

XÁC ĐỊNH ĐẶC TRƯNG CƠ TÍNH CỦA VẬT LIỆU SIÊU ĐÀN HỒI VÀ TỰ ĐỘNG TÍNH TOÁN TAY GẤP MỀM CHO ROBOT

DETERMINATION OF HYPER-ELASTIC MATERIAL PARAMETERS AND AUTOMATIC COMPUTATION FOR THE SOFT-ROBOTIC GRIPPER

Phùng Văn Bình^{1*}, Nguyễn Quốc Anh¹, Nguyễn Trọng Hoàng¹,
Trần Anh Vàng¹, Đặng Hoàng Minh²

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp xác định cơ tính vật liệu và tự động tính toán kết cấu tay gấp mềm robot. Mô hình Yeoh được sử dụng để mô tả cơ tính của vật liệu siêu đàn hồi silicon để chế tạo ngón tay mềm. Thông số của vật liệu được xác định trên cơ sở thực nghiệm kéo các mẫu thử. Chương trình tính toán tự động đã được xây dựng trên nền ngôn ngữ Python tích hợp với Abaqus/CAE để phân tích kết cấu ngón tay mềm. Chương trình tính toán được xây dựng đã cho phép khảo sát sự ảnh hưởng của các tham số hình học đến độ cong của tay gấp một cách nhanh chóng và thuận lợi. Sự tương đồng giữa độ uốn ngón tay mềm thu được nhờ mô phỏng và thực nghiệm chứng tỏ tính đúng đắn của thông số vật liệu tìm được và chương trình tính toán tự động. Kết quả nghiên cứu là tiền đề quan trọng cho việc tối ưu hóa thiết kế tay gấp mềm.

Từ khóa: Tay gấp mềm robot, vật liệu siêu đàn hồi, tự động tính toán, Python Script, Abaqus/CAE.

ABSTRACT

The article presents a method for the determination of hyper-elastic material parameters and automatic structural computation of the soft-robotic gripper. The Yeoh constitutive model is used to describe the mechanical properties of hyper-elastic materials for fabricating soft fingers. Material properties are identified by using tensile experiments of the work-pieces. The Python-Abaqus/CAE script for automatic calculation of the soft-finger is developed. The proposed method allows estimating the effect of geometric parameters on gripper curvature quickly and smoothly. The similarity between soft finger bending angles obtained by simulation and experiment demonstrates the correctness of the found material parameters and the developed program. The research results play a meaningful role in the optimization design of soft gripper.

Keywords: Soft-robotic gripper, hyper-elastic material, automatic computation, Python Script, Abaqus/CAE.

¹Khoa Hàng không vũ trụ, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 11/3/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/4/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2021

1. GIỚI THIỆU

Tay gấp - một bộ phận quan trọng của robot để kẹp, giữ các đối tượng là đối tượng thú vị thu hút nhiều nhà nghiên

cứu trong nước và thế giới [1]. Các tay gấp (cứng) truyền thống chủ yếu được sử dụng để kẹp những đối tượng có độ cứng cao, ít biến dạng, có hình dạng tiêu chuẩn như vật hình trụ, hình cầu, hình hộp chữ nhật,... và có kích thước xác định. Khi cần kẹp, giữ các vật dễ vỡ, vật mềm, vật có hình dáng kích thước không xác định thì việc sử dụng tay gấp truyền thống trở lên không còn phù hợp. Để khắc phục hạn chế này, những năm gần đây xuất hiện một xu thế mới đó là sử dụng các cấu hình tay gấp mềm để thay thế tay gấp truyền thống [2]. Xét về phương pháp truyền động, tay gấp mềm được chia thành các dạng chính là tay gấp dẫn động bằng thủy lực và khí nén [3], tay gấp điều khiển bằng dây [4, 5], tay gấp mềm làm từ hợp kim nhớ hình được dẫn động bởi nhiệt [6], tay gấp mềm chế tạo từ vật liệu Polyme áp điện [7], cơ cấu đàn hồi tự động tạo hình và lực khi tương tác với vật [8].

Nhờ những ưu điểm như có tính linh hoạt cao, dễ chế tạo và điều khiển tay gấp mềm dẫn động bằng khí nén đã được quan tâm nghiên cứu và phát triển những năm gần đây [9]. Một số cấu hình hình tay gấp mềm khác nhau đã được phát triển dựa trên nguyên lý hoạt động của bạch tuộc [10], tay người [11],... Phần lớn chúng được chế tạo bởi các vật liệu siêu đàn hồi, gồm nhiều ngón tay, mỗi ngón tay được cấu tạo bởi các khoang thông nhau và kết nối với hệ thống khí nén. Điển hình là cấu hình tay gấp mềm mới được phát triển ở Nhật Bản [12] với 3 hoặc 4 ngón tay được chế tạo bằng vật liệu silicon. Cấu hình này đã đạt được thành công bước đầu trong ứng dụng vào thực tế, cụ thể là ứng dụng vào dây truyền đóng gói thực phẩm [13]. Hiệu quả tích cực trong ứng dụng thực tế đã truyền cảm hứng cho rất nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới trong việc hoàn thiện phương pháp tính toán thiết kế, phương pháp chế tạo và thực nghiệm [14], nhằm tối ưu hóa thiết kế các mẫu tay gấp mềm khác nhau [15].

Tuy nhiên, với đặc trưng của vật liệu silicon siêu biến dạng, quá trình tính toán, thiết kế tay gấp mềm thường gặp phải những trở ngại không nhỏ. Một là cần phải xác định mô hình vật liệu phù hợp và các thông số về cơ tính tương ứng của vật liệu siêu đàn hồi. Đây là các thông số đầu vào quan trọng cho quá trình tính toán mô phỏng tay gấp mềm, tuy nhiên lại không được công bố rộng rãi. Điều này

còn đặc biệt quan trọng đối với các nhà nghiên cứu trong nước, khi mà kinh phí nghiên cứu hạn hẹp nên không thể tiếp cận được với các vật liệu silicon chính hãng ở nước ngoài có giá thành rất cao. Ngoài ra, cơ tính của vật liệu cũng bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như quy trình pha trộn thực tế, nhiệt độ phòng thí nghiệm, thời gian và điều kiện bảo quản vật liệu,... Vì vậy, việc xác định cơ tính của vật liệu trong điều kiện thí nghiệm thực tế là rất cần thiết. Vấn đề thứ hai là, do sự phức tạp của kết cấu, quy trình tính toán thiết kế ở hầu hết các công trình đã công bố thường thực hiện theo kinh nghiệm, theo nguyên tắc thử - sai. Đầu tiên, mô hình 3D tay gắp được xây dựng trên một phần mềm CAD (ví dụ Solidwords, Inventor), tiếp theo mô hình được chuyển sang phần mềm CAE chuyên dụng (như Ansys, Abaqus) để tính toán phân tích kết cấu. Dựa vào kết quả tính toán phân tích, mô hình CAD được điều chỉnh và quá trình được lại cho đến khi có được phương án thiết kế đạt yêu cầu. Quy trình thiết kế theo kiểu thử sai như vậy gây tốn thời gian, công sức mà lại không thể tìm được phương án thiết kế tối ưu.

Để khắc phục những tồn tại trên, bài báo tập trung giải quyết hai vấn đề. Một là đưa ra quy trình xác định thông số của vật liệu siêu đàn hồi được sử dụng để chế tạo tay gắp mềm. Hai là để phát triển chương tính toán tay gắp mềm trên ngôn ngữ Python (chương trình tiền xử lý và hậu xử lý) cho phép chỉnh sửa các tham số của mô hình, lập lại quá trình tính toán trên Abaqus/CAE và ghi lại các kết quả một cách tự động [16]. Chương trình tính toán tự động đã loại bỏ được các thao tác lặp đi lặp lại tẻ nhạt, cho phép khảo sát nhiều phương án thiết kế khác nhau một cách nhanh chóng và hiệu quả. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để hoàn thiện và tối ưu hóa thiết kế tay gắp mềm dẫn động bằng khí nén, cũng như có thể áp dụng cho các cấu hình tay gắp mềm khác.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp xác định thông số vật liệu siêu đàn hồi

Có nhiều mô hình tính toán vật liệu siêu biến dạng khác nhau như mô hình Ogden, Mooney-Rivlin, Neo-Hookean, Yeoh. Nhờ tiến hành mô phỏng và so sánh với thực nghiệm công trình chỉ ra mô hình Yeoh là phù hợp để tính toán mô phỏng tay gắp mềm [17]. Mật độ năng lượng biến dạng W theo mô hình Yeoh được thể hiện bởi hệ thức thức [18]:

$$W = \sum_{i=1}^3 C_i \cdot (I_1 - 3)^i \tag{1}$$

ở đây, C_i là các hằng số vật liệu.

Thông số I_1 là thành phần ten-xơ biến dạng thứ nhất và được tính theo công thức:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \tag{2}$$

với $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ là các hệ số tỉ lệ giãn chính của vật liệu.

Các hằng số C_i của mô hình vật liệu silicon sẽ được xác định bằng phương pháp thực nghiệm. Vật liệu silicon được mua từ nước ngoài. Các mẫu thử nghiệm của vật liệu silicon được chế tạo bằng phương pháp đúc. Hai thành phần vật

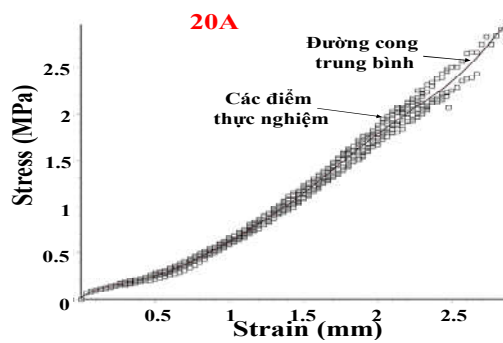
liệu A và B được trộn đều theo tỉ lệ 1:1 theo hướng dẫn của nhà sản xuất và được đổ vào khuôn đúc, sau đó để khô và lấy ra (hình 1). Để đảm bảo độ tin cậy của thực nghiệm, tương ứng với mỗi mã vật liệu có độ cứng khác nhau (theo phân loại của nhà sản xuất là 20A, 25A, 30A, 35A, 40A, 45A) sẽ chế tạo 10 mẫu thử.



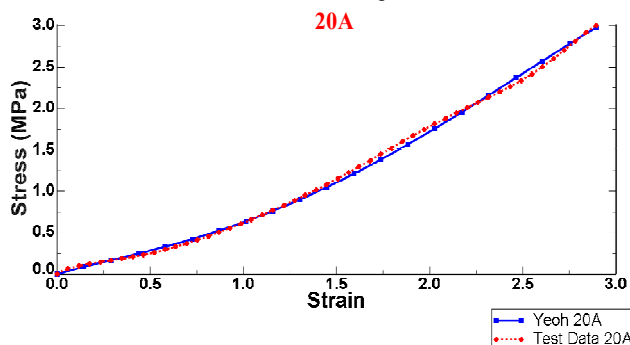
Hình 1. Chế tạo mẫu thử từ các vật liệu khác nhau



Hình 2. Thử nghiệm kéo mẫu thử



a) Kết quả thử nghiệm



b) Đường cong thử nghiệm và theo mô hình Yeoh

Hình 3. Đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu silicon độ cứng 20A

Việc thử nghiệm được thực hiện trên thiết bị thử kéo HLB (Handpi Instruments) cho đến khi các mẫu bị đứt (hình 2). Với mỗi mã vật liệu, 10 mẫu thử đã được thử nghiệm. Kết quả thử nghiệm thử kéo với các mẫu thử vật liệu 20A được thể hiện trên đồ thị (hình 3a). Một đường cong thực nghiệm trung bình đã được xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm.

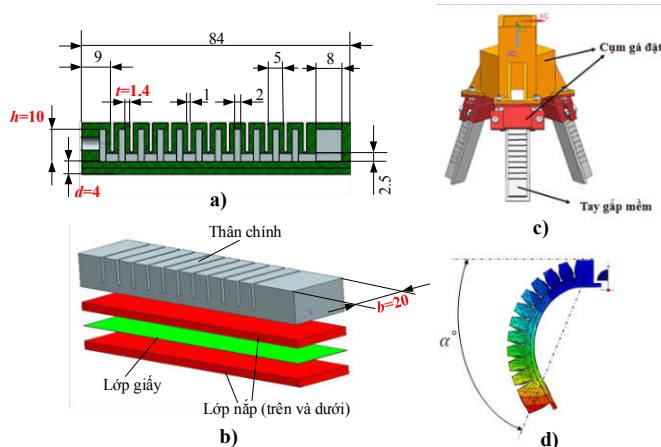
Tiếp đó, dữ liệu của đường cong thực nghiệm trung bình này sẽ được sử dụng để xác định các hệ số của mô hình vật liệu Yeoh nhờ phần mềm Abaqus/CAE [2]. Kết quả so sánh giữa đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu theo mô hình Yeoh và đường cong thực nghiệm cho thấy kết quả sai khác là không nhiều (hình 3b). Điều đó chứng tỏ mô hình Yeoh là hoàn toàn phù hợp để mô tả loại vật liệu silicon này. Quá trình được tiến hành cho 6 mã vật liệu khác nhau, thu được bảng thông số của các mã vật liệu như thể hiện trên bảng 1.

Bảng 1. Các hệ số mô tả vật liệu theo mô hình Yeoh đối với các mã vật liệu khác nhau

Shore A	C_{10}	C_{20}	C_{30}
20A	0,08596033	1,68E-02	-3,19E-04
25A	0,13924758	1,76E-02	-2,25E-04
30A	0,17969929	2,77E-02	-6,39E-04
35A	0,2163127	1,96E-02	4,73E-04
40A	0,20618948	2,01E-02	1,65E-03
45A	0,26854496	1,41E-02	5,80E-03

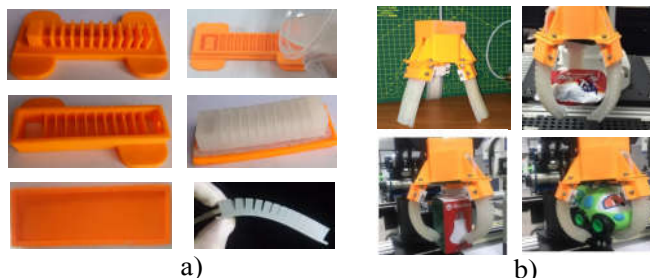
2.2. Phương pháp thiết kế, chế tạo tay gấp mềm

Kích thước của ngón tay mềm tương đương với một ngón tay người trưởng thành. Ngón tay mềm được tạo lên bởi nhiều khoang rỗng thông nhau và kết nối với hệ thống khí nén (hình 4a,b). Cụm tay gấp thường được cấu tạo từ 3-4 ngón tay mềm (hình 4c). Do sự phức tạp của kết cấu và vật liệu, hoạt động của tay gấp mềm thường được mô phỏng nhờ phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong môi trường Abaqus/CAE hoặc Ansys. Độ cong được đặc trưng bởi góc uốn α là thông số thường được sử dụng để đánh giá khả năng làm việc của của ngón tay mềm (hình 4d).



Hình 4. Thiết kế, mô phỏng tay gấp mềm
a) Kích thước; b) Cấu tạo; c) Cụm tay gấp; d) Biến dạng của ngón tay gấp

Tay gấp mềm thường được chế tạo bằng phương pháp đúc. Khuôn đúc được chế tạo nhờ công nghệ in 3D (hình 5a). Sau khi các ngón tay được chế tạo và kiểm tra, chúng được lắp ráp lại thành cụm tay gấp. Minh họa hình ảnh cụm tay gấp mềm làm việc được thể hiện trên hình 5b. Chi tiết về các bước thiết kế, xây dựng mô hình tính toán và chế tạo tay gấp mềm đã nhóm tác giả trình bày chi tiết trong các công trình [19, 20].



Hình 5. Quá trình chế tạo, thử nghiệm tay gấp mềm

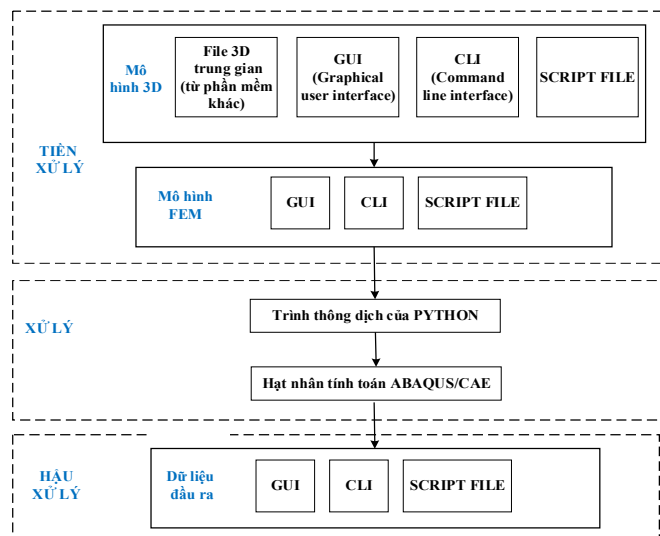
2.3. Phương pháp tự động hóa tính toán thiết kế ngón tay mềm

Trong mục này, nhóm tác giả tập trung trình bày về phương pháp tự động hóa tính toán ngón tay mềm. Quá trình tính toán thiết kế trên các phần mềm FEM nói chung và Abaqus nói riêng thường được phân ra thành ba giai đoạn chính là tiền xử lý, xử lý và hậu xử lý (hình 6). Giai đoạn tiền xử lý gồm các bước xây dựng mô hình hình học và xây dựng mô hình tính toán phần tử hữu hạn. Giai đoạn xử lý gồm bước thông dịch dữ liệu đầu vào và tính ra kết quả. Giai đoạn hậu xử lý là quá trình truy cập, đọc, ghi, sắp xếp và hiển thị kết quả.

Với kết cấu phức tạp được cấu tạo từ vật liệu siêu đàn hồi như tay gấp mềm robot, theo cách tiếp cận truyền thống, giai đoạn tiền xử lý thường sẽ chiếm phần lớn thời gian vì phải chia thành hai bước riêng biệt được thực hiện ở hai phần mềm khác nhau. Bước một là thực hiện mô hình hóa tay gấp trên phần mềm CAD riêng biệt, sau đó chuyển thành file trung gian và đưa vào phần mềm Abaqus. Bước hai là xây dựng mô hình phần tử hữu hạn và thiết lập mô hình tính toán của tay gấp trên phần mềm Abaqus. Ngoài ra, giai đoạn tiền xử lý và hậu xử lý thường thực hiện bằng tay trên giao diện người dùng (graphical user interface GUI) hoặc sử dụng một vài câu lệnh riêng biệt để hỗ trợ (Command line interface-CLI). Với tốc độ trung bình của một kỹ sư, thời gian thực hiện các bước tiền xử lý cho tay gấp là khoảng 35 phút, thời gian tính toán trên Abaqus/CAE là 20 phút (với máy tính cá nhân Core i7, RAM 8Gb) và thời gian hậu xử lý là khoảng 5 phút. Như vậy, tổng thời gian thực hiện phân tích một phương án thiết kế là khoảng 60 phút. Có thể thấy rằng, trong quá trình tính toán, rất nhiều bước phải lặp đi lặp lại, gây tốn thời gian, công sức. Vì vậy với cách tiếp cận truyền thống này không thể khảo sát nhiều phương án thiết kế khác nhau, nhằm tìm ra phương án thiết kế tối ưu cho tay gấp mềm.

Để rút ngắn thời gian thực hiện giai đoạn tiền xử lý và hậu xử lý cho tay gấp, các chương trình tính tự động ở

dạng Script file đã được thiết lập trên ngôn ngữ Python 2.7.3 và được tích hợp với bộ xử lý trên phần mềm Abaqus/CAE, nhờ đó quá trình tính toán phân tích tay gấp đã được thực hiện hoàn toàn tự động. Ở giai đoạn tiền xử lý, chương trình tính toán được thiết lập cho phép tham số hóa mô hình của tay gấp và mô tả đầy đủ các đặc trưng của mô hình FEM như dạng phần tử, kích, thông số vật liệu, điều kiện biên, lực tác dụng và kiểu phân tích. Chương trình tính toán cũng mô tả khoảng giá trị thay đổi của các thông số hình học của tay gấp và cho phép cập nhật bộ thông số mới để tự động tính toán một phương án thiết kế mới. Tiếp theo, file Script sẽ được kết nối trực tiếp với hạt nhân tính toán của Abaqus/CAE nhờ bộ thông dịch của Python để thực hiện quá trình tính toán một cách tự động. Ở giai đoạn hậu xử lý, file Script sẽ được lập trình để tự động đọc kết quả, sắp xếp và ghi kết quả ra ở dạng bảng và dạng đồ thị.



Hình 6. Sơ đồ tính toán

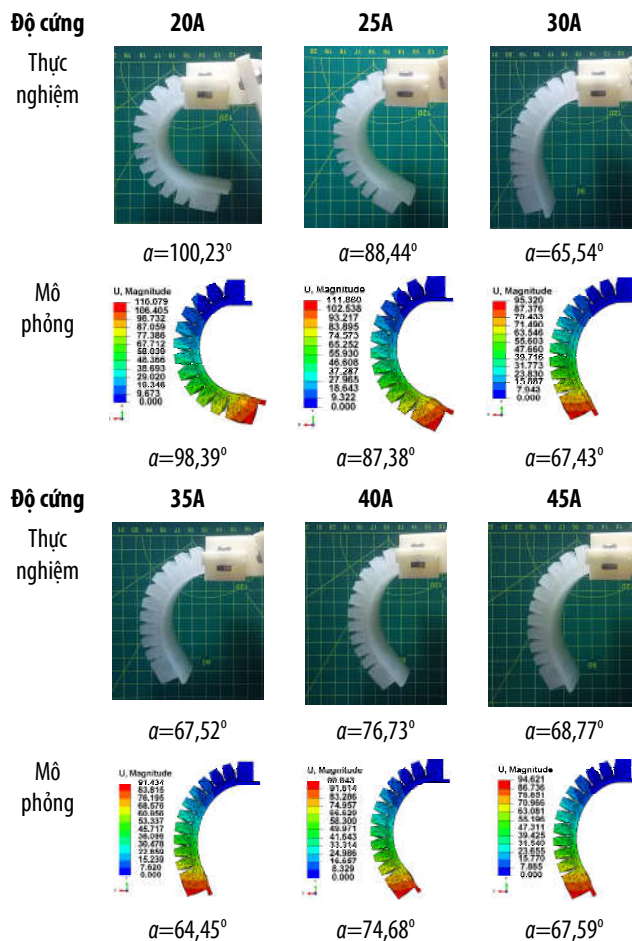
Theo cách tiếp cận mới này, quá trình tính toán được diễn ra một cách liên tục, không gián đoạn và hoàn toàn tự động. Hơn thế nữa, thời gian tiền xử lý và hậu xử lý đã được rút ngắn hoàn toàn, vì vậy tổng thời gian tính toán mô phỏng cho một phương án thiết kế đã rút ngắn chỉ còn khoảng 20 phút (xấp xỉ bằng thời gian của quá trình xử lý). Đồng thời kết quả tính toán cũng được tự động tổng hợp, sắp xếp ở dạng bảng và đồ thị, giúp quá trình đánh giá, phân tích cũng trở nên dễ dàng hơn. Các kết quả tính toán cho tay gấp sử dụng chương trình tính toán tự động sẽ được trình bày ở các mục tiếp theo của bài báo.

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

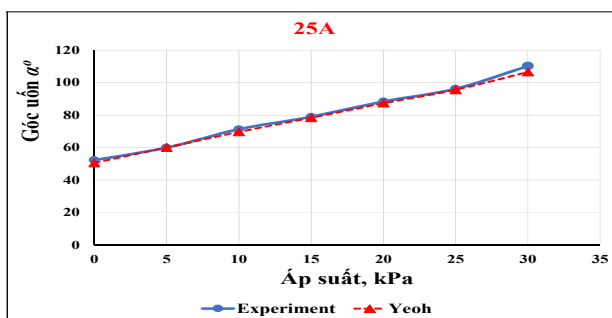
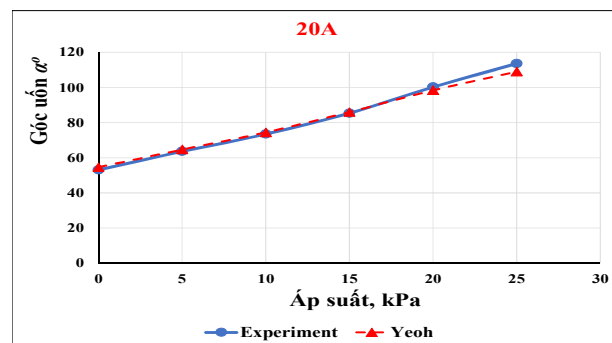
3.1. So sánh kết quả mô phỏng với thực nghiệm

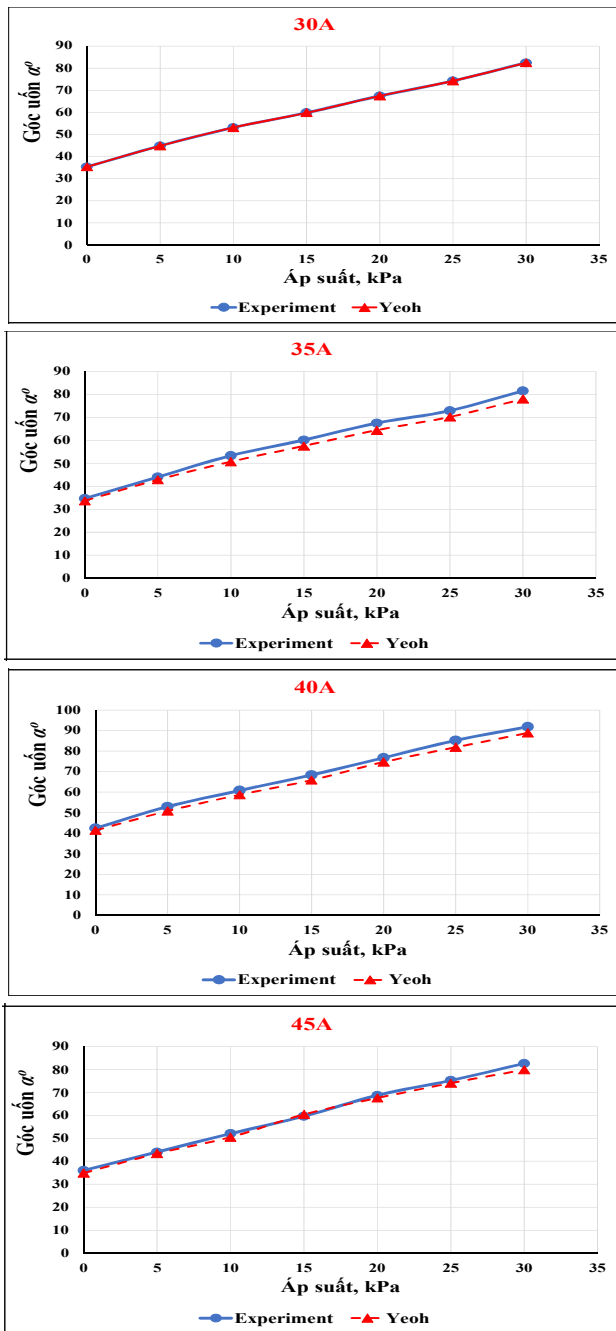
Dựa trên cơ sở chương trình tính toán tự động được thiết lập, việc mô phỏng đã được thực hiện với các ngón tay mềm tương ứng với 6 mã vật liệu khác nhau đã tìm ra ở bảng 1. Song song với đó, 6 mẫu ngón tay mềm tương ứng với các mã vật liệu này cũng được chế tạo thực nghiệm. Kết quả so sánh giữa thực nghiệm và mô phỏng ở áp suất 20kPa được thể hiện trên hình 7. Mỗi liên hệ giữa góc uốn vào áp suất thu được bằng thực nghiệm và mô phỏng được

thể hiện trên hình 8. So sánh cho thấy, sai lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm là không nhiều, chứng tỏ tính đúng đắn của thông số vật liệu và chương trình tính toán.



Hình 7. So sánh biến dạng ngón tay mềm giữa mô phỏng và thực nghiệm ở áp suất 20kPa





Hình 8. Mối liên hệ giữa góc uốn ngón tay mềm và áp suất theo mô phỏng và thực nghiệm

3.2. Phân tích sự phụ thuộc của góc uốn theo các thông số khác nhau

Trong mục này, dựa vào chương trình tính toán tự động cho tay gấp đã được xây dựng, sự phụ thuộc của độ cong tay gấp vào một số tham số kích thước cơ bản ở cùng áp suất (độ cứng vật liệu 25A, áp suất $P = 20\text{kPa}$) sẽ được phân tích, làm rõ. Các kích thước cơ bản được khảo sát là độ rộng khoang b , chiều cao khoang h , chiều dày thành khoang t và độ dày đáy d (hình 4).

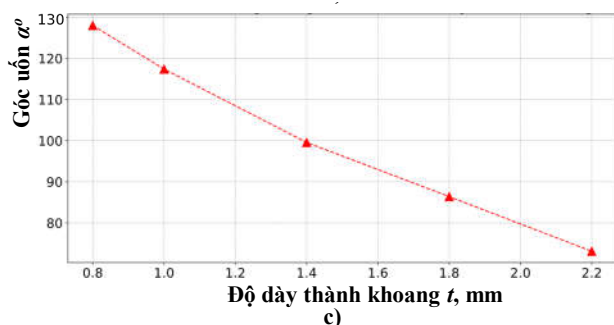
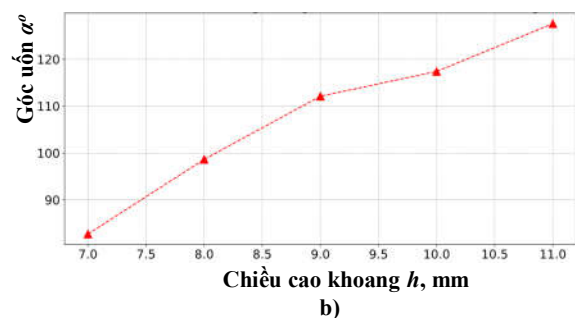
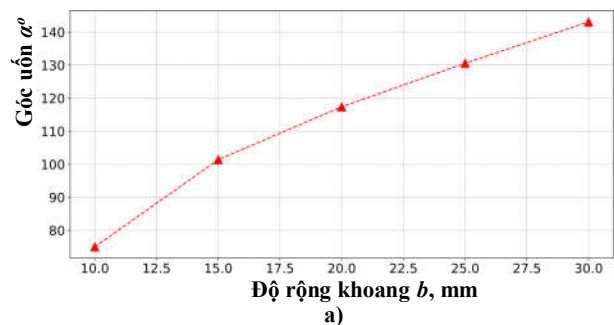
Phân tích tay gấp với độ rộng khoang b trong khoảng 10 - 30mm (hình 9a) cho thấy độ rộng khoang và góc uốn tỷ lệ thuận với nhau. Khi độ rộng khoang tăng, góc uốn

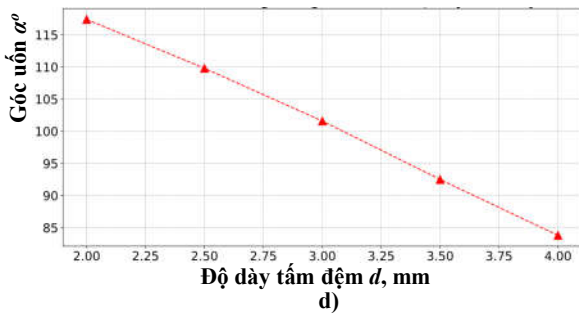
cũng được tăng lên đáng kể. Nguyên nhân là khi tăng độ rộng b , thành khoang dễ bị biến dạng cong hơn dưới tác dụng của áp suất, điều này dẫn đến sự tương tác đẩy nhau giữa các khoang cũng xảy ra rõ rệt hơn.

Phân tích tay gấp với độ rộng khoang h trong khoảng 7 - 11mm (hình 9b) cho thấy chiều cao khoang và góc uốn cũng tỷ lệ thuận với nhau. Nguyên nhân là khi tăng chiều cao h , thành khoang dễ bị biến dạng hơn khi có áp suất, dẫn đến sự tương tác đẩy nhau giữa các khoang cũng được diễn ra rõ rệt hơn.

Phân tích biến dạng của tay gấp khi độ dày thành khoang t (mm) thay đổi trong khoảng 0,8 - 2,2mm cho thấy rằng khi độ dày thành t tăng thì biến dạng và độ cong của tay gấp giảm đi do tay gấp có xu hướng cứng hơn (hình 9c). Do đó để cải thiện góc uốn của tay gấp khi đó độ dày thành khoang (t) cần càng nhỏ càng tốt.

Thay đổi độ dày tấm đáy d trong khoảng 2 - 4mm cho thấy, khi d tăng thì biến dạng và độ cong của tay gấp giảm đi (hình 9d). Điều này cũng phù hợp với lý thuyết vì việc tăng d đã dẫn đến tăng khả năng chống uốn của lớp vật liệu chịu nén. Do đó để cải thiện góc uốn của tay gấp thì độ dày tấm đáy d cần lựa chọn nhỏ nhất có thể theo khả năng chế tạo.





Hình 9. Khảo sát ảnh hưởng của các tham số hình học tới góc uốn tay gấp

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Trong bài báo này, phương pháp xác định cơ tính của vật liệu siêu đàn hồi và phân tích kết cấu tay gấp mềm cho robot được trình bày. Các bộ thông số của mô hình vật liệu theo lý thuyết Yeoh đã được tìm ra bằng phương pháp thực nghiệm cho 6 mức vật liệu silicon có độ cứng khác nhau. Trên cơ sở đó, biến dạng của các ngón tay mềm đã được tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhờ phần mềm Abaqus/CAE. Tiếp đó, các mẫu ngón tay mềm đã được chế tạo bằng phương pháp đúc tương ứng với các mức vật liệu khác nhau và tiến hành thực nghiệm đo độ uốn dưới tác dụng của áp suất khí nén. Sự trùng khớp của kết quả thực nghiệm và mô phỏng đã chứng tỏ các bộ thông số của vật liệu silicon theo mô hình Yeoh được tìm ra là đúng đắn. Vì vậy, các bộ thông số vật liệu tìm được này không chỉ có thể sử dụng để mô phỏng ngón tay mềm mà có thể sử dụng khi tính toán thiết kế các cơ cấu chấp hành mềm khác.

Để nâng cao hiệu quả mô phỏng, một chương trình tính toán tự động cho tay gấp mềm đã được xây dựng trên nền ngôn ngữ Python tích hợp với Abaqus/CAE. Chương trình tính toán được xây dựng đã tự động hóa được quá trình tiền xử lý và hậu xử lý, giúp loại bỏ các thao tác bằng tay lặp đi lặp lại và tăng đáng kể tốc độ tính toán. Nhờ vậy, nhiều phương án thiết kế khác nhau của tay gấp mềm đã được khảo sát một cách thuận lợi. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để lựa chọn phương án thiết kế tối ưu cho tay gấp mềm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Z. Samadikhoshkho, K. Zareinia, F. Janabi-Sharifi, 2019. *A Brief Review on Robotic Grippers Classifications*. 2019 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. CCECE 2019, pp. 1–4, doi: 10.1109/CCECE.2019.8861780.

[2]. D. Rus, M. T. Tolley, 2015. *Design, fabrication and control of soft robots*. Nature, vol. 521, no. 7553, pp. 467–475, doi: 10.1038/nature14543.

[3]. T. Rehman, A. A. M. Faudzi, D. E. O. Dewi, M. S. M. Ali, 2017. *Finite element analysis for PDMS based dual chamber bellows structured pneumatic actuator*. Commun. Comput. Inf. Sci., vol. 751, pp. 392–402, doi: 10.1007/978-981-10-6463-0_34.

[4]. J. R. Bemfica, C. Melchiorri, L. Moriello, G. Palli, U. Scarcia, 2014. *A three-fingered cable-driven gripper for underwater applications*. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), doi: 10.1109/ICRA.2014.6907203.

[5]. E. Coevoet et al., 2017. *Software toolkit for modeling, simulation, and control of soft robots*. Adv. Robot., vol. 31, no. 22, pp. 1208–1224, doi: 10.1080/01691864.2017.1395362.

[6]. Y. Haibin, K. Cheng, L. Junfeng, Y. Guilin, 2018. *Modeling of grasping force for a soft robotic gripper with variable stiffness*. Mech. Mach. Theory, vol. 128, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.005.

[7]. J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, H. Shea, 2016. *Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators*. Adv. Mater., vol. 28, no. 2, doi: 10.1002/adma.201504264.

[8]. J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, F. Iida, 2016. *Soft manipulators and grippers: A review*. Front. Robot. AI, vol. 3, no. NOV, pp. 1–12, doi: 10.3389/frobot.2016.00069.

[9]. W. Huang, J. Xiao, Z. Xu, 2020. *A variable structure pneumatic soft robot*. Sci. Rep., vol. 10, no. 1, pp. 1–15, doi: 10.1038/s41598-020-75346-5.

[10]. C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, P. Dario, 2012. *Soft robot arm inspired by the octopus*. Adv. Robot., vol. 26, no. 7, pp. 709–727, doi: 10.1163/156855312X626343.

[11]. H. Zhang, Y. Wang, M. Y. Wang, J. Y. H. Fuh, A. S. Kumar, 2017. *Design and Analysis of Soft Grippers for Hand Rehabilitation*. 12th Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2017), doi: 10.1115/msec2017-2814.

[12]. Z. Wang, S. Hirai, 2017. *Soft Gripper Dynamics Using a Line-Segment Model With an Optimization-Based Parameter Identification Method*. IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 2, no. 2, pp. 624–631, doi: 10.1109/LRA.2017.2650149.

[13]. Z. Wang, Y. Torigoe, S. Hirai, 2017. *A Prestressed Soft Gripper: Design, Modeling, Fabrication, and Tests for Food Handling*. IEEE Robot. Autom. Lett., vol. 2, no. 4, pp. 1909–1916, doi: 10.1109/LRA.2017.2714141.

[14]. H. K. Yap, H. Y. Ng, C. H. Yeow, 2016. *High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications*. Soft Robot., vol. 3, no. 3, pp. 144–158, doi: 10.1089/soro.2016.0030.

[15]. H. Zhang, A. S. Kumar, J. Y. H. Fuh, M. Y. Wang, 2018. *Design and Development of a Topology-Optimized Three-Dimensional Printed Soft Gripper*. Soft Robot., vol. 5, no. 5, pp. 650–661, doi: 10.1089/soro.2017.0058.

[16]. G. Yi, Y. Sui, J. Du, 2011. *Application of python-based Abaqus preprocess and postprocess technique in analysis of gearbox vibration and noise reduction*. Front. Mech. Eng., vol. 6, no. 2, pp. 229–234, doi: 10.1007/s11465-011-0128-z.

[17]. P. Polygerinos et al., 2013. *Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation*. IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst., pp. 1512–1517, doi: 10.1109/IROS.2013.6696549.

[18]. O. H. Yeoh, 1993. *Some forms of the strain energy function for rubber*. Rubber Chemistry and Technology, vol. 66, no. 5, pp. 754–771, doi: 10.5254/1.3538343.

[19]. N. V. T. Vang Tran Anh, Van Binh Phung, 2019. *Design, Simulation and Fabrication of a Soft Robotic Gripper for Grasping the Objects with an Arbitrary Shape*. 5th Vietnam Int. Conf. Exhib. - VCCA, pp. 1–7.

[20]. H. M. Dang, C. T. Vo, N. T. Trong, V. D. Nguyen, V. B. Phung, 2021. *Design and development of the soft robotic gripper used for the food packaging system*. J. Mech. Eng. Res. Dev., vol. 44, no. 3, pp. 334–345.

AUTHORS INFORMATION

PhungVan Binh¹, Nguyen Quoc Anh¹, Nguyen Trong Hoang¹, Tran Anh Vang¹, Dang Hoang Minh²

¹Faculty of Aerospace Engineering, Le Quy Don Technical University

²Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City