

DOI:10.22144/ctu.jvn.2023.028

ĐIỀU KHIỂN VỊ TRÍ CƠ NHÂN TẠO KHÍ NÉN SỬ DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID

Trần Vĩnh Phúc¹, Nguyễn Thị Hoàng Trâm², Ngô Hiếu Nghĩa¹, Nguyễn Minh Khải¹, Nguyễn Chí Ngôn² và Nguyễn Chánh Nghiệm^{2*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

²Trường Đại học Cần Thơ

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Chánh Nghiệm (email: ncnghiem@ctu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 31/10/2022

Ngày nhận bài sửa: 16/11/2022

Ngày duyệt đăng: 28/11/2022

Title:

Position control of a pneumatic artificial muscle using a PID controller

Từ khóa:

Cơ nhân tạo khí nén, bộ điều khiển PID

Keywords:

Pneumatic artificial muscle, PID controller

ABSTRACT

This paper presents the potential of using a classical PID controller for the position control of a pneumatic artificial muscle (PAM). An experimental model was developed to demonstrate the feasibility of the proposed controller. The control algorithm was implemented on the MATLAB/Simulink software through the TI C2000 real-time embedded control circuit to control the inlet/outlet air pressure of the pneumatic artificial muscle, thereby controlling the muscle position. Experiments with a position reference command of about 65% of the maximal PAM contraction under a 25-kg payload showed acceptable transient response with a steady-state error of about ± 0.35 mm (i.e., $\pm 1.5\%$ reference input), insignificant overshoot, and a settling time of 1 s. Therefore, the classical PID controller can be implemented for position control of a PAM if no strict requirements are expected for the transient response. These preliminary results also show the potential of future studies in improving the controller's performance, particularly the settling time.

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày khả năng sử dụng bộ điều khiển kinh điển PID để điều khiển vị trí cơ nhân tạo khí nén (PAM). Mô hình thực nghiệm được thiết lập nhằm chứng minh tính khả thi của bộ điều khiển đề xuất. Thuật toán điều khiển được thực hiện trên phần mềm MATLAB/Simulink thông qua mạch điều khiển nhúng thời gian thực TI C2000 để điều khiển áp suất không khí vào/ra cơ nhân tạo khí nén với bộ điều khiển PI, từ đó điều khiển vị trí PAM với bộ điều khiển PID. Thực nghiệm điều khiển vị trí của bộ điều khiển PID với giá trị đặt là 65%, khoảng dịch chuyển tối đa của PAM khi sử dụng vật nặng có khối lượng 25 kg cho kết quả khá tốt với sai số $\pm 0,35$ mm (tương ứng $\pm 1,5\%$ giá trị đặt), độ vọt lố không đáng kể và thời gian xác lập là 1 giây. Như vậy, bộ điều khiển kinh điển PID có thể dùng để điều khiển vị trí PAM khi không có yêu cầu khắc khe về đáp ứng quá độ. Kết quả ban đầu cũng cho thấy khả năng cải thiện chất lượng điều khiển, đặc biệt đối với chỉ tiêu về thời gian xác lập trong các nghiên cứu tiếp theo.

1. GIỚI THIỆU

Thiết bị truyền động cơ nhân tạo khí nén (PAM) cho thấy tiềm năng to lớn trong lĩnh vực người máy (Robinson et al., 2015) và thiết bị phục hồi chức năng (Hussain et al., 2017; Merola et al., 2018) do sự nổi bật về đặc tính tỉ lệ lực/khối lượng và momen xoắn/khối lượng cao (Hunter et al., 1991; Hannaford et al., 1995; Plettenburg, 2005). PAM gồm ba thành phần chính: sợi bên ngoài, bóng cao su bên trong, nắp đậy và công nạp/xả khí. Khi cấp khí vào PAM thì PAM sẽ co lại, đường kính tăng lên và chiều dài giảm xuống từ đó sinh ra lực kéo dọc trục. Ngược lại, khi khí nén được xả, PAM sẽ giãn ra và dần trở lại trạng thái ban đầu. Lực co và chiều dài PAM phụ thuộc vào áp suất cấp vào bên trong PAM (Sarosi et al., 2015; Felt et al., 2016; Doumit & Pardoel, 2017).

Mặc dù có nhiều đặc tính có lợi, nhưng PAM có độ phi tuyến cao (Ching-Ping Chou & Hannaford, 1996; Klute & Hannaford, 2000; Bertrand Tondu & Lopez, 2000; B. Tondu et al., 2005) và có hiện tượng trễ (S. L. Xie et al., 2020; Shakiba et al., 2021; Al Saaideh & Al Janaideh, 2022) nên điều khiển vị trí PAM gặp nhiều khó khăn. Nhiều công trình nghiên cứu đã đề xuất giải pháp cho vấn đề kiểm soát vị trí PAM. Một trong những giải pháp chính là bù đắp động lực thông qua bù áp suất tác động lên PAM để giảm thiểu ảnh hưởng của hiện tượng trễ. Các kết quả mô phỏng và chứng minh bởi lý thuyết dựa trên Lyapunov được trình bày trong một số nghiên cứu đã cho thấy tính khả thi của nhóm giải pháp này (Liu et al., 2017; S.L. Xie et al., 2018; Ai et al., 2019). Tuy nhiên, việc xác định chính xác lực trễ cần bù tạo thêm vấn đề khác cần nghiên cứu. Một giải pháp khả thi khác là tập trung thiết kế bộ điều khiển đủ khả năng thích ứng với hiện tượng phi tuyến của hệ PAM. Với khả năng đáp ứng nhanh và có tính bền vững, bộ điều khiển khiển trượt đã được thiết kế để điều khiển hệ PAM (Zhao et al., 2019; Lin et al., 2021). Tuy nhiên, phát triển bộ điều khiển này cũng cần có mô hình toán của hệ thống. Gần đây, bộ điều khiển dựa trên mạng thần kinh nhân tạo cũng được phát triển và cho thấy có khả năng cải thiện thời gian quá độ và độ chính xác cao (Chavoshian et al., 2020; Zhang et al., 2021) nhưng đòi hỏi phần cứng có năng lực tính toán cao để có thể triển khai bộ điều khiển trong điều kiện thời gian thực. Có thể thấy rằng các nghiên cứu trước đây đa phần yêu cầu mô hình toán của hệ PAM hoặc hiện tượng trễ, gây khó khăn trong việc triển khai các hệ thống thực tế với các thiết lập đa dạng và nhiều yếu tố ảnh hưởng khác nhau.

Nghiên cứu này đề xuất sử dụng bộ điều khiển kinh điển PID để kiểm soát vị trí PAM nhằm đánh giá khả năng ứng dụng PAM trong các trường hợp không yêu cầu khắc khe về đáp ứng quá độ. Kết quả nghiên cứu cũng là nền tảng so sánh cho các bộ điều khiển có độ phức tạp cao hơn khi có xem xét đến tính bền vững hay thích nghi của bộ điều khiển. Vì thế, bộ điều khiển PID được thiết kế để kiểm soát vị trí của PAM và một bộ điều khiển PI được sử dụng để kiểm soát áp suất trong PAM. Phần còn lại của bài báo được sắp xếp như sau. Phần 2 mô tả phương pháp nghiên cứu được mô tả. Phần 3 trình bày kết quả nghiên cứu và thảo luận. Kết luận của nghiên cứu được trình bày ở phần 4.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết bị thực nghiệm

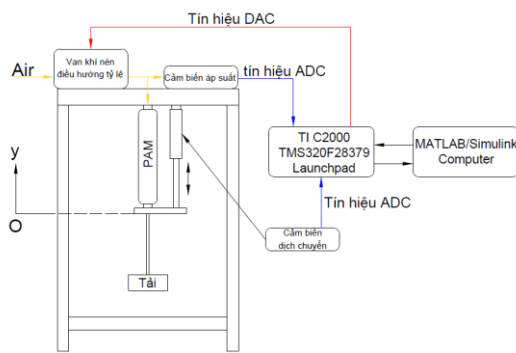
Việc thực nghiệm được tiến hành trên PAM của hãng FESTO (loại MAS-20-200N), có đường kính 20 mm và chiều dài 200 mm khi ở trạng thái ban đầu. Dựa trên datasheet được cung cấp từ FESTO, PAM có thể co dãn đa 25% so với chiều dài ban đầu ở áp suất 6 bar (Festo, 2007). Thực nghiệm cho thấy PAM di chuyển tối đa 36 mm (tương đương 100% khoảng cách dịch chuyển) ở áp suất 6 bar khi treo tải 25 kg. Độ dịch chuyển được đo bằng cảm biến khoảng cách KTC của hãng Accuracy™ có khoảng đo từ 0-100 mm và áp suất bên trong PAM được đo bằng cảm biến áp suất SR13002A có dãy đo từ 0-10 bar của hãng GeorGIN. Khí nén được cung cấp thông qua van tỉ lệ điều hướng 5/3 (FESTO loại MPYE-5-1/8-HF-101B). Các thuật toán điều khiển và đo lường được thực hiện dựa trên phần mềm MATLAB/Simulink. Bộ vi điều khiển Texas Instruments C2000 (loại TMS320F28379D LaunchPAD) giao tiếp với máy tính sử dụng giao thức UART thông qua kết nối USB để truyền nhận các dữ liệu I/O. Mô hình tổng quát và mô hình thực nghiệm được triển khai được mô tả ở Hình 1.

2.2. Bộ điều khiển

Hình 2 trình bày sơ đồ khối của hệ điều khiển với hai vòng điều khiển. Vòng điều khiển bên trong sử dụng bộ điều khiển PI để kiểm soát áp suất, đảm bảo cho việc kiểm soát vị trí PAM bằng bộ điều khiển PID ở vòng điều khiển bên ngoài. Tín hiệu ra của bộ điều khiển vị trí là khoảng cách dịch chuyển (%) sẽ được chuyển đổi thành tín hiệu vào của bộ điều khiển áp suất thông qua khối độ lợi $K_{cd} = 6/100$. Điều này có nghĩa là với tín hiệu ra của bộ điều khiển vị trí là 100% thì áp suất cung cấp cho PAM là 6 bar.

2.2.1. Bộ điều khiển PI cho áp suất

Trong trường hợp đối tượng điều khiển là tuyến tính, thiết kế bộ điều khiển tỉ lệ P cho van điều hướng có thể đủ để kiểm soát áp suất cho PAM. Tuy nhiên, áp suất trong PAM không chỉ phụ thuộc vào tính phi tuyến của lưu lượng khí đi qua van điều hướng mà còn phụ thuộc vào sự thay đổi thể tích, nhiệt độ không khí và sự rò rỉ không khí qua van. Do đó, thành phần I được thêm vào để loại bỏ các trạng thái không ổn định. Bằng cách thử sai, thông số của bộ điều khiển PI được xác định là $K_P = 0,9$ và $K_I = 6,0$. Bộ điều khiển PI thiết kế để kiểm soát áp suất được giữ không đổi trong tất cả các thực nghiệm của nghiên cứu.

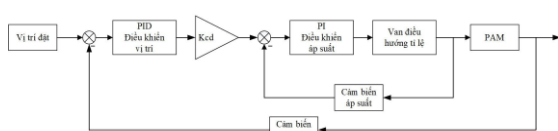


a)



b)

Hình 1. Mô hình (a) tổng quát và (b) thực nghiệm



Hình 2. Sơ đồ khối hệ điều khiển

2.2.2. Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID ở vòng ngoài được thiết kế cho mục đích kiểm soát vị trí PAM thông qua phần

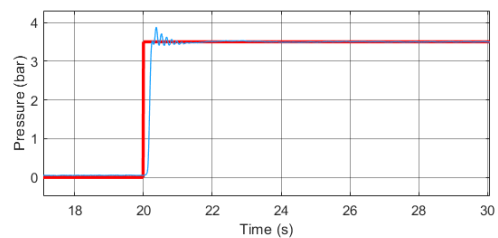
mềm MATLAB/Simulink. Các hệ số K_P , K_I , K_D của bộ điều khiển được tìm với phương pháp Ziegler-Nichols và phương pháp thử sai.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

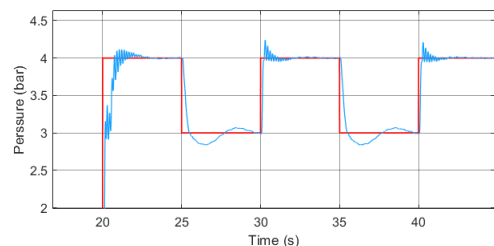
Thí nghiệm điều khiển vị trí PAM được thực hiện với tín hiệu vào là hàm nấc với vị trí đặt là 65% khoảng dịch chuyển tối đa của PAM (tương ứng với khoảng cách 23 mm), vật nặng được sử dụng có khối lượng 25 kg.

3.1. Đáp ứng áp suất của van khí nén

Để đánh giá khả năng kiểm soát áp suất của bộ điều khiển PI, đáp ứng áp suất của van khí nén với hai tín hiệu đầu vào khác nhau là hàm nấc (Hình 3) và xung vuông có tần số 0,1 Hz (Hình 4) được khảo sát. Biên độ hàm nấc và giá trị trung bình của xung vuông được chọn là 3,5 bar là giá trị trung bình của khoảng áp suất hiệu dụng (từ 1-6 bar) của đối tượng PAM được chọn. Kết quả thực nghiệm cho thấy thời gian xác lập (tiêu chuẩn 2%) đối với tín hiệu điều khiển là hàm nấc và xung vuông lần lượt vào khoảng 0,5 và 1,5 giây, độ vọt lố khoảng 0,3 bar. Kết quả này có thể chấp nhận được để tiến hành xây dựng bộ điều khiển vị trí ở vòng ngoài. Bên cạnh đó, đáp ứng cạnh xuống chậm hơn đáp ứng cạnh lên là do phụ thuộc vào tác động của tải trọng vật treo. Vật treo có tải trọng lớn hơn thì đáp ứng của cạnh xuống sẽ nhanh hơn.



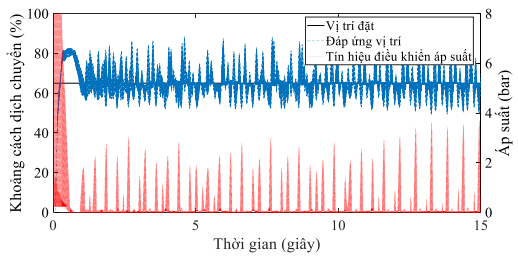
Hình 3. Đáp ứng áp suất với tín hiệu điều khiển là hàm nấc



Hình 4. Đáp ứng áp suất với tín hiệu điều khiển là xung vuông

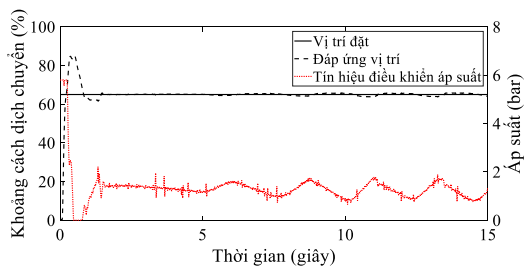
3.2. Đáp ứng của bộ điều khiển vị trí

Để khẳng định sự cần thiết của việc điều khiển áp suất qua van khí nén bởi điều khiển PI được trình bày ở mục 3.1, nghiên cứu đã thực hiện khảo sát điều khiển vị trí với bộ điều khiển PID khi không áp dụng bộ điều khiển PI kiểm soát áp suất van khí nén. Áp dụng phương pháp Ziegler–Nichols, từ hệ số thực nghiệm với đáp ứng vòng kín $K_{gh} = 6$ và $T_{gh} = 0,204$, giá trị độ lợi của bộ điều khiển PID tìm được là $K_P = 3,6$; $K_I = 35,39$ và $K_D = 0,09$. Đáp ứng vị trí của PAM với tín hiệu điều khiển là 65% khoảng cách dịch chuyển tối đa của PAM không ổn định khi không điều khiển áp suất qua van khí nén (Hình 5). Điều đó cho thấy sự cần thiết của việc điều khiển áp suất qua van khí nén.



Hình 5. Đáp ứng vị trí của bộ điều khiển PID khi không điều khiển áp suất qua van khí nén

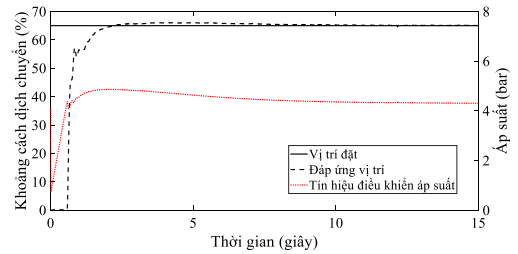
Hình 6 trình bày đáp ứng vị trí của PAM khi có điều khiển áp suất qua van khí nén sử dụng bộ điều khiển vị trí PID có độ lợi là $K_P = 3,6$; $K_I = 35,39$ và $K_D = 0,09$. Kết quả cho thấy sai số xác lập của đáp ứng vị trí là $\pm 4\%$ giá trị đặt (tương ứng là $\pm 0,92$ mm), thời gian xác lập là 2 giây, độ vọt lố lên đến 53,8%.



Hình 6. Đáp ứng điều khiển vị trí với các độ lợi của bộ điều khiển PID tìm bằng phương pháp Ziegler–Nichols

Thực hiện thử nghiệm tìm thông số bộ điều khiển vị trí bằng phương pháp thử sai, các thông số độ lợi phù hợp tìm được là $K_P = 0,12$; $K_I = 1,10$ và $K_D =$

6,0. Đáp ứng nấc với vị trí đặt là 65% khoảng cách dịch chuyển tối đa của PAM được trình bày ở Hình 7 cho thấy thời gian xác lập của tín hiệu là 1 giây, sai số xác lập $\pm 1,5\%$ giá trị đặt (tương ứng là $\pm 0,35$ mm) và độ vọt lố không đáng kể. Đáp ứng cũng cho thấy hệ thống bị trễ, tuy nhiên hệ thống không bị vọt lố và thời gian xác lập ngắn hơn 1 giây so với trường hợp độ lợi của bộ điều khiển được xác định bằng phương pháp Ziegler–Nichols.



Hình 7. Đáp ứng điều khiển vị trí với các độ lợi của bộ điều khiển PID tìm bằng phương pháp thử sai

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện thành công điều khiển vị trí cơ nhân tạo khí nén sử dụng bộ điều khiển PID là bộ điều khiển thông dụng trong công nghiệp. Kết quả thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển PI cho van khí nén để kiểm soát áp suất cấp cho PAM cần được áp dụng đồng thời với bộ điều khiển vị trí PID. Các giá trị độ lợi của bộ điều khiển vị trí tìm bằng phương pháp thử sai cho kết quả tốt hơn phương pháp Ziegler–Nichols. Đáp ứng của hệ thống với tín hiệu đặt bằng 65% khả năng dịch chuyển của PAM có thời gian xác lập chỉ 1 giây, sai số $\pm 0,35$ mm (tương ứng $\pm 1,5\%$ giá trị đặt) và độ vọt lố không đáng kể. Như vậy, bộ điều khiển kinh điển PID có thể được sử dụng hiệu quả để kiểm soát vị trí PAM trong các ứng dụng PAM mà không có yêu cầu khắc khe về đáp ứng quá độ. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy khả năng ứng dụng hoặc kết hợp các bộ điều khiển thông minh để cải thiện đáp ứng của hệ thống, đồng thời là cơ sở đối sánh chất lượng điều khiển cho các nghiên cứu tương lai khi có xem xét đến tính bền vững hay thích nghi của bộ điều khiển.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ kinh phí một phần bởi trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường, mã số MS.2021.CK.57.SV.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Al Saaideh, M., & Al Janaideh, M. (2022). On Prandtl–Ishlinskii Hysteresis Modeling of a Loaded Pneumatic Artificial Muscle. *ASME Letters in Dynamic Systems and Control*, 2(3), 1–12. <https://doi.org/10.1115/1.4054779>
- Ching-Ping Chou, & Hannaford, B. (1996). Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 90–102. <https://doi.org/10.1109/70.481753>
- Doumit, M. D., & Pardoel, S. (2017). Dynamic contraction behaviour of pneumatic artificial muscle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, 93–110. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.01.001>
- Felt, W., Chin, K. Y., & Remy, C. D. (2016). Contraction Sensing with Smart Braid McKibben Muscles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(3), 1201–1209. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2493782>
- Festo, A. (2007). Fluidic Muscle DMSP. In *MAS, Operation instructions, FESTO, Esslingen, ...*
- Hannaford, B., Winters, J. M., Chou, C. P., & Marbot, P. H. (1995). The anthropomorphic biorobotic arm: A system for the study of spinal circuits. *Annals of Biomedical Engineering*, 23(4), 399–408. <https://doi.org/10.1007/BF02584440>
- Hunter, I., Ballantyne, J., & Hollerbach, J. M. (1991). A comparative analysis of actuator technologies for robotics. *The Robotics Review* 2, 2, 299–342. http://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/4/43/Hollerbach_Hunter_Ballantyne_1992_A_Comparative_Analysis_of_Actuator_Technologies_for_Robotics.pdf
- Hussain, S., Jamwal, P. K., Ghayesh, M. H., & Xie, S. Q. (2017). Assist-as-Needed Control of an Intrinsically Compliant Robotic Gait Training Orthosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 1675–1685. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2580123>
- Klute, G. K., & Hannaford, B. (2000). Accounting for elastic energy storage in mckibben artificial muscle actuators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 122(2), 386–388. <https://doi.org/10.1115/1.482478>
- Liu, Y., Zang, X., Lin, Z., Liu, X., & Zhao, J. (2017). Modelling length/pressure hysteresis of a pneumatic artificial muscle using a modified Prandtl-Ishlinskii model. *Journal of Mechanical Engineering*, 63(1), 56–64. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.4027>
- Merola, A., Colacino, D., Cosentino, C., & Amato, F. (2018). Model-based tracking control design, implementation of embedded digital controller and testing of a biomechatronic device for robotic rehabilitation. *Mechatronics*, 52(February), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.04.006>
- Plettenburg, D. H. (2005). Pneumatic actuators: a comparison of energy-to-mass ratio's. *9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005.*, 2005, 545–549. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1502022>
- Robinson, R. M., Kothera, C. S., & Wereley, N. M. (2015). Variable Recruitment Testing of Pneumatic Artificial Muscles for Robotic Manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4), 1642–1652. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2341660>
- Sarosi, J., Biro, I., Nemeth, J., & Cveticanin, L. (2015). Dynamic modeling of a pneumatic muscle actuator with two-direction motion. *Mechanism and Machine Theory*, 85, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.006>
- Shakiba, S., Ourak, M., Poorten, E. Vander, Ayati, M., & Yousefi-Koma, A. (2021). Modeling and compensation of asymmetric rate-dependent hysteresis of a miniature pneumatic artificial muscle-based catheter. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 154, 107532. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107532>
- Tondu, B., Ippolito, S., Guiochet, J., & Daidie, A. (2005). A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles for Humanoid Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 24(4), 257–274. <https://doi.org/10.1177/0278364905052437>
- Tondu, Bertrand, & Lopez, P. (2000). Modeling and Control of McKibben Artificial Muscle Robot Actuators. *IEEE Control Systems*, 20(2), 15–38. <https://doi.org/10.1109/37.833638>
- Xie, S. L., Liu, H. T., & Wang, Y. (2020). A method for the length-pressure hysteresis modeling of pneumatic artificial muscles. *Science China Technological Sciences*, 63(5), 829–837. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-9554-y>
- Zhang, Y., Liu, H., Ma, T., Hao, L., & Li, Z. (2021). A comprehensive dynamic model for pneumatic artificial muscles considering different input frequencies and mechanical loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 148, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107133>
- Zhao, W., Song, A., & Cao, Y. (2019). An extended proxy-based sliding mode control of pneumatic muscle actuators. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(8), 1571. <https://doi.org/10.3390/app9081571>