

KHẢO SÁT, THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH BÀN TAY ROBOT MÔ PHỎNG BÀN TAY NGƯỜI ỨNG DỤNG CẢM BIẾN LEAP MOTION

SURVEY, DESIGN AND FABRICATION OF HUMANOID ROBOT HAND MODEL USING LEAP MOTION SENSOR

Trần Quang Khải¹

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; tqkhai@dut.udn.vn

(Nhận bài: 05/01/2021; Chấp nhận đăng: 20/01/2021)

Tóm tắt - Robot dạng hình người là một lĩnh vực nghiên cứu của khoa học robot. Các nghiên cứu trong lĩnh vực này tập trung vào việc mô phỏng và chế tạo lại các bộ phận (cánh tay, bàn tay, chân...), và các hoạt động (cầm, nắm...) của cơ thể con người. Các ứng dụng chính của lĩnh vực này bao gồm chi giả trong y tế, robot tiếp tân, robot giải trí. Để có thể sử dụng robot dạng người trong các lĩnh vực này, việc mô phỏng đúng cấu trúc giải phẫu của từng bộ phận là cần thiết. Tiếp đến, để thu thập thông tin điều khiển các bộ phận này tương tự như cách con người sử dụng các “cảm biến” xúc giác (như da) và cảm biến hình ảnh (như mắt), có nhiều cách như: Sử dụng cảm biến xúc giác, camera nhận diện hình ảnh hoặc cảm biến nhận dạng chuyển động. Bài báo này trình bày quá trình khảo sát, phân tích, chế tạo một bàn tay robot và ứng dụng cảm biến Leap Motion để mô phỏng lại các cử chỉ của bàn tay con người.

Từ khóa - Robotics; robot hình người; hệ thống cơ điện tử; leap motion; thực tế ảo

1. Đặt vấn đề

Theo [1], khoa học robot hiện đại chỉ thực sự phát triển vào giữa thế kỷ XX nhờ vào sự phát triển của điều khiển số (numerical control) và cơ khí chính xác (precise manufacturing). Ngay từ thời kỳ đầu này, ngoài việc chế tạo các cánh tay robot công nghiệp chuyên thực hiện các công việc lắp đi lắp lại và có yêu cầu chính xác cao, robot dạng hình người (humanoid robot) cũng là một lĩnh vực được các nhà khoa học quan tâm. Robot dạng hình người là một nhánh nghiên cứu của khoa học robot quan tâm đến việc mô phỏng và chế tạo lại các chi và các hoạt động của cơ thể con người. Theo kiến thức của tác giả, một trong những robot dạng hình người đầu tiên trong khoa học robot hiện đại là kết quả hợp tác của bệnh viện Rancho Los Amigos (Mỹ) hợp tác với Đại học Stanford vào năm 1963 [2]. Đó là một cánh tay giả cho người khuyết tật với sáu khớp có thể được điều khiển bằng máy vi tính. Không lâu sau đó, vào năm 1968, giáo sư Marvin Minsky của Viện Công nghệ Massachusetts đã chế tạo thành công một cánh tay robot mô phỏng lại cánh tay của con người [3]. Đây là các thành công bước đầu của ngành chế tạo robot dạng hình người. Trong nghiên cứu robot dạng người, các nghiên cứu về bàn tay robot mô phỏng lại bàn tay người nhận được nhiều sự quan tâm vì bàn tay là phần thực hiện đa số các công việc trong cuộc sống hằng ngày.

Theo [5], một bàn tay con người bao gồm 14 xương đốt ngón tay (phalange), 5 xương đốt bàn tay (metacarpal) và 8 xương cổ tay (carpal) (Hình 2). Hình 3 mô tả bàn tay con người bằng các khớp cơ học của Ivan Virgala và các đồng tác giả [7]. Cũng theo tác giả này, khi mô hình hóa bàn tay

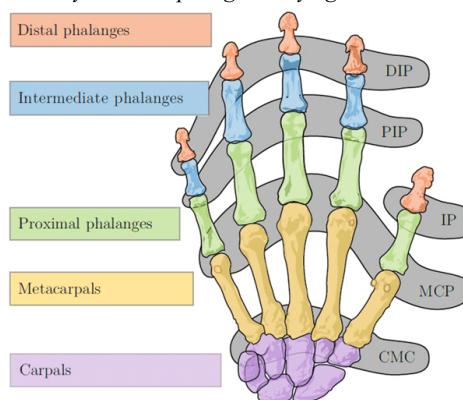
Abstract - Humanoid robot is a research division of robotics. This field focuses on simulating and fabricating parts of the human body (such as limbs, muscles) and their corresponding actions/movements. Some popular applications of humanoid robot are prostheses in medical field, receptionist robots and entertaining robots in service field. To operate in these fields, high fidelity models of robot based on human anatomy are required. Furthermore, to capture precise movements of those parts, various types of sensor such as tactile sensors, cameras, or motion sensors should be used. This paper presents an approach to model, design and fabricate a robot hand that mimics simple movements of human hand. Analyzing the human hand anatomy is carefully conducted in this study. A Leap Motion controller is also used to capture real-time movements of a human hand for the simulation purposes.

Key words - Robotics; humanoid robot; mechatronics system; leap motion; virtual reality

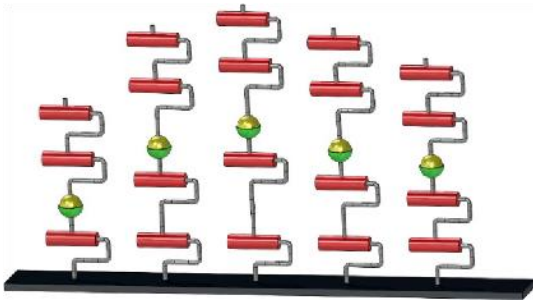
con người trong không gian ba chiều cần tối thiểu 24+6 bậc tự do. Để so sánh, các cánh tay robot công nghiệp phổ biến thường chỉ có đến sáu bậc tự do [8]. Có thể thấy, cấu trúc các khớp, cơ, xương của cơ thể người là phức tạp.



Hình 1. Bàn tay robot mô phỏng bàn tay người “UNIPI hand” [4]



Hình 2. Cấu trúc xương bàn tay của con người [6]



Hình 3. Mô tả bàn tay người bằng các khớp cơ học [7]

Trên thế giới, đã có các nghiên cứu về việc chế tạo bàn tay robot mô phỏng lại các chi của con người [9-13]. Tại Việt Nam, đã có nhóm sinh viên của Trường Đại học Bách khoa Hà Nội nghiên cứu và chế tạo được cánh tay robot mô phỏng cánh tay người dành cho người khuyết tật [14]. Các nghiên cứu về robot dạng hình người chủ yếu xoay quanh các chủ đề: Thiết kế các chi tiết cơ khí mô phỏng chính xác các mô, cơ và khớp [9, 10]; Phát triển và tích hợp các cảm biến xúc giác nhận biết được các tác động của môi trường [11]; Ứng dụng các phương pháp điều khiển chính xác nhằm giảm độ trễ cũng như tăng tính linh hoạt [12, 13].

Từ các phân tích trên, có thể thấy, việc chế tạo robot hình người mô phỏng lại các chi của con người là khó khăn. Ngoài ra, việc lựa chọn phương án điều khiển các chi này theo hướng cơ khí hoá linh hoạt [17] hay theo hướng giải phẫu học chính xác như [18] cũng là vấn đề được quan tâm. Trong khuôn khổ bài báo này, tác giả trình bày quá trình phân tích, chế tạo phần cơ khí của mô hình bàn tay robot mô phỏng lại cấu trúc bàn tay con người theo hướng giải phẫu học chính xác và ứng dụng cảm biến Leap Motion [15] để tiến hành mô phỏng và điều khiển từ xa các chuyển động của bàn tay robot. Bài báo tập trung giải quyết các vấn đề sau:

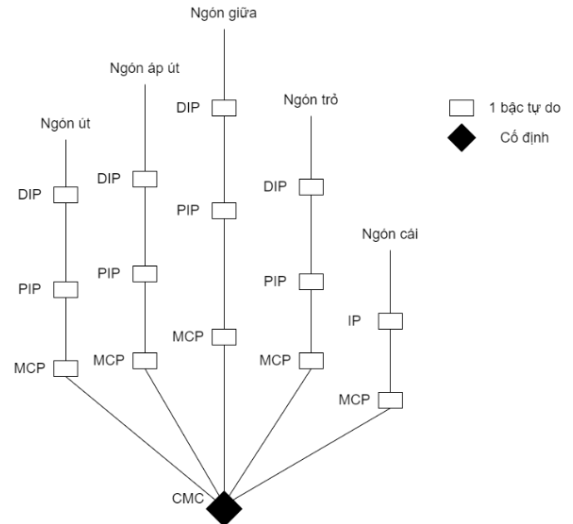
- Khảo sát và đề xuất được một mô hình dễ chế tạo nhưng vẫn đúng theo giải phẫu học và có thể thực hiện được các cử động đơn giản như bàn tay thật.
- Mô hình có khối lượng nhỏ nhưng vẫn đảm bảo cơ tính cho các hoạt động và cử chỉ đơn giản.
- Ứng dụng Leap Motion để thực hiện việc mô phỏng và điều khiển từ xa không chạm: Bàn tay mô hình có thể bắt chước các cử chỉ đơn giản từ bàn tay thật.

2. Giải quyết vấn đề

2.1. Giải phẫu học bàn tay người

Để nghiên cứu chế tạo chính xác bàn tay robot, việc phân tích giải phẫu học bàn tay người là cần thiết. Bàn tay con người gồm 27 xương phân làm ba nhóm như đã giới thiệu ở Mục 1. Nhóm 14 xương đốt ngón tay lại được phân thành ba nhóm nhỏ là xương đốt xa (distal phalanges - DP, 5 xương), xương đốt giữa (intermediate phalanges - IP, 4 xương), và xương đốt gần (proximal phalanges - PP, 5 xương). Theo [7], trên một ngón tay, các xương được nối với nhau bằng các khớp có tên gọi theo giải phẫu học tương ứng như sau: Xương DP được nối với xương IP bằng một khớp quay DIP (một bậc tự do); Xương IP được nối với xương PP bằng một khớp quay PIP (một bậc tự do); Xương PP được nối với xương đốt bàn tay (metacarpal) bằng một khớp cầu MCP (ba bậc tự do); Và xương đốt bàn tay được nối với các xương cổ tay (carpal) bằng một khớp CMC (sáu

bậc tự do). Phạm vi của bài báo chỉ dừng lại ở việc mô phỏng các chuyển động của các ngón tay trên bàn tay người, không bao gồm mô phỏng chuyển động của cả bàn tay. Vì vậy, tại khớp nối giữa xương PP và xương đốt bàn tay, để thuận tiện trong việc chế tạo, khớp này được tác giả giới hạn lại thành khớp quay một bậc tự do. Lúc này, bàn tay robot có thể thực hiện được hai dạng chuyển động chính là chỉ các ngón tay và nắm các ngón tay lại. Mô hình các khớp ngón tay có thể được thu gọn như Hình 4. Riêng với ngón tay cái thì không có khớp DIP và PIP mà chỉ có khớp IP (nối giữa xương đốt xa và xương đốt gần).



Hình 4. Mô tả bàn tay người theo mô hình đề xuất

Với các giả thiết như trên, ta có thể khảo sát động học của một ngón tay bất kỳ bằng một vector có ba tham số:

$$[\theta_{DI} \quad \theta_{IP} \quad \theta_{MC}]^T$$

Với, θ_{DI} là góc quay của khớp đỉnh DIP, θ_{IP} là góc quay của khớp giữa PIP và θ_{MC} là góc quay của khớp bàn MCP. Khác với khớp quay của robot công nghiệp có thể có giá trị rất lớn, các góc quay của bàn tay robot bị giới hạn bởi dây chằng. Theo [15], với một bàn tay người bình thường, giá trị của các góc quay này được cho trong Bảng 1.

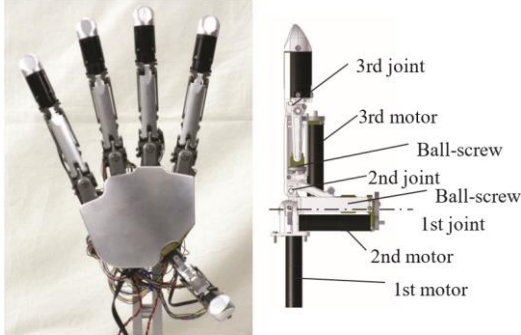
Bảng 1. Vùng giá trị của các tham số trong vector động học của một ngón tay

Ngón \ Góc quay max	θ_{DI}	θ_{IP}	θ_{PM}
Út	$-30^\circ \div 90^\circ$	$0^\circ \div 90^\circ$	$-10^\circ \div 40^\circ$
Áp út	$-30^\circ \div 90^\circ$	$0^\circ \div 90^\circ$	$-10^\circ \div 20^\circ$
Giữa	$-30^\circ \div 90^\circ$	$0^\circ \div 90^\circ$	$-15^\circ \div 15^\circ$
Trỏ	$-30^\circ \div 90^\circ$	$0^\circ \div 90^\circ$	$-20^\circ \div 10^\circ$
Cái	$-10^\circ \div 30^\circ$	$0^\circ \div 90^\circ$	$-10^\circ \div 100^\circ$

2.2. Khảo sát, thiết kế, và chế tạo các thành phần của mô hình

Dựa trên phân tích giải phẫu và mô hình động học bàn tay con người, phần cơ khí của bàn tay robot có thể có hai hướng chế tạo chính: Chế tạo các khớp sao cho mỗi khớp được điều khiển bằng một động cơ servo riêng biệt như nghiên cứu của Kawasaki và các đồng nghiệp [17]; Hoặc chế tạo sao cho các khớp được điều khiển bằng hệ thống dây chằng nhân tạo như [18]. Mỗi phương pháp đều có những ưu - nhược điểm đặc thù: Nếu mỗi khớp đều hoạt

động độc lập với nhau như đề xuất của Kawasaki thì số lượng động cơ cần sử dụng phải tương ứng với số khớp (14 động cơ, Hình 5), tuy nhiên, các ngón tay có thể thực hiện được những cử động phức tạp một cách chính xác; Nếu mô phỏng lại hoạt động của ngón tay bằng dây chằng nhân tạo thì số lượng động cơ servo cần sử dụng chỉ là năm và việc mô phỏng sẽ gần với thực tế giải phẫu học bàn tay hơn. Tuy nhiên, việc điều chỉnh lực căng của dây chằng nhân tạo để tạo ra các cử động phù hợp là tương đối khó vì tính phức tạp của các bó cơ và dây chằng hữu cơ thực tế.



Hình 5. Bàn tay robot với các khớp hoạt động độc lập [17]

Với tiêu chí mô phỏng lại bàn tay người một cách chính xác theo giải phẫu học, việc chọn sử dụng dây chằng nhân tạo là phương án tối ưu. Hiện nay, các mô hình bàn tay robot sử dụng dây chằng nhân tạo phổ biến được sử dụng là mô hình có trả phí MechTE [19] của hãng Custom Entertainment Solutions và mô hình InMoov [20] của tác giả Gael Langevin. Mô hình InMoov đang nhận được sự quan tâm từ phía cộng đồng vì sự miễn phí và tính mở (open-source). Hiện tại có rất nhiều mô hình sửa đổi dựa trên mã nguồn của InMoov được công bố tại [20]. Tác giả lựa chọn mô hình của InMoov cho đề tài này ngoài hai lý do trên, còn do các ưu điểm sau của InMoov: thư viện bàn tay của InMoov có thể được in 3D một cách dễ dàng; dây chằng nhân tạo có thể sử dụng các vật liệu giá rẻ và sẵn có như dây cước fluorocarbon hoặc dây cước thép.

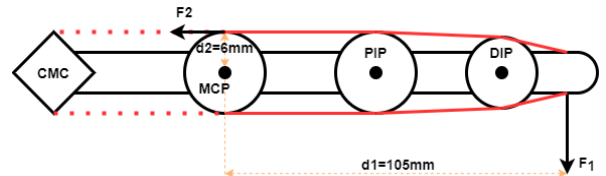
Điểm khác biệt của mô hình đề xuất so với mô hình gốc là các thông số khi in 3D. Theo đề xuất [20] thì độ điền đầy (infill) nên lớn hơn 30% và độ dày mỗi lớp in 3D nên lớn hơn 0.3mm. Tuy nhiên, với cấu hình in có độ điền đầy 25%, độ dày mỗi lớp in 0.2mm và cấu trúc hình học tam giác, mô hình vẫn đảm bảo độ cứng vững với khối lượng mô hình giảm khoảng 13% (Bảng 2). Hình 8 và Hình 9 thể hiện phần thiết kế 3D bàn tay trên máy vi tính và mô hình bàn tay đã in 3D thành công. Bàn tay được in 3D có độ chính xác cao bằng nhựa PLA.

Bảng 2. Thông số in 3D

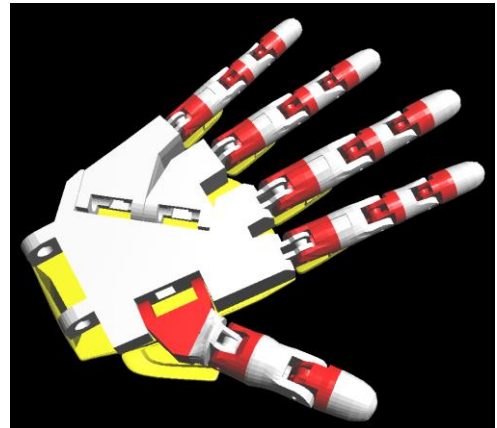
Cấu hình	Gốc	Thay đổi
Độ điền đầy (Infill)	30%	25%
Số lớp tường in (Shell)	3	3
Độ dày mỗi lớp (layer thickness)	0,3mm	0,2mm
Cấu hình hình học điền đầy (infill geometry)	Loại hình vuông □	Loại tam giác △
Khối lượng tổng thể	550g	479g

Về phần điện, các dây chằng nhân tạo trong mô hình InMoov có thể được điều khiển bằng bất cứ động cơ nào cho phép điều khiển góc quay chính xác. Với mô hình trong

bài báo này, tác giả đề xuất sử dụng năm động cơ servo với các ưu điểm: Tốc độ đáp ứng nhanh, điều khiển góc quay chính xác bằng phương pháp điều chế độ rộng xung PWM, kích thước nhỏ gọn cho phép lắp kín trong mô hình bàn tay. Tiếp theo cần tính toán momen cho động cơ để đảm bảo động cơ có thể điều khiển các dây chằng nhân tạo co giãn. Các tài liệu trước đây thường chỉ chọn động cơ theo kinh nghiệm. Quá trình tính toán như sau: Khi các dây chằng bị uốn (flexion) hoặc giãn (extension) sẽ tạo ra momen trong các khớp. Trong cấu hình bàn tay đề xuất, momen tại khớp MCP sẽ lớn nhất (cánh tay đòn dài nhất và chịu tải của toàn bộ ngón tay, Hình 6). Lưu ý, do khớp CMC đã bị cố định nên ta không xét momen tại khớp này (ngoài ra bàn tay luôn hướng thẳng đứng). Lực căng dây chằng lớn nhất là xấp xỉ $F_2 = 9,09N$ khi toàn bộ các ngón tay duỗi thẳng [22]. Với $d_2 \approx 6mm$ ta tính được momen tại khớp MCP $\tau_{MCP} = F_2 d_2 \approx 0,5562kg.cm$. Vì $F_2 d_2 = F_1 d_1 \Rightarrow F_1 = \frac{0,5562}{1,05} \approx 0,5194N$. Khối lượng ngón giữa (ngón nặng nhất) là 15g nên chỉ cần động cơ tạo được lực kéo dây chằng lớn hơn 9,09N thì có thể giãn ngón tay. Ngoài ra, các dây chằng nhân tạo được gắn vào đĩa quay (có bán kính $d = 15mm$) trên động cơ servo (xem Hình 8) nên momen tối thiểu mà động cơ phải tạo được là $\tau_{servo} = F_2 d = 9,09 \cdot 1,5 \approx 13,635Ncm \approx 1,3903kg.cm$. Dựa vào các thông số này có thể chọn các động cơ servo phù hợp. Để dễ dàng điều khiển và tránh quá tải, tác giả lựa chọn năm động cơ servo MG996 với momen tối đa $3,5kg.cm$ tại điện áp hoạt động 4,8V.



Hình 6. Sơ đồ tính toán momen cho động cơ

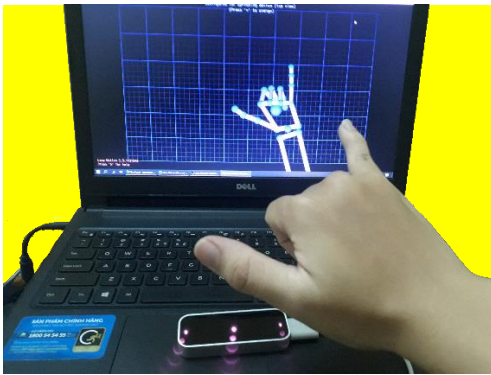


Hình 7. Mô hình 3D bàn tay robot sử dụng trong bài báo



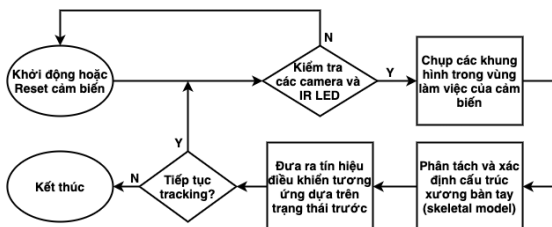
Hình 8. Bàn tay robot đã in 3D hoàn thiện

Để phát hiện chuyển động của bàn tay và cho ra tín hiệu điều khiển tương ứng, có nhiều phương pháp có thể kể ra như: Sử dụng cảm biến xúc giác [11], sử dụng camera và ứng dụng công nghệ xử lý ảnh [12, 16, 17], sử dụng cảm biến phát hiện chuyển động [15]. Trong bài báo này, tác giả sử dụng cảm biến Leap Motion (Hình 9) là cảm biến phát hiện chuyển động của bàn tay người được phát triển bởi Công ty Ultraleap. Không gian làm việc của cảm biến này vào khoảng $0,23m^3$. Hoạt động của cảm biến Leap Motion dựa vào hai camera góc rộng (có trường nhìn $140^\circ \times 120^\circ$) với độ phân giải 640×240 pixel và ba LED hồng ngoại. Bộ các camera và đèn LED này có nhiệm vụ thu thập các bức xạ hồng ngoại có bước sóng 850nm (là bước sóng của bức xạ hồng ngoại phát ra từ cơ thể người bình thường, Hình 12) [21]. Dựa vào các tín hiệu bức xạ thu được, ta có thể lập bản đồ mô hình 3D cánh tay của người điều khiển. Bộ điều khiển Leap Motion hiện đang được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng thực tế ảo (VR) và tương tác không chạm.

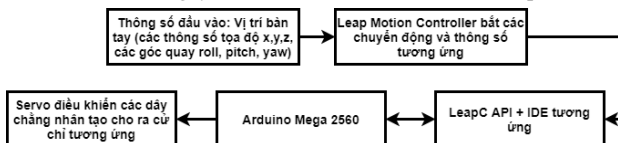


Hình 9. Cảm biến Leap Motion và giao diện điều khiển

Để giao tiếp giữa cảm biến Leap Motion và máy vi tính, hãng Ultraleap có cung cấp bộ giao diện lập trình ứng dụng (Application Programming Interface – API) có tên LeapC API. Đây là bộ API dành riêng cho Leap Motion được viết bằng ngôn ngữ C nên có thể chạy được trên nhiều nền tảng hệ điều hành khác nhau. API LeapC hoạt động dựa trên nguyên tắc xây dựng lại cấu trúc xương (skeletal model) từ ảnh hồng ngoại thu được từ Leap Motion. Cách sử dụng API LeapC có thể được tóm tắt theo sơ đồ Hình 10.



Hình 10. Quy trình xử lý ảnh dựa trên API LeapC



Hình 11. Lưu đồ điều khiển các ngón tay trên bàn tay robot mô phỏng

Các thông số tọa độ của bàn tay cùng với các góc quay roll, pitch, yaw được Leap Motion thu thập. Thông qua LeapC API và một IDE bất kỳ, ta có thể đưa các thông số

này vào Arduino để điều khiển các động cơ servo điều khiển các dây chằng nhân tạo cho ra cử chỉ tương ứng trên mô hình bàn tay.

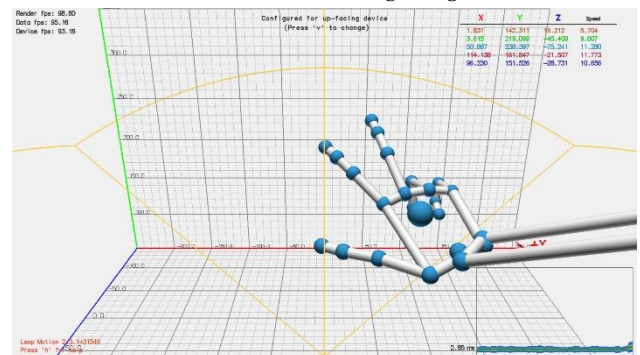
3. Kết quả thí nghiệm

Như đã đề cập, cảm biến Leap Motion sẽ thu các bức xạ hồng ngoại có bước sóng 850nm và dựng lại bản đồ mô hình bàn tay người. Nếu trong môi trường có nhiều người hoặc có nhiều nguồn bức xạ có bước sóng tương đương thì cảm biến sẽ bị nhiễu. Để hạn chế tối đa các nhiễu gây hại, thí nghiệm được thực hiện trong phòng kín với nguồn sáng là đèn huỳnh quang. Thí nghiệm được mô tả như sau: Trạng thái ban đầu của bàn tay là mỗi ngón tay khép hờ một góc 5° tương ứng với bộ thông số động học $[5 \ 5 \ 5]^T$. Khi Leap Motion Controller bắt các chuyển động được định trước từ bàn tay thật, vi điều khiển sẽ điều khiển các động cơ servo uốn hoặc giãn các dây chằng nhân tạo để bàn tay mô hình cử động theo bàn tay thật. Sau khi kết thúc một thí nghiệm thì bàn tay được cài đặt lại về trạng thái ban đầu. Mỗi thí nghiệm được thực hiện trong 50 lần. Kết quả được cho trong Bảng 2.

Trong kết quả thí nghiệm, có một số lần API của cảm biến Leap Motion không nhận diện được khung hình của bàn tay. Tuy nhiên, tỷ lệ phần trăm nhận diện đúng với từng cử chỉ đề ra đều lớn hơn hoặc bằng 90%. Các động cơ servo hoạt động ổn định, dây chằng nhân tạo khi chạy 200 thí nghiệm liên tục chưa có dấu hiệu bị dẫn hay đứt. Các khớp ngón tay gấp và dẫn theo đúng cử chỉ của bàn tay thật.



Hình 12. Các cử chỉ trong thí nghiệm



Hình 13. Nhận dạng bàn tay bằng Leap Motion và LeapC API tương ứng

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

Số lần đáp ứng Cử chỉ	Đáp ứng đúng	Đáp ứng sai	Không đáp ứng
Mô hoàn toàn 5 ngón tay	45	3	2
Nắm hoàn toàn 5 ngón tay	47	3	0
Giơ một ngón trỏ, các ngón còn lại nắm	49	1	0
Giơ ngón trỏ và ngón út thành hình chữ V	46	3	1

Về độ trễ điều khiển, do Leap Motion Controller liên tục gửi dữ liệu tọa độ và góc quay về vi điều khiển nên có thể xảy ra hiện tượng tràn bộ đệm. Hiện tượng này xảy ra khi các động cơ servo chưa hoàn thành việc điều khiển dây chằng của bước trước thì vi điều khiển đã nhận được dữ liệu vị trí mới và điều khiển động cơ servo với bộ dữ liệu mới. Vì vậy, sau mỗi cử chỉ thành công, tác giả đề xuất một khoảng delay xấp xỉ 1s để đảm bảo các cử chỉ không bị chồng chéo. Do cơ chế này nên các cử chỉ trên mô hình có thể bị chậm so với cử chỉ của bàn tay thật.

4. Kết luận

Mô hình đáp ứng tốt các yêu cầu đề ra là dễ chế tạo, nhận diện cử chỉ chính xác và cử động theo đúng tín hiệu điều khiển. Tuy nhiên, do mô hình được in bằng nhựa PLA hiện tượng bong tróc bề mặt là không tránh khỏi. Hướng giải quyết tốt nhất là chế tạo lại các chi tiết chuyển động bằng vật liệu có độ cứng vững cao hơn. Ngoài ra, do giới hạn khớp MCP còn một bậc tự do nên chuyển động của bàn tay chưa được tự nhiên. Vấn đề này có thể được giải quyết trong các phiên bản sau. Tiếp đến, do giới hạn của cảm biến Leap Motion, hiện tượng nhiễu là không thể tránh khỏi. Để giải quyết vấn đề này, tác giả đề xuất sử dụng thêm công nghệ xử lý ảnh bằng camera thường để nhận diện số ngón tay kết hợp với nhận diện khung xương bàn tay từ LeapC API để cho kết quả chính xác hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (ed.), *Springer handbook of robotics*, Springer, 2016.
- Shen, He, et al., "Development and Analysis of Robotic Arms for Humanoid Melo", *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 52033. American Society of Mechanical Engineers, 2018, V04AT06A030.
- Minsky, Marvin., "Toward a remotely-manned energy and production economy", *Human Systems Management* 5.2, 1985, 111-121.
- Catalano, Manuel G., et al., "Adaptive synergies for a humanoid robot hand", *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, IEEE, 2012, 7-14.
- C. L. Taylor, R. J. Schwarz, "The Anatomy and Mechanics of the Human Hand", *Artificial Limbs* (1955), Vol. 2, No. 2, 22 – 35.
- Feix, Thomas. *Anthropomorphic hand optimization based on a latent space analysis*. na, 2011.
- Virgala, Ivan, et al., "Analyzing, Modeling and simulation of humanoid robot hand motion", *Procedia Engineering* 96, 2014, 489-499.
- Kuhlemann, I., et al., "Robots with seven degrees of freedom: Is the additional DoF worth it?", *2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, IEEE, 2016, 80-84.
- Tian, Li, et al. "The making of a 3D-printed, cable-driven, single-model, lightweight humanoid robotic hand", *Frontiers in Robotics and AI* 4, 2017, 65.
- Gaiser, Immanuel, et al., "A new anthropomorphic robotic hand", *Humanoids 2008-8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, IEEE, 2008, 418-422.
- Almassri, Ahmed M., et al. "Pressure sensor: state of the art, design, and application for robotic hand", *Journal of Sensors*, 2015.
- Wang, Ying, Landon Autry, and Chan Ham., "To Create a Robotic Humanoid Hand Imitating the Real Time Motions of a Human User's Hand", *SoutheastCon 2018*, IEEE, 2018, 1-2.
- Al Faiz, Mohammed Zeki, and Ammar A. Al-Hamadani., "Online Brain Computer Interface Based Five Classes EEG To Control Humanoid Robotic Hand", *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, IEEE, 2019, 406-410.
- "Ý Tưởng Sáng Tạo Của Nhóm Sinh Viên Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội: Tạo Cánh Tay Robot Cho Người Khuyết Tật", *Cục Quản Lý Khám Chữa Bệnh, CỤC QUẢN LÝ KHÁM CHỮA BỆNH - BỘ Y TẾ*, 4 Sept. 2020, kcb.vn/y-tuong-sang-tao-cua-nhom-sinh-vien-truong-dai-hoc-bach-khoa-ha-noi-tao-canh-tay-robot-cho-nguoi-khuyet-tat.html.
- Potter, Leigh Ellen, Jake Araullo, and Lewis Carter., "The leap motion controller: a view on sign language", *Proceedings of the 25th Australian computer-human interaction conference: augmentation, application, innovation, collaboration*, 2013, 175-178.
- Walha, Chiraz, and Adel M. Alimi., "Human-like Modeling and Generation of Grasping Motion Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization Approach", *International Journal of Computer Science and Information Security* 14.8, 2016, 694.
- Kawasaki, Haruhisa, and Tetsuya Mouri., "Humanoid robot hand and its applied research", *Journal of Robotics and Mechatronics* 31.1, 2019, 16-26.
- Abid, Muhammad R., et al., "Dynamic hand gesture recognition for human-robot and inter-robot communication", *2014 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*, IEEE, 2014, 12-17.
- Dascalu, Monica, et al., "Tele-operated robotic arm and hand with intuitive control and haptic feedback", *American Journal of Aerospace Engineering* 1.4, 2014, 21-27.
- "InMoov – Open-Source 3D Printed Life-Size Robot", *InMoov*, inmoov.fr/.
- "How Does the Leap Motion Controller Work?" *Leap Motion Blog*, 18 Jan. 2017, blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work/
- Tanaka, Tatsuro, et al. "Flexor digitorum profundus tendon tension during finger manipulation: A study in human cadaver hands", *Journal of Hand Therapy* 18.3, 2005, 330-338.