thống có thể mất ổn định.

Kết quả này khẳng định ưu điểm của điều khiển trượt đối với hệ truyền động dây mềm có đặc tính phi tuyến và trễ lớn, đặc biệt trong môi trường thực tế nơi thông số hệ và tải có thể thay đổi bất định.

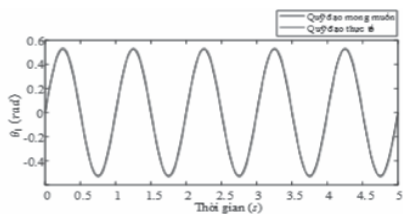


a) Quỹ đạo mong muốn và thực tế

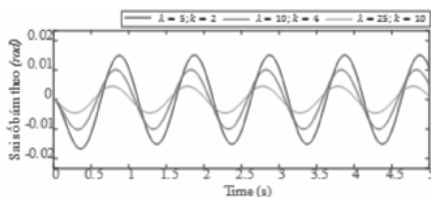


b) Sai số bám theo

Hình 3. Điều khiển bám theo quỹ đạo mong muốn sử dụng thuật toán PID



a) Quỹ đạo mong muốn và thực tế



b) Sai số bám theo với các thông số điều khiển khác nhau

Hình 4. Điều khiển bám theo quỹ đạo mong muốn sử dụng thuật toán điều khiển trượt

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-

HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số TX2025-20b-01. Chúng tôi xin cảm ơn Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và Kỹ thuật Hệ thống, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**

Ngày phản biện: **20/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Usman et al., "Modeling of flexible shaft for robotics applications". Mechanism and Machine Theory, vol. 197, p. 105647, 2024.
- [2]. M. Usman et al., "Flexible shaft as remote and elastic transmission for robot arms". IEEE Robotics Automation Letters, vol. 9, no. 5, pp. 4790-4797, 2024.
- [3]. R. Hayashi, K. Nicho, Y. Yu, T. Kinugasa, and H. Amano, "Small search robot consisting of plural driving wheels connected by flexible shafts". Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 26, no. 4, pp. 469-476, 2014.
- [4]. E. Tanaka, K. Muramatsu, K. Watanuki, S. Saegusa, and L. Yuge, "Walking assistance apparatus enabled for neuro-rehabilitation of patients and its effectiveness". Mechanical Engineering Letters, vol. 1, no. 0, pp. 15-00530, 2015.
- [5]. H. F. N. Al-Shuka, B. Corves, and E. N. Abbas, "Cascade position-torque control strategy based on function approximation technique (FAT) for flexible joint robots". In AIP Conference Proceedings, vol. 2651, no. 1, Mar. 2023.
- [6]. P. Korondi, H. Hashimoto, and V. Utkin, "Direct torsion control of flexible shaft in an observer-based discrete-time sliding mode". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 2, pp. 291-296, 1998.
- [7]. M. Salehian, S. Sattarzadeh, H. A. Talebi, M. Bayat, and A. Asehabi, "Vibration suppression of a flexible shaft system using indirect adaptive control". In 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation, pp. 301-306, 2014.
- [8]. D. Rodriguez-Cianca, C. Rodriguez-Guerrero, T. Verstraten, R. Jimenez-Fabian, B. Vanderborght, and D. Lefeber, "A flexible shaft-driven remote and torsionally compliant actuator (RTCA) for wearable robots". Mechatronics, vol. 59, pp. 178-188, 2019.