

MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG ĐỘNG HỌC CỦA NGÓN TAY GIẢ ĐEO ĐƯỢC ĐIỀU KHIỂN BẰNG GÂN TRONG RECURDYN

MODELING AND KINEMATICS SIMULATION OF A TENDON-DRIVEN WEARABLE PROSTHETIC FINGER IN RECURDYN

Nguyễn Hùng Linh^{1,2}, Lương Quốc Việt^{2,*}

¹Khoa Cơ khí Chế tạo máy, Trường Cao đẳng Công nghệ Thủ Đức

²Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương TP. Hồ Chí Minh

*Email: vietlq@huit.edu.vn

TÓM TẮT

Ngón tay giả là sự thay thế cho tình trạng cụt chi trên, tức là mất một phần ngón tay. Ngón tay ảo duy nhất là điểm then chốt của bàn tay cơ học khéo léo, cần thiết kế và phân tích cơ học để tùy chỉnh nhằm đáp ứng hiệu quả nhu cầu của người dùng. Bài báo này áp dụng mô hình hóa và mô phỏng động học của ngón tay giả đeo được điều khiển bằng gân. Trong nghiên cứu này, mô hình 3D của bàn tay giả được vẽ dựa trên kích thước bàn tay người bình thường bằng cách sử dụng SIEMENS NX, một phần mềm CAD nổi tiếng. Sau đó, hệ thống ngón tay ảo được phân tích bằng cách sử dụng phần mềm động lực học đa thân nổi tiếng RECURDYN. Kết quả mô phỏng phản ánh chuyển động của ngón tay giả. Những kết quả này có thể được sử dụng để phát triển khả năng điều khiển và đánh giá hiệu suất thiết kế sau này.

Từ khóa: Ngón tay giả; Robot đeo được; Cơ sinh học; RECURDYN; Máy truyền động bằng gân; SIEMENS NX.

ABSTRACT

Prosthetic fingers are replacements for upper extremity amputation refers to partial finger loss. The single virtual finger is the key point of the dexterous mechanical hand, that is required mechanical design and analysis for customizing to effectively meet the needs of users. This paper adopts a modeling and kinematics simulation of a tendon-driven wearable prosthetic finger. In this study, a 3D model of prosthetic hands is drawn based on a normal human hand's size by using SIEMENS NX, which is a famous CAD software. And the virtual finger system is then analyzed by using the famous multi-body dynamics software RECURDYN. The simulation results reflect the motion of the prosthetic finger. These results can be used to develop the control and evaluate the design performance late on.

Keywords: Prosthetic finger; Wearable robot; Biomechanics; RECURDYN; Tendon actuator; SIEMENS NX.



*DANH TỪ:

α_1, α_2 = Góc tiếp xúc của ròng rọc;
 $\beta_C, \beta_D, \beta_T, \beta_F$ = Góc giữa trục x và R_C ,
 R_D, T, F tương ứng;
 F = Lực tiếp xúc;
 M_0, M = Mô men xoắn của động cơ và
mô men xoắn đầu vào bằng nhau;
 r_0, r_p = Góc tỏa ra của ròng rọc;
 R_A, R_B, R_C, R_D = Lực phản ứng tại khớp
A, B, C và D tương ứng;
 T_1, T_2 = Lực gân;
 $l_{BC}, l_{CD}, l_{BC}, l_{AC}$ = Chiều dài giữa khớp A,
B, C và D;
EMG = Điện cơ đồ;
DOF = Mức độ tự do;
s = Hành trình của gân.

1. GIỚI THIỆU

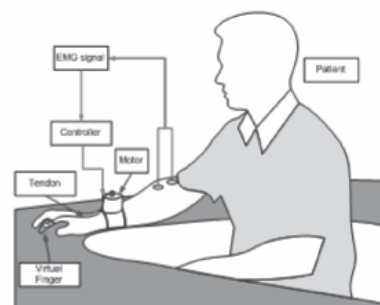
Hơn 2 triệu người bị cắt cụt hoặc mất ngón tay do các rối loạn sức khỏe gây ra bởi nhiễm trùng, khuyết tật bẩm sinh, tiểu đường, ung thư hoặc các bệnh khác [1]. Nhiều người bị mất một phần hoặc toàn bộ ngón tay có thể sử dụng ngón tay giả. Trong tất cả các nghiên cứu trước đây, ngón tay giả có thể được chia thành ngón tay thụ động và ngón tay chủ động [2]. Ngón tay giả thụ động có thể được tùy chỉnh và sản xuất bằng cách sử dụng máy in 3D [3], [4]. Tuy nhiên, ngón tay giả thụ động chủ yếu có mục đích thẩm mỹ. Trong quá trình phát triển công nghệ, nhiều nhà nghiên cứu đã nghiên cứu ngón tay giả chủ động bao gồm nhiều cảm biến và nguồn điện bên ngoài để linh hoạt cảm nắm một vật thể và các chức năng khác của bàn tay. Ví dụ, Sang-Eun Baek [5] đã đưa ra sự so sánh về mặt động học của ngón tay giả giữa mô phỏng và thử nghiệm. Rozaimi Ghazali [6] đã áp dụng bộ điều khiển Fuzzy-PID cho bàn tay giả có cảm biến EMG. Pierluigi Rea [7] đã giới thiệu khái niệm về khái niệm ngón tay ảo chưa được kích hoạt. Nhiều khái niệm tiên tiến khác

và các thiết kế hiện đại với nhiều cảm biến và bộ truyền động hơn được trình bày trong [8]. Ngày nay, ngón tay giả vẫn là chủ đề nóng với nhiều vấn đề cần giải quyết như giảm trọng lượng và chi phí sản xuất, chức năng linh hoạt hơn, chắc chắn và sử dụng được lâu dài,...

Với mục đích này, dự án ngón tay giả được thành lập. Bước đầu tiên, ngón tay ảo đơn lẻ được yêu cầu thiết kế cơ học và phân tích để tùy chỉnh nhằm đáp ứng hiệu quả nhu cầu của người dùng. Bài báo này trình bày mô hình hóa và mô phỏng động học của ngón tay giả đeo được điều khiển bằng gân thụ động. Trong nghiên cứu này, mô hình 3D của ngón tay giả đeo được vẽ dựa trên kích thước bàn tay người bình thường bằng cách sử dụng SIEMENS NX, một phần mềm CAD nổi tiếng. Sau đó, hệ thống ngón tay ảo được phân tích bằng cách sử dụng phần mềm động lực học đa thân nổi tiếng RECURDYN.

Bài báo này được tổ chức như sau. Trong chương 2, cấu trúc của hệ thống ngón tay giả được mô tả. Trong chương 3, mô hình hóa ngón tay giả bằng phần mềm RECURDYN được trình bày chi tiết. Và, kết quả mô phỏng và thảo luận được trình bày trong chương 4. Cuối cùng, kết luận và các công trình tương lai sẽ được đưa ra trong chương 5.

2. SƠ ĐỒ HỆ THỐNG NGÓN TAY GIẢ

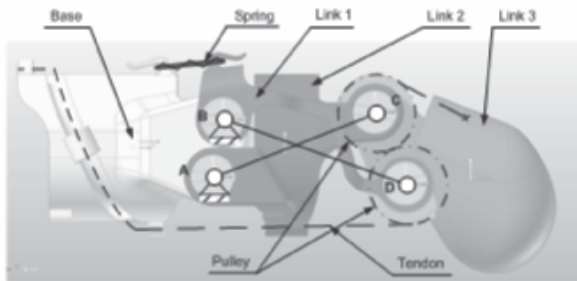


Hình 1. Hệ thống ngón tay giả

Hình 1 cho thấy hệ thống ngón tay giả của dự án của chúng tôi. Tín hiệu EMG được lấy từ một vùng đặc biệt trên bệnh nhân cụt chi để dự đoán chuyển động của ngón tay bị mất. Thuật toán học máy được phát triển để hoàn thành nhiệm vụ này. Sau đó, tín hiệu EMG được sử dụng để điều khiển động cơ, là nguồn năng lượng để điều khiển chuyển động của ngón tay giả. Phần quan trọng nhất của hệ thống này là thiết kế ngón tay giả cơ học để làm hài lòng người dùng.

3. MÔ HÌNH HÓA NGÓN TAY GIẢ

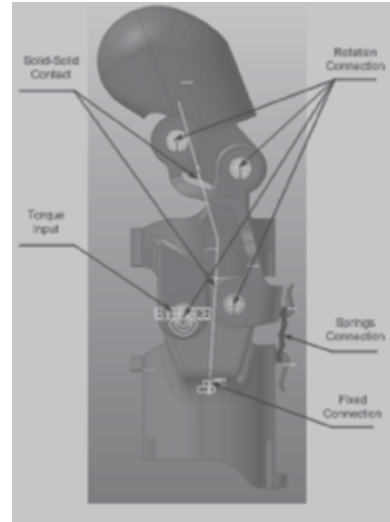
Cấu trúc cơ học của ngón tay giả của chúng tôi được thể hiện trong Hình 2. Như có thể thấy, ngón tay có thể được đơn giản hóa thành các liên kết thanh 1-DOF 4, trong đó hai liên kết 1 và 2 giao nhau. Ngón tay được cung cấp năng lượng bên ngoài thông qua một gân chắc và bền. Một lò xo, kết nối đế và liên kết 1, được thêm vào để phục hồi vị trí ban đầu trong giai đoạn nghỉ (động cơ tắt).



Hình 2. Cấu trúc ngón tay giả

Mô hình ngón tay giả được trình bày chi tiết trong Hình 3. Phần đế được cố định với mặt đất trong môi trường phần mềm RECURDYN. Mỗi liên kết của ngón tay kết nối với các liên kết khác bằng phép nối xoay. Để khai báo va chạm giữa một liên kết và một liên kết khác, hợp đồng rắn-rắn được thiết lập như có thể thấy trong Hình 3. Để đơn giản hóa mô hình ngón

tay giả, một đầu vào mô-men xoắn được thiết lập thay cho bộ truyền động gân.



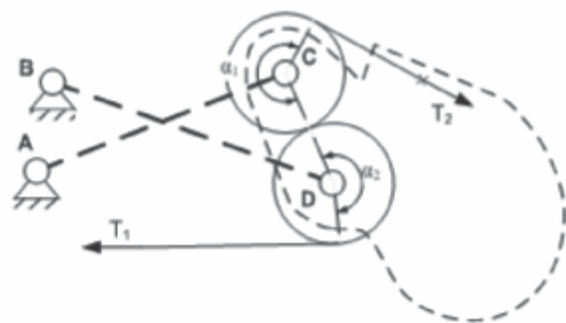
Hình 3. Mô hình ngón tay giả

Giá trị mô men xoắn có thể được tính toán bằng cách sử dụng phương pháp Euler-Newton. Hình 4-6 hiển thị sơ đồ vật thể tự do của gân, liên kết 3 và liên kết 2, tương ứng. Lực gân có thể được mô hình hóa bằng cách sử dụng mô hình Euler [9] như có thể được đưa ra bởi:

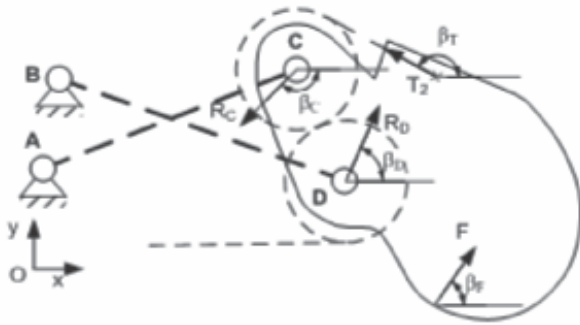
$$T_2 = T_1 e^{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (1)$$

Lực gân T_1 có thể được xác định từ mô-men xoắn của động cơ:

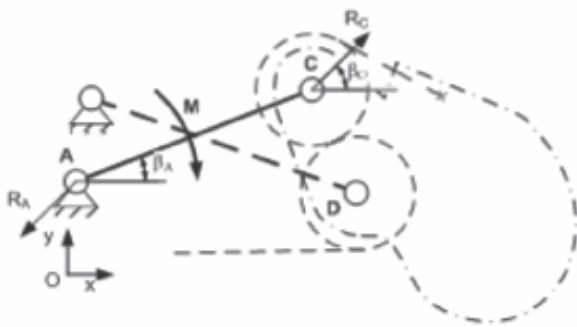
$$T_1 = M_0 / r_0 \quad (2)$$



Hình 4. Sơ đồ thân tự do của gân



Hình 5. Sơ đồ vật thể tự do của liên kết 3



Hình 6. Sơ đồ vật thể tự do của liên kết 2

Từ sơ đồ vật thể tự do của liên kết 3, các phương trình lực có thể được thiết lập:

$$\begin{cases} R_D \cos(\beta_D) + R_C \cos(\beta_C) + T_2 \cos(\beta_T) + F \cos(\beta_F) = 0 \\ R_D \sin(\beta_D) + R_C \sin(\beta_C) + T_2 \sin(\beta_T) + F \sin(\beta_F) = 0 \\ T_2 r_p + R_D l_{CD} + F l_{CF} \sin(\beta_{CF}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Các lực phản ứng R_C , R_D và F có thể được xác định bằng cách giải phương trình 3. Theo sơ đồ vật thể tự do của liên kết 2, giá trị mô men xoắn có thể được đưa ra bởi:

$$M = R_C l_{AC} \sin(\beta_C - \beta_A) \quad (4)$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

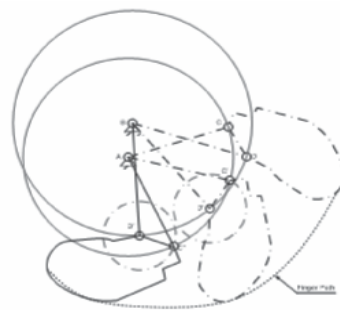
Để đánh giá hiệu suất của ngón tay giả, hai mô phỏng được thực hiện là mô phỏng lộ trình và mô phỏng tiếp xúc.

4.1. Mô phỏng lộ trình

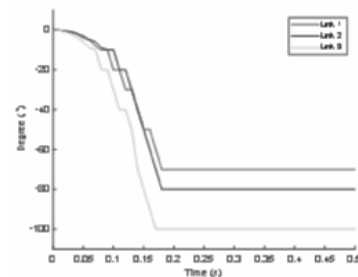
Mục tiêu của mô phỏng này là đánh giá lộ trình của ngón tay giả và xác minh khả năng nắm bắt. Lộ trình của ngón tay được thể hiện trong Hình 7. Như có thể thấy, chuyển động của ngón tay giả gần giống với ngón tay thật. Tuy nhiên, góc cuối của liên kết 1 và 2 nhỏ hơn 90° , nhỏ hơn khả năng của ngón tay thật. Vì vậy, có một khoảng cách nhỏ ở vị trí cuối cùng của ngón tay giả, như có thể thấy trong Hình 8-9. Do đó, ngón tay giả không thể khép lại thành một bó so với ngón tay người bình thường.

Một tham số quan trọng khác là hành trình hoặc độ dịch chuyển tuyến tính của gân. Theo giả định rằng gân luôn chịu lực căng [10] và độ dịch chuyển của gân chỉ bị ảnh hưởng bởi góc tiếp xúc của ròng rọc D, do đó độ dịch chuyển tuyến tính của gân có thể được đưa ra:

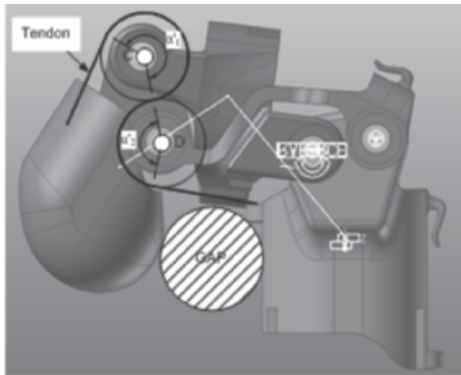
$$s = r_p(\alpha'_2 - \alpha_2) \pi / 180 \quad (5)$$



Hình 7. Đường đi của ngón tay



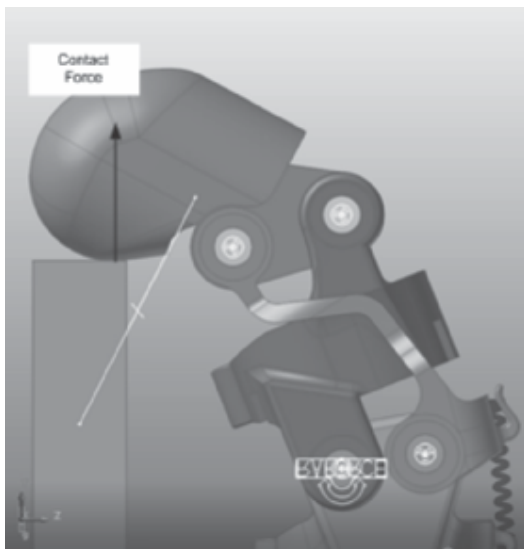
Hình 8. Góc lặn của các liên kết



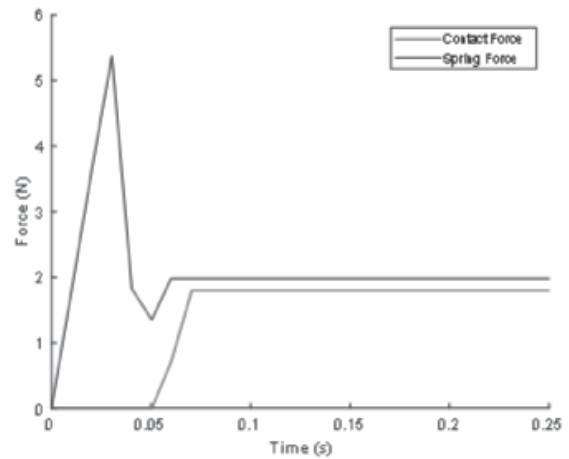
Hình 9. Vị trí cuối cùng của ngón tay

4.2. Mô phỏng tiếp xúc

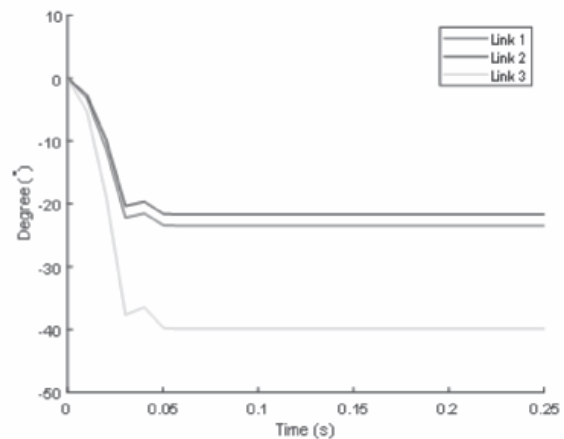
Mục tiêu của mô phỏng này là xác định lực tiếp xúc của ngón tay giả trong khi nắm một vật. Hình 10 cho thấy mô phỏng tiếp xúc của ngón tay. Trong bối cảnh này, mắt xích 3 của ngón tay tiếp xúc với một hộp được cố định trên mặt đất. Kết quả mô phỏng được hiển thị trong Hình 11 và 12. Mô-men xoắn đầu vào không đổi ở mức 1 Nmm, ngón tay giả tiếp xúc với hộp tại thời điểm $t = 0,05$ giây. Sau khi tiếp xúc, lực tiếp xúc tăng lên cho đến khi đạt đến điểm tương đương ở gần 2N. Giá trị này có thể được tính toán từ các Công thức 1-3.



Hình 10. Đường đi của ngón tay



Hình 11. Lực tiếp xúc và lực lò xo



Hình 12. Góc lặn của các liên kết

5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày mô phỏng ngón tay giả đeo được điều khiển bằng gân bằng cách sử dụng RECURDYN. Trong nghiên cứu này, hai loại mô phỏng là mô phỏng đường đi đầy đủ và mô phỏng tiếp xúc được thực hiện. Cả hai kết quả mô phỏng đều cho thấy chuyển động của ngón tay giả gần giống với ngón tay thật. Tuy nhiên, có một số nhược điểm như hạn chế về góc ở vị trí cuối cùng,... sẽ được cải thiện trong tương lai. Hơn nữa, mô hình ngón tay giả này được sử dụng để xây dựng mô phỏng đồng



thời giữa MATLAB-RECURDYN để phát triển bộ điều khiển. Và, nguyên mẫu của ngón tay giả sẽ được sản xuất bằng cách sử dụng máy in 3D.❖

Ngày nhận bài: **20/02/2025**

Ngày phản biện: **12/3/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. L. Dunai, M. Novak, and C. García Espert, “Human Hand Anatomy-Based Prosthetic Hand”. *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 137, Dec. 2020, doi: 10.3390/s21010137.
- [2]. K. Xu, H. Liu, Z. Zhang, and X. Zhu, “Wrist-Powered Partial Hand Prosthesis Using a Continuum Whiffle Tree Mechanism: A Case Study”. *IEEE Trans. NEURAL Syst. Rehabil. Eng.*, pp. 609-618, Mar. 2018, doi: 10.1109/TNSRE.2018.2800162.
- [3]. D. Lim, T. Georgiou, A. Bhardwaj, G. D. O’Connell, and A. M. Agogino, “Customization of a 3D Printed Prosthetic Finger Using Parametric Modeling”. In *Volume 2A: 44th Design Automation Conference*, Quebec City, Quebec, Canada, Aug. 2018, p. V02AT03A034. doi: 10.1115/DETC2018-85645.
- [4]. K. J. Young, J. E. Pierce, and J. M. Zuniga, “Assessment of body-powered 3D printed partial finger prostheses: a case study”. *3D Print. Med.*, vol. 5, no. 1, p. 7, Dec. 2019, doi: 10.1186/s41205-019-0044-0.
- [5]. Sang-Fun Baek, Seung-Hi Lee, and J. H. Chang, “Design and control of a robotic finger for prosthetic hands”. In *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No.99CH36289)*, Kyongju, South Korea, 1999, vol. 1, pp. 113-117. doi: 10.1109/IROS.1999.812990.
- [6]. R. Ghazali, M. Z. Saad, S. Y. S. Hussien, M. H. Jali, F. N. Zohedi, and T. A. Izzuddin, “Intelligent Controller Design for Multifunctional Prosthetics Hand”. *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 6, no. 6, pp. 495-501, 2017, doi: 10.18178/ijmerr.6.6.495-501.
- [7]. P. Rea, “On the Design of Underactuated Finger Mechanisms for Robotic Hands”. In *Advances in Mechatronics*, H. Martinez-Alfaro, Ed. InTech, 2011. doi: 10.5772/24304.
- [8]. E. Difonzo, G. Zappatore, G. Mantriota, and G. Reina, “Advances in Finger and Partial Hand Prosthetic Mechanism”. *Robotics*, vol. 9, no. 4, p. 80, Oct. 2020, doi: 10.3390/robotics9040080.
- [9]. Y. Cho, B. Kang, C. Park, and J. Cheong, “Kinematics of Elastic Tendons for Tendon-Driven Manipulators With Transmission Friction”. *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 27, no. 1, pp. 202-213, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMECH.2021.3060424.
- [10]. L.-W. Tsai, “Design of Tendon-Driven Manipulators”. *J. Mech. Des.*, vol. 117, no. B, pp. 80-86, Jun. 1995, doi: 10.1115/1.2836474.