

THIẾT KẾ KHUNG XƯƠNG ROBOT PHỤC HỒI CHỨC NĂNG CHO CHÂN SỬ DỤNG CƠ CẤU KHÍ NÉN

DESIGN AND DEVELOPMENT THE EXOSKELETON ROBOT FOR LOWER LIMB REHABILITATION USING PNEUMATIC ACTUATOR

Trần Văn Thực¹, Nguyễn Hà Vũ^{1,2}, Vũ Tiến Dũng^{1,*}

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

²Viện Nghiên cứu Cơ khí

TÓM TẮT

Ngày nay, có rất nhiều người mất chức năng đi lại do chịu ảnh hưởng của chấn thương cột sống, đột quỵ, hoặc chấn thương sọ não do tai nạn. Việc phục hồi chức năng vận động đòi hỏi nhiều công sức, do đó việc ứng dụng robot trong việc phục hồi chức năng là vô cùng cần thiết. Bài báo trình bày thiết kế cơ cấu khung xương robot phục hồi chức năng đi lại sử dụng cơ cấu xy lanh khí nén. Kết quả cho thấy, với yêu cầu cao trong y sinh với môi trường sạch, cơ cấu robot phục hồi chức năng sử dụng xy lanh khí nén có tiềm năng và thỏa mãn các yêu cầu của thiết bị phục hồi chức năng.

Từ khóa: Robot phục hồi chức năng; Xylanh khí nén; Mô hình hóa; Hệ thống chăm sóc sức khỏe.

ABSTRACT

Many people nowadays lose locomotor functionality due to an accident or spinal cord injury, stroke, or traumatic injury. Lower limb rehabilitation commonly requires much labor cost, therefore, the implementation of robots in gait rehabilitation is necessary to help people with their daily duties. This study introduced an exoskeleton design based on a pneumatic cylinder for a lower limb rehabilitation robot. The results showed that, with the requirement of a clean environment in healthcare, the pneumatic gait training robot had the potential and satisfied utilized the gait rehabilitation device.

Keywords: Gait rehabilitation robot; Pneumatic cylinder; Modelling; Heal-care system. 

1. GIỚI THIỆU

Liệt nửa người và các tổn thương vận động thường là kết quả của chấn thương cột sống hoặc đột quỵ. Theo thống kê của Trung tâm Thống kê Quốc gia về Chấn thương Cột sống Hoa Kỳ, số người sống chung với chấn thương cột sống ở Mỹ xấp xỉ 291.000 người (trong khoảng 249.000 đến 363.000 người), số trường hợp chấn thương mới lên đến hơn 17.000 người (tương đương với 54 ca/triệu người) mỗi năm. Còn tại Việt Nam, mỗi năm có hơn 200.000 người mắc các bệnh về tai biến, hơn 50% trong số đó tử vong và 90% những người sống sót phải sống chung với các di chứng về thần kinh và vận động. Có một điều đáng lưu ý rằng, số người trẻ mắc bệnh này cũng ngày càng tăng. Các hệ thống phục hồi chức năng vận động là vô cùng cần thiết tác động đến chất lượng cuộc sống của người bệnh, giúp người bệnh hòa nhập cộng đồng [1].

Nghiên cứu gần đây đã chứng minh rằng, các hoạt động lặp đi lặp lại của robot khung xương hỗ trợ theo nhiệm vụ vận động cụ thể có thể giúp cải thiện các hạn chế về khả năng vận động của người bệnh dẫn đến cải thiện đáng kể chất lượng cuộc sống [2]. Nhiều loại thiết bị đang được phát triển để hỗ trợ quá trình phục hồi chức năng. Hầu hết các hệ thống có tiếp xúc trực tiếp với bệnh nhân và do đó phụ thuộc rất nhiều vào thiết kế thoải mái được quyết định bởi hình thức và chức năng của robot. Điều quan trọng là phải xem xét sự an toàn khi tương tác với robot phục hồi chức năng và bệnh nhân. Có thể duy trì tương tác an toàn bằng cách điều khiển các bộ truyền động, hoặc bằng cách sử dụng các bộ truyền động an toàn để tránh các lực không mong muốn do hoạt động của robot tạo ra. Ngoài ra, các nguồn động lực sử dụng trong phục hồi chức năng phải phù hợp với các yêu cầu khắt khe về y tế.

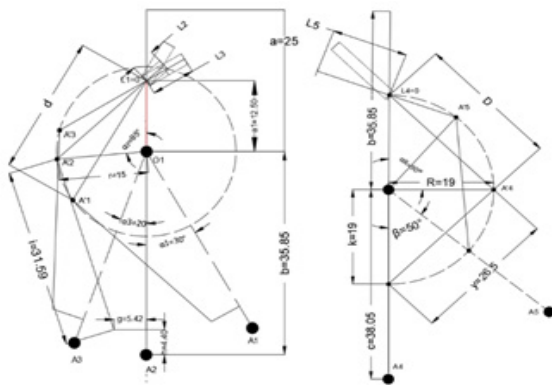
Thiết bị truyền động khí nén là một giải pháp khả thi để tăng độ an toàn cho hoạt động của robot. Cơ cấu khí nén phổ biến nhất là cơ nhân tạo McKibben được tạo thành từ hai thành phần chính bịt kín ở hai đầu: lớp vỏ bên ngoài làm bằng lưới nylon và các ống cao su bên trong [3]. Bộ truyền động cơ nhân tạo có một số ưu điểm như tỷ lệ công suất/khối lượng rất cao, cơ chế linh hoạt nên dễ dàng ứng dụng trong các thiết bị y sinh và phục hồi chức năng. Tuy nhiên, hệ thống phục hồi chức năng sử dụng cơ nhân tạo có một số nhược điểm lớn như: độ tin cậy kém, cơ truyền động có tính phi tuyến mạnh nên khó điều khiển.

Bộ truyền động xylanh khí nén có ưu điểm vượt trội về độ ổn định và độ tin cậy so với cơ nhân tạo. Ưu điểm của cơ cấu xylanh khí nén là có khả năng tác động nhanh chóng [4], dễ bảo trì, an toàn, sạch sẽ và cơ chế vận hành đơn giản [5, 6]. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã trình bày một thiết kế khung xương ngoài mới cho robot phục hồi chức năng chi dưới sử dụng xylanh khí nén. Hệ thống robot đề xuất sử dụng xylanh khí nén đã được mô hình hóa bằng cách sử dụng mô hình năng lượng. Hệ thống điều khiển vòng hở và vòng kín đơn giản được mô phỏng và so sánh.

2. THIẾT KẾ HỆ THỐNG

Cơ cấu robot được thiết kế dựa trên mối tương quan giữa chuyển động dáng đi và động học góc của chân người [7, 8] đồng thời tính đến yếu tố nhân trắc học phù hợp với vóc dáng người Việt Nam. Theo nghiên cứu nhân trắc học người Việt Nam (năm 2022) [9], đối với người trưởng thành có chiều cao trung bình là $159,5 \pm 5,3$ cm và trọng lượng trung bình $55 \pm 7,75$ kg thì chiều dài chân và cân nặng trung bình của người Việt Nam vào khoảng 84 cm. Winter et.al chỉ ra rằng các đoạn chân người có thể được tính toán dựa trên chiều cao hoặc chiều dài chân của con người [10].

Trong nghiên cứu này, các kích thước cơ bản của robot phục hồi chức năng chỉ dưới được chọn như trong Hình 1-a, nhưng có thể điều chỉnh được. Trong Hình 1-b là robot được chế tạo hoàn chỉnh với cơ cấu chấp hành là xylanh khí nén gá lắp trên thân robot. Xương đùi là xương kéo dài từ hông đến khớp gối và có góc hoạt động gấp là $\alpha = (\alpha_3; \alpha_1) = (20^\circ; 30^\circ)$. Đoạn từ khớp gối đến mắt cá chân dài 38,05cm và góc hoạt động gấp là $\beta = (\beta_1; \beta_2) = (0^\circ; -50^\circ)$. Đối với thiết kế, cơ cấu song song được áp dụng với cơ cấu xylanh khí nén được sử dụng để dẫn động toàn bộ hệ đạt được các góc hoạt động gấp theo yêu cầu. Vị trí gá đặt được tính toán tối ưu về lực sinh cũng như hành trình phù hợp của xylanh.



a) Mô hình tính toán và kích thước sơ bộ khâu khớp

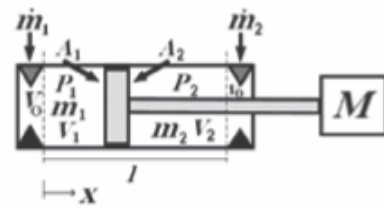


b) Khung xương robot

Hình 1. Mô hình đã tính toán chiều dài và kích thước gần đúng của khớp hông và khớp gối của robot phục hồi chức năng chỉ dưới.

3. MÔ HÌNH HÓA

Phương pháp phân tích năng lượng được sử dụng để xây dựng mô hình cơ cấu chấp hành. Ở đây, động năng và thế năng trong các buồng làm việc của xylanh được tính toán, sử dụng phương trình Euler-Lagrange để thu được phương trình chuyển động thích hợp. Mô hình tính đối với xylanh cho trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình xylanh khí nén với tải M đặt trên piston, A_1 và A_2 là các tiết diện của piston, m_1 và m_2 là khối lượng khí trong mỗi buồng, V_1 và V_2 là thể tích làm việc của mỗi buồng.

Mô hình không gian trạng thái của hệ piston-xylanh khí nén cho trong phương trình 1:

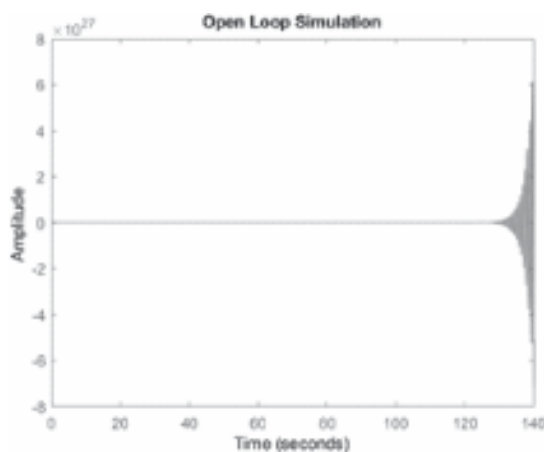
$$f(x) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{1}{M} \zeta \\ \left(\frac{\beta_1}{x_1} - \frac{\alpha_2}{l-x_1} - x_2 \left(\frac{m_1}{x_1^2} - \frac{m_2}{(l-x_1)^2} \right) \right) RT \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -RT \left(\frac{\alpha_1}{x_1} - \frac{\alpha_2}{l-x_1} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Trong đó, ζ là thế năng sinh ra trong buồng, α_i và β_i với $i = 1, 2$ là các hệ số tính toán phụ thuộc vào biến thiên khối lượng của khối không khí trong mỗi buồng xylanh [11].

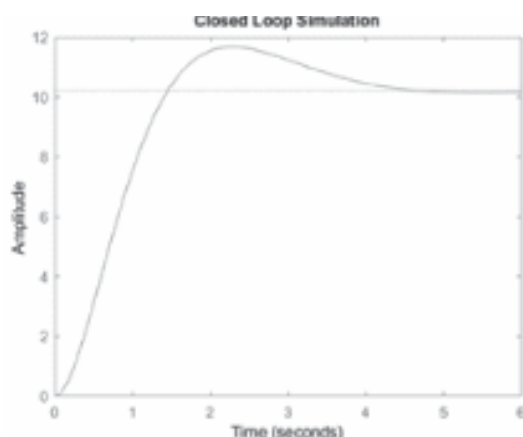
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả mô phỏng được thể hiện trong Hình 3. Các biến trạng thái x_1 và x_2 đạt đến điểm cân bằng trong khoảng 1,2 giây, trong khi thế năng ζ của hệ đạt đến điểm cân bằng trong khoảng 3 giây. Theo đó, mô hình hệ thống mở thể không ổn định. Mô phỏng hệ thống vòng kín ổn định với chiến lược điều khiển sử dụng phương pháp gần điểm cực. Thí nghiệm được

thiết lập bằng Arduino Uno dựa trên vi xử lý Microchip ATmega328P. Van điều khiển là van lưu lượng tuyến tính tỷ lệ (MPYE-5-1/8-hf-010-b được Festo chế tạo) được sử dụng để tạo ra tốc độ dòng khí mong muốn với dải điện áp 0-10V. Trên Hình 5, dữ liệu thô thực tế của khớp gối đã được hiển thị. Ta có thể thấy, chiến lược điều khiển đã thành công tạo ra quỹ đạo khớp yêu cầu của khớp gối. Kết quả cho thấy, tiềm năng ứng dụng của thiết kế cơ học và thiết kế hệ thống điều khiển trong robot phục hồi chức năng chi dưới.

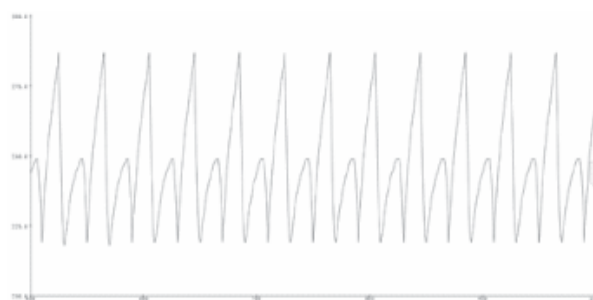


a) Kết quả mô phỏng với hệ hở.



b) Kết quả mô phỏng với hệ kín có điều khiển phản hồi.

Hình 3. Kết quả mô phỏng hệ điều khiển cơ cấu khí nén sử dụng trong robot phục hồi chức năng cho chi dưới.



Hình 4. Dữ liệu thực nghiệm trên robot với khớp gối.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này mô tả thiết kế cơ cấu cơ, mô hình toán học và thiết kế hệ thống điều khiển cho cơ cấu khung xương ngoài phục vụ cho robot phục hồi chức năng chi dưới. Kết quả thí nghiệm cho thấy tiềm năng ứng dụng của thiết kế cơ khí mới và thiết kế hệ thống điều khiển khí nén ứng dụng trong robot phục hồi chức năng chi dưới. Trong tương lai, sau khi hoàn thành việc thiết kế hệ thống điều khiển toàn diện cho tất cả khâu khớp, nhóm tác giả sẽ tiến hành so sánh kết quả của mô hình mô phỏng và kết quả thực nghiệm của toàn bộ hệ thống thực tế.

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng Thí nghiệm Nhà máy Số thông minh, Đại học Bách Khoa Hà Nội đã cung cấp các giải pháp phần cứng và phần mềm để thực hiện kết quả trong bài báo này.

Ngày nhận bài: **15/5/2023**

Ngày phản biện: **05/6/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Cardol, M., et al.; *On autonomy and participation in rehabilitation*. 2002, 24(18): p. 970-974.

- [2]. Mazzoleni, S., et al.; *An integrated gait rehabilitation training based on Functional Electrical Stimulation cycling and overground robotic exoskeleton in complete spinal cord injury patients: Preliminary results*. In 2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2017, IEEE.
- [3]. Van Thuc T, Yamamoto S.; *Development of a body weight support system using pneumatic muscle actuators: Controlling and validation*. Advances in Mechanical Engineering, 2016;8(12).
- [4]. Wang, J., et al.; *Identification of pneumatic cylinder friction parameters using genetic algorithms*. 2004, 9(1): p. 100-107.
- [5]. Soleymani, F., et al.; *Position control of a servo-pneumatic actuator with mis-matched uncertainty using multiple-surface sliding mode controller and high-gain observer*. 2017, 39(10): p. 1497-1508.
- [6]. Cherrid, H., et al.; *Sliding mode observer based controller for a robot with pneumatic actuators*. In ECPD, International conference on advanced robotics, intelligent automation and active systems, Moscou, 1998.
- [7]. Whittle, M.W.; *Gait analysis: an introduction*. 2014: Butterworth-Heinemann.
- [8]. Elhafez, S.M., et al.; *Percentage Contribution of Lower Limb Moments to Vertical Ground Reaction Force in Normal Gait*. Journal of Chiropractic Medicine, 2019. 18(2): p. 90-96.
- [9]. *Survey results of some anthropometric indicators (static indicators) of Vietnamese people of working age in the current period – Institute of Occupational Safety and Health*, http://vnniosh.vn/chitiet_NCKH/id/31322/
- [10]. Winter, D.A.; *Bio-mechanics and motor control of human movement*. 2009: John Wiley & Sons.
- [11]. Zisser, E., et al.; *Position control of a pneumatic actuator under varying external force*. 2018, 22(4): p. 1157-1174.