

BÀN TAY NHÂN TẠO DỰA TRÊN THIẾT BỊ TRUYỀN ĐỘNG KHÍ NÉN

ARTIFICIAL HAND BASED ON PNEUMATIC ACTUATOR

Hồ Thị Mỹ Nữ, Phan Hoàng Phụng, Lê Văn Nam

Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một nghiên cứu về bàn tay nhân tạo được tạo hình từ vật liệu mềm. Các ngón tay được chế tạo từ vật liệu đàn hồi gắn kết trên bao tay, các ngón tay mềm này co giãn được khi được cung cấp khí nén. Người khuyết tật có thể sử dụng găng tay này để thay thế bàn tay bị khiếm khuyết. Bàn tay này được chế tạo dễ dàng, giá thành thấp nhưng hiệu suất làm việc cao. Nó dễ dàng nắm bắt và tương thích với các đồ vật có hình dạng khác nhau nhờ nguyên lý cơ cấu mềm. Kết quả thực nghiệm được trình bày trong bài báo cho thấy tính hiệu quả của bàn tay nhân tạo này. Bàn tay nhân tạo này có thể được sử dụng để hỗ trợ các chức năng cầm, nắm và lấy các đồ vật cho người khuyết tật.

Từ khóa: Bàn tay nhân tạo; Cơ cấu mềm; Cảm biến độ cong; Mô phỏng số.

ABSTRACT

This paper presents a study on artificial hands made of soft materials. Fingers are made of super elastic material. These soft fingers are fixed on a glove and these soft fingers will stretch when it is supplied with compressed air. People with hand disabilities can use this artificial hand to replace or support the paralyzed hand. This type of glove hand is easy to make and it has a low cost. It easily grasps objects of various shapes. Experimental results show the effectiveness of this artificial hand. People with disabilities can use it to grasp, grasp, and hold objects.

Keywords: Artificial hand; Soft mechanism; Curvature sensor; Digital simulation.

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, thiết bị truyền động mềm được chế tạo bằng vật liệu đàn hồi đã trở nên phổ biến và chúng được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực công nghiệp robot vì những đặc tính ưu việt của nó như chi phí chế tạo thấp và có khả năng thích ứng cao với môi trường làm việc. So với thiết bị truyền động cứng, thiết bị truyền động mềm có thể thay đổi hình dạng để thích ứng với các môi trường có cấu trúc phức tạp, do đó chúng dễ dàng tương thích với các hình thù khác nhau của đối tượng cần nắm, bắt và xử lý mà không cần có thông tin chính xác về đối tượng đó. Với sự phát triển của các vật liệu đàn hồi mới, nhiều loại thiết bị truyền động mềm đã được phát triển với các khả năng đa dạng và chúng được chế tạo để hoạt động bằng cách sử dụng nhiều phương pháp kích hoạt khác nhau như truyền động dùng khí nén [1-3], truyền động dùng chất lỏng [4], chất điện môi [5, 6], PZT [7-11], SMA [12, 13], IPMC [14, 15].

Nhìn chung, vật liệu phổ biến được sử dụng để chế tạo thiết bị truyền động mềm là cao su hoặc silicone. Các vật liệu phổ biến nhất được liệt kê trong các tài liệu tham khảo là polydimethylsiloxan (PDMS), Ecoflex, Elastosil [16], polyme [1-3], hydrogel [4]. Các đặc tính cơ học nổi bật của các thiết bị truyền động khí nén mềm này là độ giãn dài lớn, khả năng tương thích tốt với môi trường và có độ đáp ứng nhanh. Chức năng thích hợp của các thiết bị truyền động mềm này là cầm hoặc lấy các vật thể có hình dạng khác nhau mà không cần có thông tin chính xác về hình thức vật lý của chúng. Ngược lại với chuyển động của cơ cấu chấp hành cứng là có thể được mô tả với một số bậc tự do hạn chế, trong khi số bậc tự do của cơ cấu truyền động mềm là không giới hạn. Chuyển động của thiết bị truyền động mềm

không chỉ giới hạn ở các chuyển động phẳng, mà có thể uốn cong, xoắn hoặc kéo căng.

Bài báo này giới thiệu một bàn tay robot mới được chế tạo từ vật liệu mềm và vận hành nhờ truyền động khí nén. Quy trình chế tạo bàn tay robot mềm này đơn giản và nhanh. Bàn tay có giá thành thấp và hoạt động linh hoạt mở ra tiềm năng ứng dụng lớn trong thực tế đời sống. Đặc biệt, bàn tay này có thể hỗ trợ người khuyết tật phục hồi chức năng nắm, lấy, giữ đồ vật đã bị mất của bàn tay bị khiếm khuyết.

Trong phần còn lại của bài báo này, chúng tôi mô tả thiết bị truyền động khí nén trong phần 3 và quy trình sản xuất chế tạo trong phần 4. Phần 5 trình bày thiết kế và nguyên lý điều khiển của bàn tay robot nhân tạo. Chúng tôi đánh giá hiệu suất của bàn tay trong phần 6 với hai kiểu nắm bắt khác nhau trong thử nghiệm cầm nắm trên mười đối tượng khác nhau, từ chai nước đầy và các tờ giấy.

2. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

Các bàn tay nhân tạo làm từ vật liệu mềm đã được nghiên cứu và công bố khá nhiều trong thời gian gần đây. Trong phần này, bài báo trình bày các nghiên cứu có liên quan đến bàn tay nhân tạo đã được nghiên cứu và công bố trong những năm qua.

Bàn tay SDM: Thiết kế của bàn tay SDM đã được trình bày trong [19]. Mặc dù bàn tay SDM có cơ chế đơn giản nhưng hiệu suất làm việc của bàn tay này rất tốt. Các khớp nối cơ học được điều khiển thông qua hệ dây gân để tạo chuyển động cho các ngón tay. Tuy nhiên, các khớp ngón tay trong thiết kế SDM là các khớp cứng, hạn chế độ linh hoạt của các ngón tay khi nắm bắt các đối tượng có hình dạng phức tạp. 

Bàn tay nhân hình bằng khí nén: Bàn tay này sử dụng các khoang bơm hơi bằng khí nén để kích hoạt các liên kết cứng [20]. Hoạt động của bàn tay này tương tự như bàn tay sẽ được nghiên cứu bởi các tác giả. Nhưng bàn tay này sử dụng các liên kết cứng như các bản lề để tạo chuyển động cho các ngón tay. Tuy nhiên, thiết kế này làm giảm khả năng tương thích với các đối tượng có hình dáng gồ ghề trong quá trình nắm, bắt và giữ đối tượng.

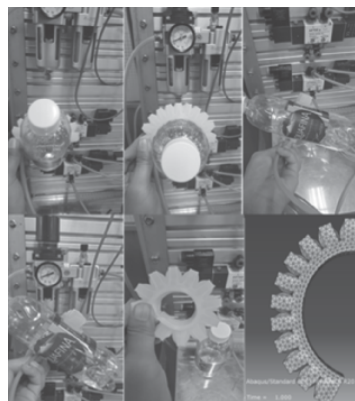
Bộ kẹp áp suất dương: Bộ kẹp áp suất dương [20] bao gồm một quả bóng cao su chứa đầy cả phê xay, mà pha của nó có thể được thay đổi từ chất lỏng sang chất rắn bằng cách hút chân không. Khi ở pha lỏng, bộ kẹp có thể phù hợp với hình dạng tương đối các vật nhỏ hoặc mỏng, chẳng hạn như đồng xu, ốc vít và bút. Tuy nhiên, bộ kẹp này cần các mặt phẳng tựa để hoạt động và nó không thể gấp các vật thể một cách tự do như bàn tay mềm được thiết kế trong bài báo.

Bàn tay Awi: Các chuyển động các ngón tay của bàn tay này đạt được thông qua một hệ thống truyền động đối kháng được điều khiển bằng gân [21]. Nó có lẽ là bàn tay robot nhân hình có khả năng như bàn tay người nhất được xây dựng cho đến ngày nay. Tuy nhiên, về mặt cơ học nó rất phức tạp, đắt tiền và đòi hỏi sự kiểm soát phức tạp.

3. THIẾT KẾ NGÓN TAY ROBOT MỀM

Bộ truyền động mềm liên tục được dùng như các ngón tay trong bài báo này được lấy cảm hứng từ bộ truyền động PneuNet [22]. Cơ cấu công tác mềm này hoạt động dựa trên nguyên lý bộ truyền động không đồng nhất của hai vật liệu có độ đàn hồi khác nhau giống như nguyên lý hoạt động của thiết bị nhiệt lượng kim. Nguyên lý hoạt động và một số kết quả

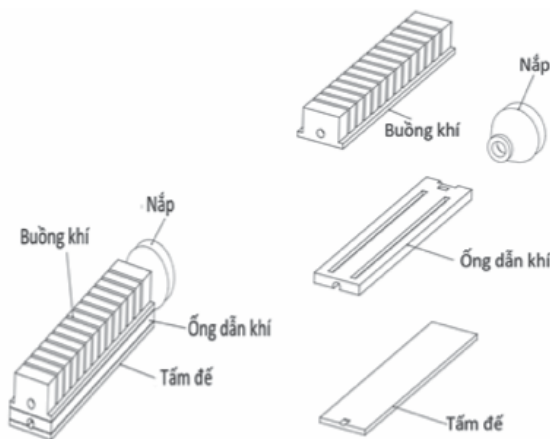
mô phỏng số của bộ truyền động mềm liên tục được thể hiện trong Hình 1. Hai lớp tấm vật liệu khác nhau được ghép vào nhau. Một quá trình vật lý, trong trường hợp nghiên cứu của bài báo là áp suất khí nén, làm cho hai lớp vật liệu biến dạng dài khác nhau, lớp thụ động kéo dài ít hơn so với lớp đang hoạt động. Điều này làm cho bộ truyền động bị uốn cong, như được hiển thị trong Hình 1. Áp suất càng tăng thì độ uốn cong và lực càng cao, điều này cho phép cơ cấu mềm có thể kẹp chặt các vật thể có hình dạng khác nhau như được mô tả trong Hình 1. Bài báo này sử dụng các cơ cấu mềm liên tục này để làm các ngón tay của bàn tay con người. Khi thiết kế ngón tay mềm, nghiên cứu này đã xem xét các yêu cầu sau: (1) Ngón tay có thể cầm, nắm và xử lý các vật nhỏ và dễ vỡ, ngón tay phải càng mềm càng tốt theo quan điểm cấu trúc của ngón tay người; (2) Các đường dẫn khí để cung cấp khí nén khi uốn cong để cầm vật thể và đường xả khí khi nhả vật thể phải được thiết kế tách biệt. Diện tích mặt cắt ngang của đường hút phải lớn để cung cấp đủ tốc độ dòng chảy của khí nén; (3) Nhằm thích ứng với các kích thước vật thể khác nhau, ngón tay có thể điều khiển uốn cong đến một độ biến dạng nhất định; (4) Ngón tay được thiết kế bằng phương pháp đúc cho thuận lợi việc chế tạo và giảm giá thành sản phẩm.



Hình 1. Ngón tay mềm - nguyên lý uốn cong: thực nghiệm và mô phỏng

Cấu trúc của ngón tay mềm được nghiên cứu trong bài báo được trình bày như trong Hình 2. Ngón tay mềm bao gồm 04 bộ phận chính: buồng chứa khí nén, ống dẫn khí, nắp và tấm đế.

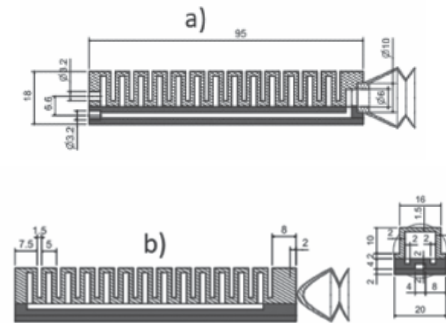
Để thỏa mãn các yêu cầu thiết kế như bài báo đã đề cập, ngón tay mềm được thiết kế trong bài báo có kích thước $95 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ ($L \times W \times H$), kích thước này nhỏ hơn một chút so với ngón tay của con người trung bình. Khoảng buồng khí được thiết kế có độ dày 2 mm như trong Hình 3a. Theo [22], nếu khoảng cách giữa các khoang khí liền kề nhau càng nhỏ thì biến dạng uốn của ngón tay xảy ra càng dễ dàng hơn. Để thỏa mãn yêu cầu này, ngón tay mềm trong bài báo được thiết kế có khoảng cách giữa hai buồng liền kề là 1,5 mm. Các khoang khí chứa hai đường dẫn khí nạp và xả. Như thể hiện trong Hình 3b, hai đường dẫn khí được thiết kế có kích thước mặt cắt ngang $(2 \times 2) \text{ mm}$ để đảm bảo đủ lưu lượng khí nén. Các phần nắp được sử dụng để bịt kín đường dẫn khí có độ dày 2 mm.



Hình 2. Cấu trúc của ngón tay mềm khí nén

Các đường dẫn khí có cấu trúc tương đối đơn giản và điều này cho phép chế tạo được ngón tay được dễ dàng. Bởi vì rò rỉ không khí nén rất dễ xảy ra trong quá trình nén không khí

hơn là quá trình hút nên sự kết nối của buồng làm việc và các đường dẫn khí cần phải được làm kín tốt. Các buồng được thiết kế với đỉnh hẹp và đáy rộng, mỗi bên rộng hơn 2 mm so với bề mặt trên để dễ dàng lắp ghép trên bao tay để làm bàn tay nhân tạo.



Hình 3. Các kích thước cơ bản của ngón tay mềm

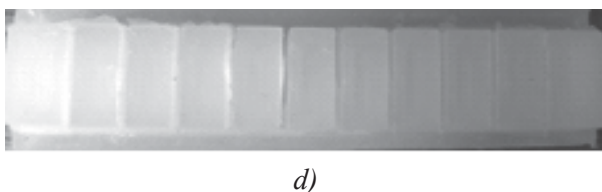
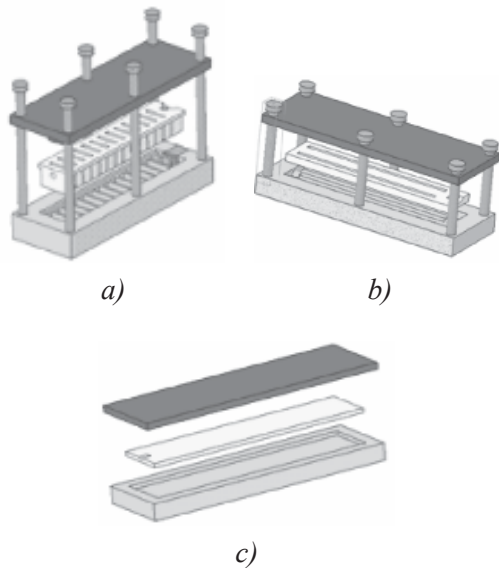
4. CHẾ TẠO NGÓN TAY MỀM

Ngón tay mềm được chế tạo theo quy trình đúc truyền thống. Vật liệu được dùng để chế tạo ngón tay mềm trong bài báo này là silicon lỏng (Dragon Skin 30), là hỗn hợp của hai chất khác nhau được pha chế theo tỉ lệ 50:50 như được trình bày trong Hình 4. Khuôn đúc được chế tạo bằng phương pháp in 3D như được trình bày như trong Hình 5. Quá trình chế tạo được chia thành nhiều bước liên tiếp nhau. Hỗn hợp silicon sau khi trộn được đưa vào buồng hút chân không để khử các bọt khí. Sau khi khử khí, silicon lỏng được đổ vào khuôn đúc buồng khí như Hình 5a, khuôn đúc ống dẫn khí như Hình 5b, và khuôn đúc tấm đế như Hình 5c. Các khuôn chứa đầy silicon lỏng được đặt vào buồng chân không để khử khí lần nữa. Các khuôn đúc này được đặt nơi thoáng mát để cho silicon lỏng hóa rắn. Quá trình hóa rắn của hỗn hợp silicon lỏng này kéo dài 8 h. Sau khi vật liệu hóa rắn thì buồng, đường dẫn khí và tấm lần lượt được tháo ra. Ba phần riêng biệt sau đó được kết dính, dán chồng lên nhau

nhờ sử dụng cùng một loại silicon lỏng đã sử dụng. Ngón tay mềm sau khi hoàn thiện được trình bày như trong Hình 5d. Nó bao gồm nhiều khoang khí liên tiếp nhau.



Hình 4. Silicon Dragon Skin 30

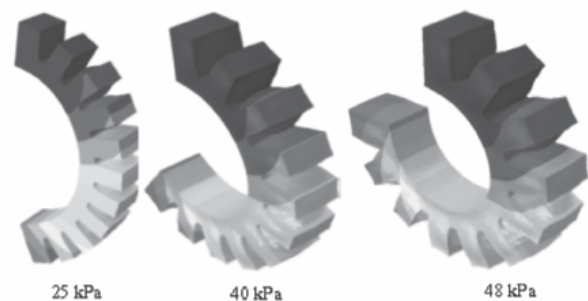


Hình 5. Phương pháp chế tạo: a) Khuôn đúc buồng khí, b) Khuôn đúc ống dẫn khí, c) Khuôn đúc tấm đế

5. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

Trong nghiên cứu này, phương pháp phần tử hữu hạn (FE) được sử dụng để mô

phỏng quá trình biến dạng đàn hồi của ngón tay mềm, đồng thời xác định khoảng áp suất làm việc tốt cho ngón tay mềm. Phương pháp FE được xem là giải pháp tương đối chính xác để tái tạo hành vi biến dạng của các vật thể có thể biến dạng và thường được sử dụng để mô hình hóa và mô phỏng cơ cấu mềm [17, 18]. Trong nghiên cứu này, phần mềm thương mại Abaqus (SIMULIA, Dassault System, MA) được sử dụng để mô phỏng hoạt động của ngón tay. Vật liệu Dragon Skin 30 (DS30, Smooth-on Inc., PA) được sử dụng để làm mô hình mô phỏng hoạt động của ngón tay mềm. Theo [21], DS30 có thể được xem như là một loại cao su siêu đàn hồi, mô hình số vật liệu của DS30 sử dụng mô hình Yeoh và các hệ số của mô hình vật liệu cụ thể là: $C_{10} = 3,6 \times 10^{-2}$ MPa, $C_{20} = 2,58 \times 10^{-4}$ MPa và $C_{30} = -5,6 \times 10^{-7}$ MPa. Mô hình FE của ngón tay được ghép lưới từ các phần tử lai tứ diện bậc hai 10 nút (C3D10H) và kích thước của phần tử lưới là 1 mm. Trọng lực cũng được đưa vào mô phỏng và khối lượng riêng của vật liệu được đưa vào mô hình mô phỏng là 1.070 kg/m^3 cho DS30. Điều kiện biên về áp lực được đặt trên các bề mặt tương ứng và lực tương tác do sự tiếp xúc giữa các bề mặt cũng được xem xét trong quá trình mô phỏng. Kết quả mô phỏng về sự uốn cong của ngón tay được thể hiện trong Hình 6. Ngón tay uốn cong gần 180° ở áp suất 48 kPa, và độ cong tăng dần về phía đầu mút. Khi áp suất cung cấp giảm thì độ cong của ngón tay mềm cũng giảm.



Hình 6. Mô phỏng số ngón tay mềm khí nén

Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng khi có áp suất khí nén cung cấp thì ngón tay mềm nhân tạo silicon sẽ co giãn, áp suất càng lớn thì độ uốn cong càng lớn, đồng thời lực tạo ra cũng lớn hơn. Điều này cho phép có thể thiết kế chế tạo bàn tay nhân tạo từ vật liệu mềm. Khi có áp suất khí nén cung cấp, các cơ cấu mềm co giãn phỏng sinh học như bàn tay của con người.

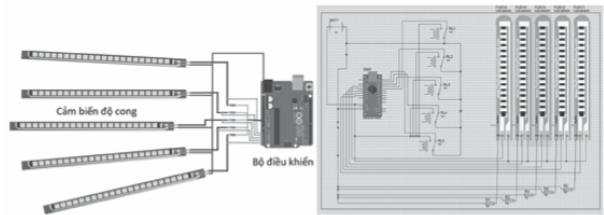
6. THIẾT KẾ BÀN TAY NHÂN TẠO

Bàn tay nhân tạo trong bài báo được thiết kế dưới dạng bao tay nhằm hỗ trợ cho các người khuyết tật mất khả năng cầm, giữ hoặc nắm bắt các đồ vật. Hệ thống này gồm hai bao tay: một bao tay có nhiệm vụ điều khiển, bao tay còn lại có chức năng như là cơ cấu công tác. Người khuyết tật mang bao tay điều khiển mà trên đó có lắp đặt các cảm biến độ cong để điều khiển bàn tay nhân tạo. Trên mỗi ngón tay trên bao tay điều khiển có trang bị các cảm biến cảm nhận sự uốn cong được sắp xếp trên từng ngón tay như trong Hình 7. Khi người sử dụng muốn uốn cong ngón tay nào ở bao tay công tác thì cảm biến cảm nhận độ cong ngón đó ở bao tay điều khiển được kích hoạt. Tín hiệu từ cảm biến độ cong sẽ phản hồi về bộ điều khiển để cung cấp tín hiệu mở van khí nén, cho phép dòng khí nén vào khoang khí của ngón tay mềm tương ứng. Dưới tác dụng của áp suất khí nén, ngón tay mềm bị uốn cong sẽ giúp cho người sử dụng gắng tay có thể cầm, bắt lấy đồ vật.



Hình 7. Bàn tay với các cảm biến độ cong

Sơ đồ kết nối các cảm biến cong và bộ điều khiển được trình bày như Hình 8. Các sợi dây nguồn được cố định ở một đầu của cảm biến độ cong.



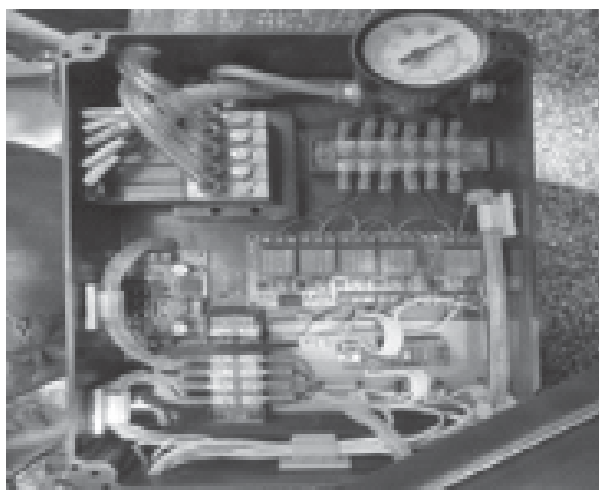
Hình 8. Mạch điện điều khiển các cảm biến độ cong

Dây cáp mang điện dương thì cần thiết phải hàn thêm điện trở 10 Ohm để tăng trở kháng. Ở đầu kia của điện trở, chân còn lại được nối vào trung tâm điều khiển. Dây còn lại của các cảm biến độ cong được nối vào chân GND của mạch Arduino như được trình bày trong Hình 8.

Hệ thống điều khiển, bao tay điều khiển và bàn tay nhân tạo đã được chế tạo hoàn thiện trong nghiên cứu này và được trình bày như trong Hình 9. Hình 9a trình bày tủ điều khiển và các hệ thống van khí nén. Hình 9b trình bày bao tay điều khiển có trang bị các cảm biến độ cong. Các ngón tay mềm và cảm biến độ cong được đặt dưới lớp da găng tay. Các vật liệu cách điện được sử dụng tại tất cả các điểm tiếp xúc để đảm bảo an toàn điện cho người sử dụng. Theo kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn như trình bày trong Hình 6, áp suất khí nén cung cấp cho các cơ cấu mềm được điều chỉnh bởi bộ ổn áp khí nén ở giá trị 40 kPa để ngón tay có thể uốn cong với góc gần 150°. Với giá trị áp suất khí nén này, bàn tay có thể cầm nắm các vật có khối lượng đến 2 kg. Mã chương trình được thiết lập để điều khiển các ngón tay thông qua các cảm biến độ cong. Tần số đáp ứng của từng cảm biến được xác định thông qua thực nghiệm. Các tần số hoạt động của các cảm biến



độ cong trong nghiên cứu này lần lượt là 180 Hz, 214 Hz, 250 Hz, 263 Hz và 189 Hz.



a) Tủ điều khiển và hệ thống van

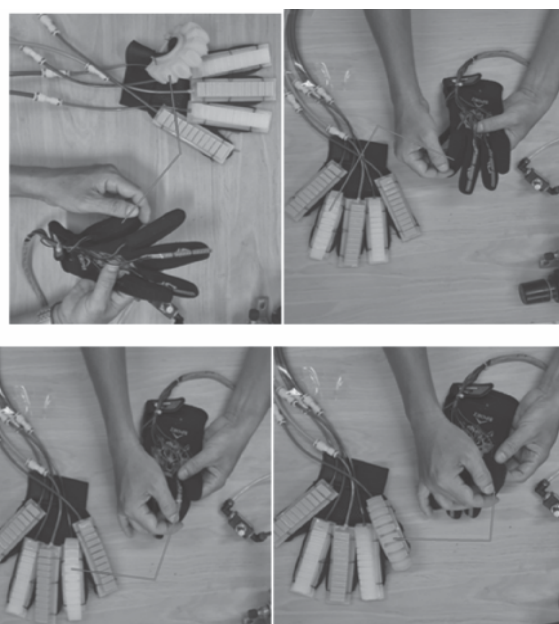


b) Bao tay điều khiển

Hình 9. Bộ điều khiển và bàn tay điều khiển

7. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Hình 10 trình bày kết quả thực nghiệm khi bàn tay nhân tạo được điều khiển từng ngón tay riêng biệt. Thời gian đáp ứng để điều khiển làm cong các ngón tay khi người điều khiển tác động uốn cong cảm biến được xác định từ thực nghiệm là khoảng 100 ms. Thời gian đáp ứng này được đánh giá là phù hợp cho sự vận hành bàn tay nhân tạo.

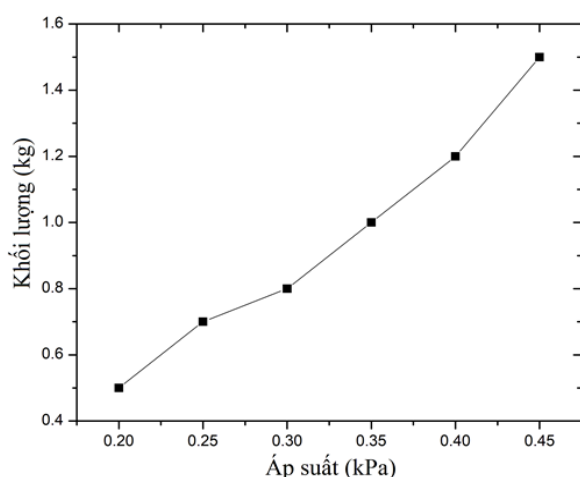


Hình 10. Kết quả thực nghiệm điều khiển từng ngón tay

Khi các cảm biến độ cong trên bao tay điều khiển được kích hoạt thì ngón tay tương ứng với cảm biến đó được cung cấp khí nén và uốn cong. Điều này cho phép người sử dụng bao tay nhân tạo có thể điều khiển được từng ngón tay. Hình 11 trình bày các kết quả thực nghiệm dùng bàn tay nhân tạo cầm và giữ vật thể. Thao tác nắm, giữ các đồ vật được thực hiện nhanh chóng và dễ dàng chứng tỏ tính hiệu quả cao của bàn tay nhân tạo này. Khi bao tay điều khiển được làm cong các cảm biến thì bàn tay nhân tạo thực hiện thao tác cầm, nắm vật thể.



Hình 11. Kết quả thực nghiệm của bàn tay nhân tạo cầm, nắm các đồ vật khác nhau



Hình 12. Khối lượng vật nâng tương ứng với áp suất

Bàn tay nhân tạo được thử nghiệm để người sử dụng nâng các vật có khối lượng khác nhau tương ứng với áp suất cung cấp. Kết quả thực nghiệm được trình bày như trong Hình 12. Nếu áp suất cung cấp cho các ngón tay mềm khoảng 0,45 kPa thì bàn tay nhân tạo có thể nắm chắc vật có khối lượng đến 1,5 kg.

8. KẾT LUẬN

Bài báo này đã giới thiệu một chiếc găng tay robot mềm nhằm mục đích kết hợp hỗ trợ các hoạt động sinh hoạt hàng ngày tại nhà và phục hồi chức năng cho người khuyết tật tay. Thiết bị truyền động mềm khí nén nhiều đoạn được thiết kế và chế tạo bằng cách sử dụng vật liệu đàn hồi. Bộ truyền động mềm đã chứng minh khả năng cầm, nắm và giữ các vật thể có hình thù đa dạng. Trong tương lai, các cảm biến mới được tích hợp vào găng tay và điều khiển thông qua sóng điện não được sử dụng để cải thiện sự tương tác giữa người và thiết bị để tăng khả năng hỗ trợ người khuyết tật. ❖

Ngày nhận bài: 12/5/2022

Ngày phản biện: 24/5/2022

Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. V. Martinez, J. L. Branch, C. R. Fish, L. Jin, R. F. Shepherd, R. M. Nunes, Z. Suo, G. M. Whitesides; "Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers". Adv. Mater. 2013, 25, 205.
- [2]. S. A. Morin, R. F. Shepherd, S. W. Kwok, A. A. Stokes, A. Nemiroski, G. M. Whitesides; "Camouflage and Display for Soft Machines". Science 2012, 337, 828.
- [3]. S. Wakimoto, K. Suzumori, K. Ogura; "Miniature Pneumatic Curling Rubber Actuator Generating Bidirectional Motion with One Air-Supply Tube". Adv. Rob. 2011, 25, 1311.
- [4]. H. Lee, C. G. Xia, N. X. Fang; "First jump of microgel; actuation speed enhancement by elastic instability". Soft Matter 2010, 6, 4342.
- [5]. D. Rus and M. T. Tolley; "Design, fabrication and control of soft robots". Nature, vol. 521, no. 7553, 2015, pp. 467–475.
- [6]. F. Carpi, S. Bauer, D. De Rossi; "Stretching Dielectric Elastomer Performance". Science 2010, 330, 1759.
- [7]. G. Kofod, W. Wirges, M. Pajananen, S. Bauer; "Energy minimization for self-organized structure formation and actuation". Appl. Phys. Lett. 2007, 90, 081916.
- [8]. B. Mosadegh, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, S. A. Morin, U. Gupta, I. Z. Sani, D. Lai, S. Takayama, and G. M. Whitesides; "Control of soft machines using actuators operated by a braille display". Lab Chip, vol. 14, no. 1, pp. 189–199, 2014.
- [9]. G. Gerboni, A. Diodato, G. Ciuti, M. Cianchetti, A. Menciassi; "Feedback control of soft robot actuators via commercial flex bend sensors". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume: 22, Issue: 4, Aug. 2017, pp. 1881 – 1888.
- [10]. Y. She, C. Li, J. Cleary, H.J. Su; "Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors". J. Mech. Robot. 7 (2), 2015.



- [11]. Y. L. Park, B.-R. Chen, and R. J. Wood; “*Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors*”. IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 8, pp. 2711–2718, Aug 2012.
- [12]. H. Rodrigue, W. Wang, Min-Woo Han, Thomas J. Y. Kim, and Sung-Hoon Ahn; “*An Overview of Shape Memory Alloy-Coupled Actuators and Robots*”. SOFT ROBOTICS, Volume 00, Number 00, 2017.
- [13]. R. Deimel, O. Brock; “*A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping*”. Int. J. Rob. Res., 2016; 35, pp.161–185.
- [14]. H. Zhao, K. O’Brien, S. Li, R. F. Shepherd; “*Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides*”. Sci. Rob., 2016.
- [15]. E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeikac, E. Steltz, M. R. Zakind et al.; “*Universal robotic gripper based on the jamming of granular material*”. Proc. Natl. Acad. Sci. 2010;107: 18809–18814.
- [16]. S. Heo, T. Wiguna, H. C. Park, N. S. Goo; “*Effect of an artificial caudal fin on the performance of a biomimetic fish robot propelled by piezoelectric actuators*”. J. Bionic Eng., 2007;4(3).
- [17]. S. Masmoudi, A. El Mahi, S. Turki; “*Use of piezoelectric as acoustic emission sensor for in situ monitoring of composite structures*”. Compos. Part B Eng. 2015.
- [18]. W. Wang, H. Rodrigue, S. H. Ahn; “*Deployable soft composite structures*”. Sci. Rep., 2016.
- [19]. V.L. Roger, A.S. Go, D.M. Lloyd-Jones, E.J. Benjamin, J.D. Berry, W.B. Borden, et al.; *Heart disease and stroke statistics-2012 update, a report from the American Heart Association*, Circulation 125 (2012) e2–e220.
- [20]. S. Ueki, H. Kawasaki, S. Ito, Y. Nishimoto, M. Abe, T. Aoki, et al.; *Development of a hand-assist robot with multi-degrees-of-freedom for rehabilitation therapy*. IEEE/ASME Trans. Mechatronics 17 (2012) 136–146.
- [21]. E. Carmeli, S. Peleg, G. Bartur, E. Elbo, J.J. Vantine; *HandTutor™ enhanced hand rehabilitation after stroke-a pilot study*. Physiother. Res. Int. 16 (2011) 191–200.
- [22]. S. Ueki, Y. Nishimoto, M. Abe, H. Kawasaki, S. Ito, Y. Ishigure, et al.; *Development of virtual reality exercise of hand motion assist robot for rehabilitation therapy by patient self-motion control*, in: 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2008, EMBS 2008, 2008, pp. 4282–4285.