

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ĐỘNG LỰC HỌC QUÁ TRÌNH GẤP CỦA TAY GẤP MỀM RÔ BỐT

Phùng Văn Bình^{1,*}, Nguyễn Trần Hưng¹, Lê Hải Long¹,
Nguyễn Anh Tuấn¹, Trần Anh Vàng¹

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

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp mô phỏng động lực học quá trình gấp-giữ vật của cụm tay gấp mềm rô bốt được chế tạo bằng vật liệu silicon. Các ngón mềm được cấu tạo bởi các khoang rỗng thông nhau và được kích hoạt bằng khí nén. Mỗi ngón tay mềm được mô hình hóa bởi chuỗi các khâu thẳng nối với nhau theo cách tiếp cận động lực học hệ nhiều vật. Thông số động lực học của hệ được xác định nhờ thực nghiệm số trên phần mềm Abaqus/CAE. Mô hình động lực học của cụm tay gấp tích hợp trên tay máy được xây dựng trên phần mềm MSC Adams. Tương tác giữa tay mềm với vật được mô phỏng theo lý thuyết tiếp xúc Hertz. Mô hình được xây dựng cho phép khảo sát khả năng gấp-giữ vật có hình dạng, khối lượng khác nhau với các quy luật chuyển động khác nhau một cách thuận lợi. Mô phỏng cho thấy, cụm tay gấp mềm có thể giữ vật hình cầu và vật thể hình trụ cùng khối lượng 300 g ở mức gia tốc tối đa tương ứng là $9,9 \text{ m/s}^2$ và $3,6 \text{ m/s}^2$. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để hoàn thiện phương án thiết kế, chế tạo cụm tay gấp mềm cho rô bốt.

Từ khóa: Tay gấp mềm rô bốt; động lực học; quá trình gấp; Abaqus/CAE; MSC Adams.

1. Giới thiệu

Tay gấp là một bộ phận quan trọng của rô bốt để kẹp, giữ các vật khác nhau. 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... và có kích thước xác định. Tuy nhiên, khi cần gấp các vật dễ vỡ, vật mềm, vật có hình dáng kích thước không xác định thì việc sử dụng tay gấp truyền thống 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 mới được làm từ vật liệu mềm (có mô đun đàn hồi $E < 100 \text{ MPa}$), thường được gọi là tay gấp mềm [1].

Theo phương pháp truyền động, tay gấp mềm được chia thành một số dạng chính là tay gấp dẫn động bằng thủy lực và khí nén [2], tay gấp điều khiển bằng dây [3], tay gấp mềm làm từ hợp kim ghi nhớ hình dạng được dẫn động bởi nhiệt [4], tay gấp mềm chế tạo từ vật liệu Polyme áp điện [5]. Một số mẫu tay gấp mềm điển hình đã được phát triển dựa

* Email: phungvanbinh@lqdtu.edu.vn

<https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v17.n04.403>

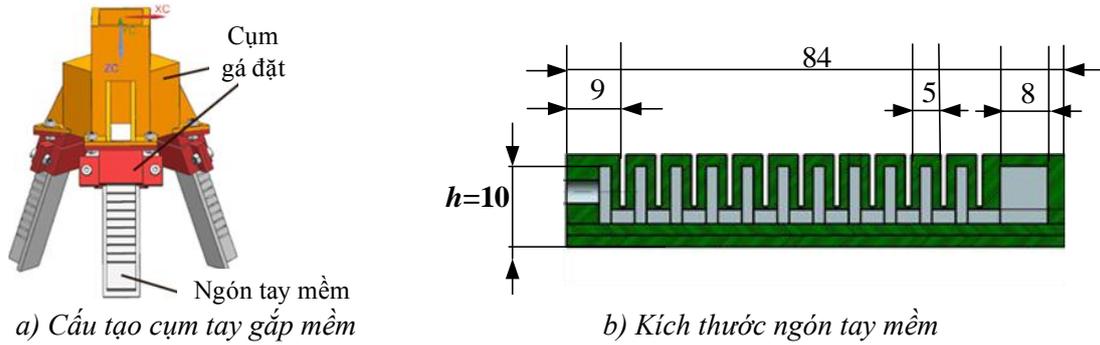
trên nguyên lý hoạt động của bạch tuộc [6], tay người [7],... Phần lớn chúng được chế tạo bởi các vật liệu siêu đàn hồi, gồm nhiều ngón tay, mỗi ngón tay được cấu tạo bởi các khoang thông nhau và kết nối với hệ thống khí nén. Điển hình trong nhóm này là cấu hình tay gấp mềm với 3 hoặc 4 ngón tay được chế tạo bằng vật liệu silicon [8]. Cấu hình này đã đạt được thành công bước đầu trong ứng dụng vào dây truyền đóng gói thực phẩm [9]. 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 [10], phương pháp chế tạo, nhằm tối ưu hóa thiết kế các mẫu tay gấp mềm khác nhau [11].

Ở các công trình đã công bố, hoạt động của tay gấp mềm thường được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Tuy nhiên, với đặc điểm tốn nhiều thời gian và dung lượng bộ nhớ, FEM chỉ thích hợp cho việc mô phỏng biến dạng tĩnh chứ không thích hợp để mô tả quá trình hoạt động của các kết cấu từ vật liệu siêu đàn hồi. Vì vậy, phần lớn các tác giả thường chỉ dừng lại ở việc mô phỏng biến dạng tĩnh của kết cấu tay gấp mềm [12, 13]. Để đáp ứng yêu cầu ngày càng cao của thực tế, nhu cầu ứng dụng tay gấp mềm để gấp các vật nặng hơn, có khả năng di chuyển động ở tốc độ cao hơn để đảm bảo năng suất ngày càng được chú trọng. Để đáp ứng nhu cầu này, vấn đề động lực học quá trình gấp-giữ vật rất cần được quan tâm nghiên cứu. Do sự mới mẻ và tính phức tạp của kết cấu - vật liệu tay gấp mềm, việc xây dựng mô hình động lực học tay gấp mềm vẫn là một bài toán khó đối với các nhà nghiên cứu. Vì vậy, nhiều vấn đề liên quan đến động lực học quá trình gấp vật, tương tác giữa tay gấp mềm với vật vẫn chưa được nghiên cứu làm rõ.

Để dần khỏa lấp khoảng trống trên, nghiên cứu này sẽ tập trung vào động lực học quá trình gấp-giữ vật của tay gấp mềm. Mô hình động lực học tay gấp mềm sẽ được xây dựng theo mô hình chuỗi đoạn thẳng (Line-Segment Model) theo cách tiếp cận động lực học hệ nhiều vật [14, 15]. Các thông số động lực học của tay gấp được tính toán từ mô phỏng kết cấu nhờ phương pháp phần tử hữu hạn và thực nghiệm [8, 12]. Tương tác giữa tay mềm với vật được mô phỏng theo lý thuyết tiếp xúc Hertz [16]. Trên cơ sở đó, quá trình gấp-giữ vật có khối lượng khác nhau ở các tốc độ khác nhau sẽ được nghiên cứu, đánh giá trong môi trường MSC Adams.

2. Xây dựng mô hình động lực học tay gấp mềm

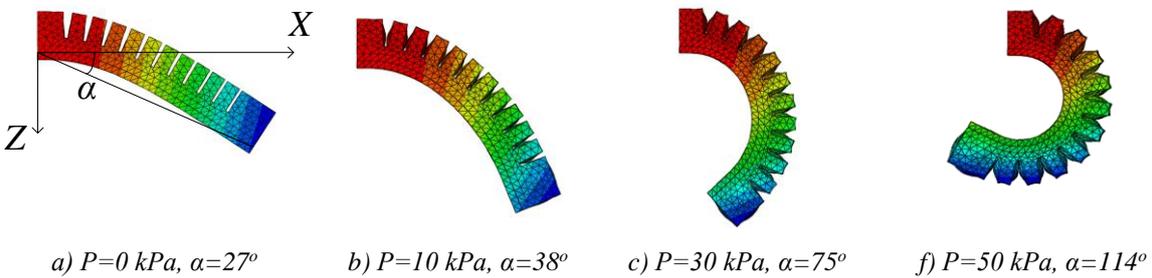
Cụm tay gấp được thiết kế gồm 3 ngón tay mềm với kích thước mỗi ngón tương đương với tay người trưởng thành [8, 12]. Cấu tạo và kích thước của cụm tay gấp mềm được thể hiện trên hình 1. Ngón tay được chế tạo bởi vật liệu Silicone RTV 225, là dạng vật liệu dẻo, đẳng hướng, với khối lượng riêng là 1130 kg/m^3 .



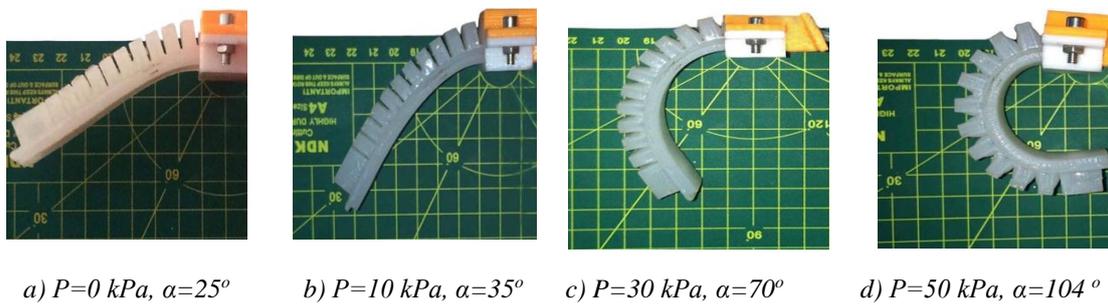
Hình 1. Cấu tạo và kích thước cụm tay gấp mềm.

2.1. Tính toán biến dạng ngón tay mềm

Một trong những đặc tính quan trọng nhất của tay gấp mềm đó là độ cứng. Đặc tính về độ cứng của tay gấp được tính toán thông qua mô phỏng biến dạng nhờ phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm Abaqus/CAE [8, 12].



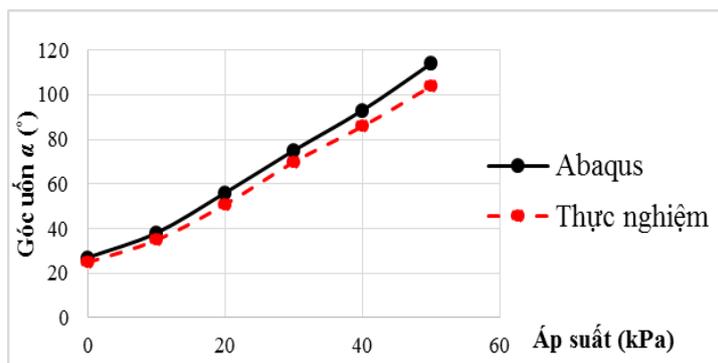
Hình 2. Kết quả mô phỏng góc uốn ngón tay mềm trên phần mềm Abaqus/CAE.



Hình 3. Kết quả thực nghiệm đo góc uốn ngón tay mềm.

Độ cứng của ngón tay mềm sẽ được xác định thông qua độ cong được đại diện bởi góc uốn α . Sự phụ thuộc của góc uốn theo một số giá trị áp suất khác nhau được thể hiện trên hình 2. Kết quả mô phỏng được kiểm tra lại nhờ đo đạc thực nghiệm (Hình 3). Sai lệch giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm là không nhiều (dưới 9%) như được thể hiện ở hình 4.

Áp suất (kPa)	Sai số (%)
0	7,41
10	7,89
20	8,93
30	6,67
40	7,53
50	8,77

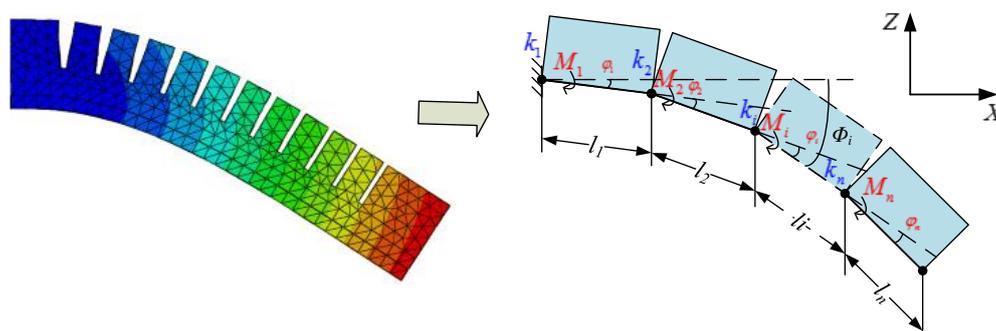


Hình 4. Sai lệch góc uốn tay gấp theo mô phỏng và thực nghiệm.

2.2. Xây dựng mô hình động lực học tay gấp mềm

Ngón tay mềm được mô hình hóa thành chuỗi n khâu cứng tuyệt đối, tương ứng là n đoạn thẳng nối tiếp [14]. Liên kết giữa khâu $i-1$ và khâu i được mô hình hóa thành một khớp bản lề và một lò xo xoắn có độ cứng k_i (Hình 5). Độ cứng k_i của lò xo xoắn sẽ được xác định thông qua độ cứng của kết cấu tay gấp theo tính toán ở mục 2.1 [15, 17]. Hợp lực làm cho ngón tay mềm bị uốn được mô hình hóa thành chuỗi các mô men uốn M_i tác dụng lên các khâu thứ i tương ứng. Giá trị mô men M_i phụ thuộc vào ngoại lực (áp suất, trọng lực,...) tác dụng vào ngón tay. Dưới tác động của mô men M_i , khâu thứ

i quay một góc φ_i (so với khâu $i-1$) và Φ_i so với trục Ox ($\Phi_i = \sum_{j=0}^{j=i} \varphi_j$).



Hình 5. Mô hình động lực học tương đương của ngón tay mềm.

2.2.1. Tính toán độ cứng k_i của lò xo

Ngón tay mềm được mô phỏng biến dạng nhờ phần mềm Abaqus/CAE với điều kiện biên như sau: Ngón tay mềm được xét ở môi trường không trọng lượng, một đầu ngón tay bị ngàm, đầu còn lại chịu một lực tập trung $F = 0,1$ (N).

Độ cứng của lò xo gắn với khớp thứ i được xác định dựa theo công thức (1):

$$k_i = \frac{M_i}{\varphi_i} \tag{1}$$

với góc φ_i được đo từ phần mềm Abaqus/CAE, mô men M_i được xác định qua công thức (2):

$$M_i = F \cdot \left(\sum_{j=i}^n l_j \cdot \cos(\Phi_j) \right) \tag{2}$$

với l_j là chiều dài khâu thứ j .

Dựa vào các công thức (1) và (2), ta có được độ cứng mỗi khớp như bảng 1.

Bảng 1. Độ cứng mỗi khâu tìm được qua mô hình đoạn thẳng

Khâu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
φ_i (°)	0,02	8,99	5,84	5,48	4,99	4,49	4,01	3,55	3,11	2,69	2,28	2,14
Φ_i (°)	0,02	9,01	14,8	20,33	25,33	29,82	33,83	37,38	40,5	43,2	45,49	47,63
M_i (N.mm)	7,01	6,06	5,47	4,89	4,32	3,78	3,26	2,76	2,29	1,83	1,39	0,97
k_i (N.mm/°)	350	0,67	0,93	0,89	0,86	0,84	0,81	0,77	0,73	0,68	0,61	0,45

2.2.2. Xác định hàm mô men uốn phụ thuộc vào áp suất khí nén $M_i(P)$

Mối quan hệ giữa mô men M_i và góc quay φ_i được biểu thị qua công thức (3). Độ lớn của góc quay φ_i theo áp suất được đo trên phần mềm Abaqus/CAE, kết quả thu được ở bảng 2.

Bảng 2. Mối quan hệ giữa áp suất P và góc quay φ_i

φ_i (°) P (kPa)	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}	φ_{11}	φ_{12}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,46	3,26	3,93	3,52	3,51	3,49	3,57	3,59	3,51	3,68	4,12	3,46
20	0,85	10,29	8,36	7,56	7,54	7,55	7,66	7,66	7,59	7,91	8,91	6,64
30	1,21	13,84	12,6	11,41	11,35	11,38	11,56	11,53	11,44	11,7	12,74	9,98
40	1,56	18,06	15,16	15,03	14,9	14,97	15,19	15,11	15,04	15,22	16,29	13,32
50	1,91	24	18,92	18,49	18,32	18,41	18,69	18,57	18,49	18,69	19,69	15,47

Từ công thức (3) và bảng 2 thu được mối quan hệ giữa mô men M_i và áp suất P như thể hiện ở bảng 3.

$$M_i = k_i \cdot \varphi_i \tag{3}$$

Bảng 3. Mối quan hệ giữa mô men M_i và áp suất P

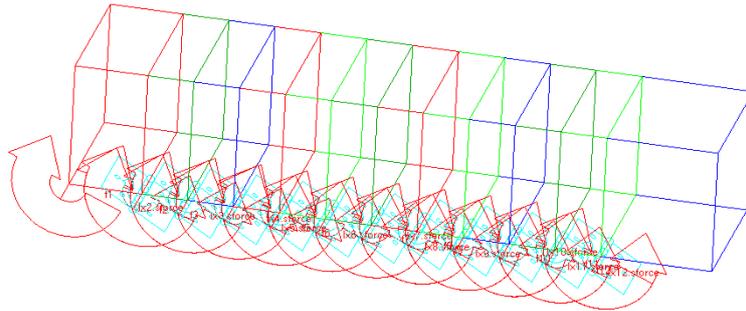
M_i (N.mm) P (kPa)	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	164,1	2,02	3,68	3,14	3,04	2,94	2,91	2,79	2,58	2,51	2,51	1,57
20	298,6	6,94	7,82	6,75	6,54	6,36	6,24	5,97	5,58	5,38	5,44	3,02
30	424,6	9,33	11,79	10,19	9,83	9,59	9,42	8,99	8,41	7,97	7,78	4,54
40	547,9	12,18	14,18	13,47	12,91	12,62	12,37	11,78	11,05	10,37	9,95	6,06
50	671,3	16,19	17,71	16,51	15,88	15,51	15,23	14,48	13,57	12,73	12,02	7,04

Trên cơ sở số liệu ở bảng 3, mối quan hệ giữa mô men M_i và áp suất P sẽ được xây dựng theo các hàm gần đúng $M_i(P)$ như sau:

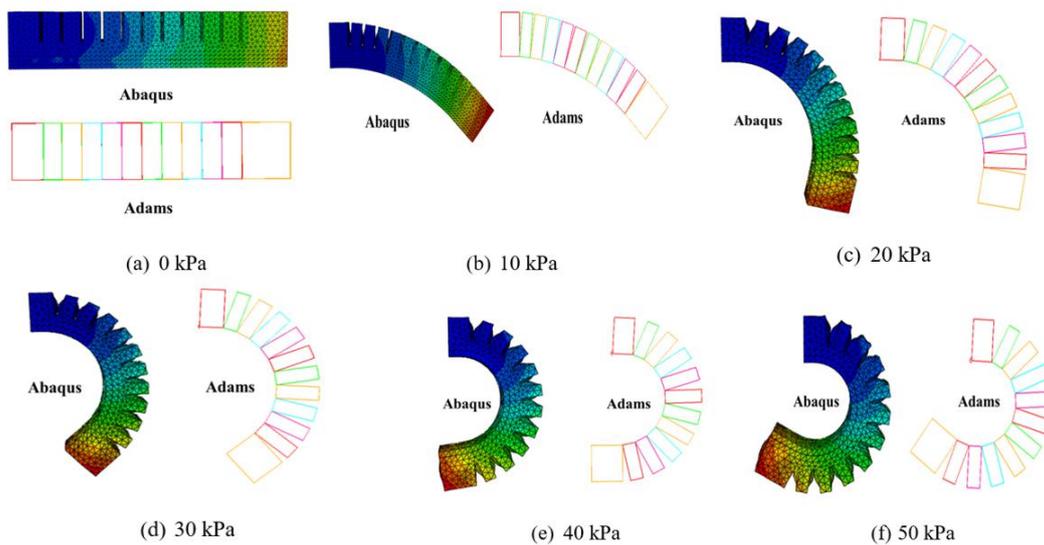
$$\begin{aligned}
 M_1 &= -0,0379 \cdot P^2 + 15,16 \cdot P + 5,2863 & M_7 &= -0,0003 \cdot P^2 + 0,324 \cdot P + 0,1051 \\
 M_2 &= 0,0003 \cdot P^2 + 0,3109 \cdot P - 0,1968 & M_8 &= -0,0004 \cdot P^2 + 0,3107 \cdot P - 0,0955 \\
 M_3 &= -0,0014 \cdot P^2 + 0,4241 \cdot P - 0,1231 & M_9 &= -0,0003 \cdot P^2 + 0,2894 \cdot P - 0,0986 \\
 M_4 &= -0,0003 \cdot P^2 + 0,3505 \cdot P - 0,121 & M_{10} &= -0,0005 \cdot P^2 + 0,2863 \cdot P - 0,0797 \\
 M_5 &= -0,0004 \cdot P^2 + 0,3393 \cdot P - 0,1084 & M_{11} &= -0,0009 \cdot P^2 + 0,2889 \cdot P - 0,0807 \\
 M_6 &= -0,0001 \cdot P^2 + 0,3196 \cdot P + 0,1003 & M_{12} &= -0,0005 \cdot P^2 + 0,1674 \cdot P + 0,0379
 \end{aligned}$$

2.3. Mô hình hóa ngón tay mềm trên phần mềm MSC Adams

Trên cơ sở bộ thông số độ cứng lò xo k_i , các hàm mô men $M_i(P)$ tìm được, mô hình động lực học ngón tay mềm được xây dựng trên phần mềm MSC Adams (Hình 6). Mô hình gồm 12 khâu nối tiếp có độ dài l_i ghép với nhau bởi các khớp bản lề, mỗi khớp có một lò xo có độ cứng k_i và chịu tác dụng bởi một mô men $M_i(P)$. Khối lượng mỗi khâu được đo nhờ phần mềm Siemens NX: Khối lượng khâu 1 là 2,64 g, khâu 12 là 3,18 g và các khâu còn lại (từ 2 đến 10) bằng nhau là 1,38 g.



Hình 6. Mô hình tay gấp mềm trên phần mềm MSC Adams.



Hình 7. So sánh góc uốn giữa hai mô hình.

Kết quả so sánh (Hình 7) cho thấy, sai lệch về độ cong thu được từ mô hình tay mềm trên MSC Adams so với mô hình phần tử hữu hạn trên Abaqus/CAE ở các mức áp suất khác nhau đều nhỏ hơn 8% (Bảng 4). Kết quả so sánh chứng tỏ độ tin cậy của mô hình động lực học của ngón tay mềm được xây dựng.

Bảng 4. Góc uốn ngón tay mềm thu được từ mô hình được xây dựng và mô hình FEM

Áp suất (kPa)	Góc uốn theo Abaqus/CAE (°)	Góc uốn theo mô hình được xây dựng (°)	Sai lệch (%)
0	0	0	0,00
10	40,1	43,07	7,40
20	88,52	87,22	1,46
30	130,78	129,39	1,06
40	169,87	170,20	0,19
50	209,65	209,79	0,07

3. Mô phỏng khả năng gấp, giữ vật của cụm tay gấp mềm

3.1. Thiết lập điều kiện tiếp xúc giữa tay gấp và vật

Tương tác giữa tay gấp với vật được đặc trưng bởi hai thành phần lực chính, đó là lực pháp tuyến F_N và lực ma sát F_{ms} (Hình 8a).

3.1.1. Lực pháp tuyến F_N

Với các giả thiết là: Bỏ qua lực dính giữa các bề mặt; Các biến dạng nhỏ và nằm trong vùng biến dạng đàn hồi; Các bề mặt tiếp xúc là liên tục và diện tích tiếp xúc rất nhỏ so với kích thước đặc trưng của vật thể, lực pháp tuyến F_N được tính theo thuyết tiếp xúc Hertz [16] theo công thức (3):

$$F_N = F_k - F_b \quad (3)$$

với F_k là lực đàn hồi, F_b là lực giảm chấn.

Lực đàn hồi được tính theo công thức:

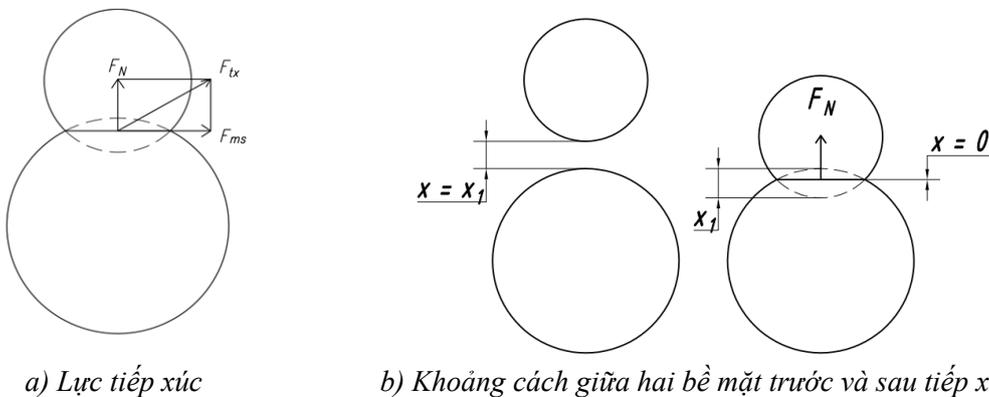
$$F_k = k \cdot (x_1 - x)^e \quad (4)$$

trong đó, k là độ cứng tiếp xúc giữa hai vật, e là hệ số đặc trưng tính phi tuyến của lực đàn hồi, x_1 là khoảng cách giữa hai vật (theo hình dạng ban đầu, không tính đến sự biến dạng của vật), còn x là khoảng cách giữa hai bề mặt tiếp xúc (có tính đến sự biến dạng của vật). Khi hai vật chưa tiếp xúc với nhau, thì $x = x_1$. Khi 2 vật bị ép vào nhau thì giá trị x luôn không đổi ($x = 0$) còn giá trị x_1 thay đổi (Hình 8b).

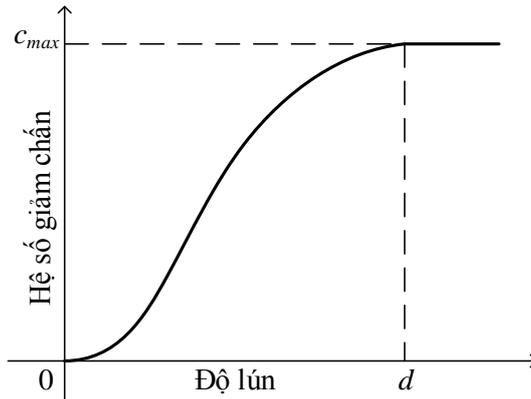
Lực giảm chấn F_b phụ thuộc vào vận tốc tiếp xúc giữa hai vật và được tính theo công thức:

$$F_b = c \cdot \dot{x} \quad (5)$$

Hệ số giảm chấn c có giá trị thay đổi từ 0 đến c_{max} khi độ lún tăng đến một giá trị d xác định nào đó và khi độ lún tiếp tục tăng thì giá trị c_{max} này vẫn giữ nguyên (Hình 9).



Hình 8. Tương tác giữa hai bề mặt tiếp xúc.



Hình 9. Sự thay đổi hệ số giảm chấn c theo độ lún.

Như vậy, lực pháp tuyến F_N khi hai vật tiếp xúc được tính theo công thức:

$$F_N = k(x_1 - x)^e - c \cdot \dot{x} \quad (6)$$

3.1.2. Lực ma sát F_{ms}

Lực ma sát được tính theo công thức:

$$F_{ms} = \mu \cdot F_N \quad (7)$$

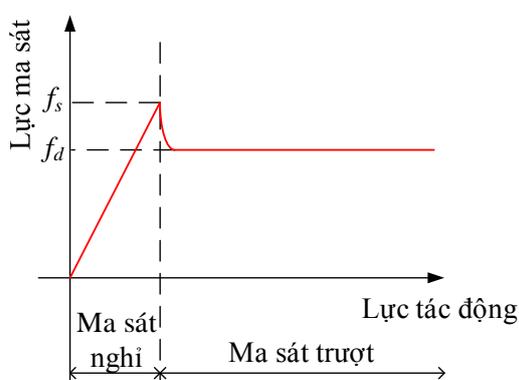
với μ là hệ số ma sát.

Giá trị của lực ma sát được thể hiện trên hình 10a. Tuy nhiên, để thuận lợi cho quá trình tính toán, người ta thường sử dụng mô hình hệ số ma sát liên tục như thể hiện trên hình 10b. Có 4 tham số đặc trưng, đó là hệ số ma sát nghỉ μ_s , hệ số ma sát trượt μ_d và các vận tốc tương ứng với giá trị hệ số ma sát nghỉ v_s và ma sát trượt v_d . Giá trị của bốn tham số này thường được xác định bằng thực nghiệm. Các hệ số mô tả điều kiện tiếp xúc giữa tay gắp và vật được lựa chọn tương ứng với điều kiện tiếp xúc của cao su (tương ứng với vật liệu Silicone RTV 225 ngón tay mềm) với thép (tương ứng với các vật thể hình trụ và hình cầu) và được thể hiện trên bảng 5 [16].

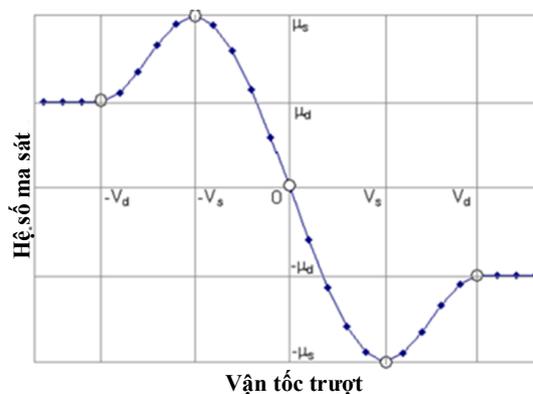
Bảng 5. Các thông số mô tả điều kiện tiếp xúc giữa ngón tay và vật

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Thứ nguyên	Ghi chú
1	Độ cứng	k	10	N/mm	Stiffness
2	Hệ số mũ của lực	e	1,1		Force exponent
3	Hệ số giảm chấn tối đa c_{max}	c_{max}	0.1	N.s/mm	Maximum damping
4	Độ lún	d	0,01	mm	Penetration depth
5	Hệ số ma sát nghỉ (tĩnh)	μ_s	0,8		Static Coefficient
6	Hệ số ma sát trượt (động)	μ_d	0,76		Dynamic Coefficient

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Thứ nguyên	Ghi chú
7	Vận tốc chuyển trạng thái ma sát tĩnh v_s	v_s	0,1	mm/s	Stiction Transition Velocity
8	Vận tốc chuyển trạng thái ma sát động v_d	v_d	1	mm/s	Friction Transition Velocity



a) Quy luật của lực ma sát thực tế



b) Quy luật của lực ma sát sử dụng trong tính toán

Hình 10. Quy luật của lực ma sát và hệ số ma sát.

3.2. Mô phỏng khả năng gấp, giữ vật khi cụm tay gấp mềm di chuyển thẳng

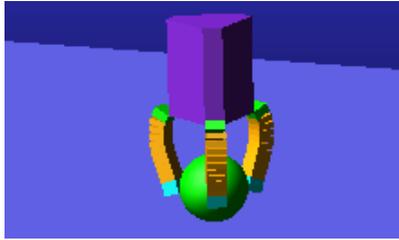
Trên cơ sở mô hình tay gấp mềm và bộ thông số mô tả điều kiện tương tác giữa tay gấp với vật (Bảng 5), quá trình gấp-giữ vật của cụm tay gấp mềm sẽ được mô phỏng trên phần mềm MSC Adams. Ở phần mô phỏng này, cụm tay gấp mềm được giới hạn với quỹ đạo chuyển động thẳng, độ cao không đổi, và cho gia tốc tăng dần.

3.2.1. Gấp vật có dạng hình cầu

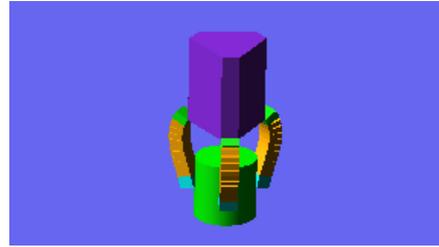
Hình 11a minh họa hình ảnh cụm tay gấp mềm gấp vật hình cầu (có đường kính 70 mm). Đồ thị hình 12 mô tả giá trị độ cao Z, gia tốc của vật (a) và lực tương tác của các ngón tay vào vật thể (b) trong quá trình di chuyển. Khi độ cao của vật bị đột ngột giảm hoặc lực tương tác có giá trị bằng 0 là thời điểm vật thể bị rơi. Có thể thấy rằng, ở gần thời điểm vật thể bị rơi, lực tiếp tương tác của các ngón tay vào vật có giá trị khác nhau, vật thể bị lệch về phía ngón thứ 1 (do tác dụng của lực quán tính) nên lực tương tác của ngón thứ 1 lên vật thể là lớn nhất.

Khả năng giữ vật có khối lượng từ 100 g đến 300 g khi di chuyển thẳng với gia tốc tăng dần được thể hiện trên hình 13. Kết quả cho thấy, tay gấp mềm có thể giữ vật

hình cầu có khối lượng 100 g khi di chuyển với gia tốc 41,2 m/s², tuy nhiên khi giữ vật có khối lượng 300 g thì chỉ có thể di chuyển ở gia tốc nhỏ hơn là 9,9 m/s².

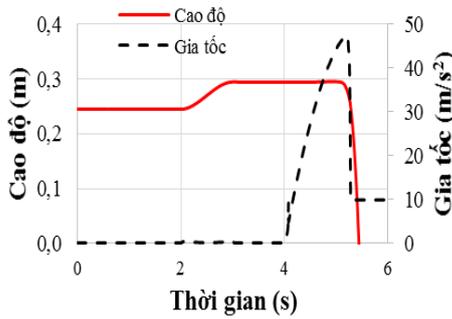


(a) Gắp vật hình cầu

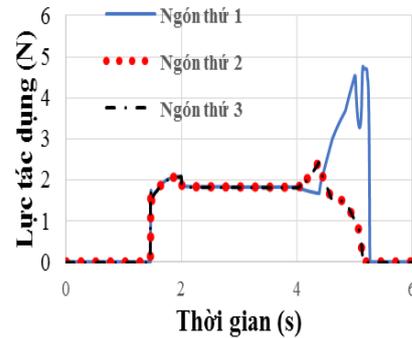


(b) Gắp vật hình trụ

Hình 11. Cụm tay gắp mềm gắp, giữ vật.



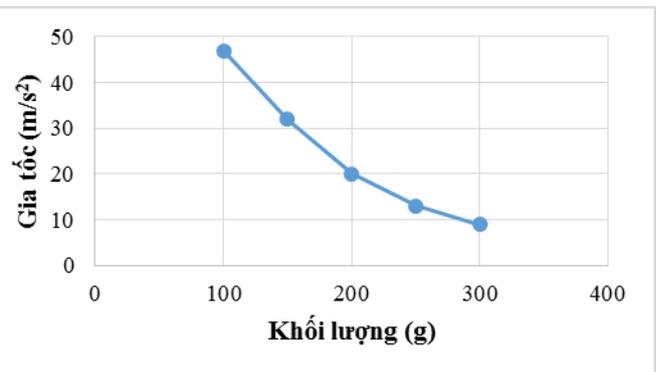
(a) Độ cao và gia tốc



(b) Lực tương tác của các ngón tay lên vật

Hình 12. Đồ thị quá trình gắp-giữ vật hình cầu 100 g.

Khối lượng (g)	Thời điểm rơi (s)	Gia tốc khi bị rơi (m/s ²)
100	5,15	47,285
150	4,63	32,135
200	4,35	20,086
250	4,22	13,379
300	4,16	9,938

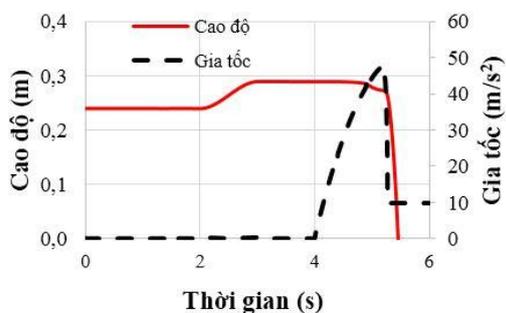


Hình 13. Khả năng cụm tay gắp giữ vật hình cầu có khối lượng khác nhau.

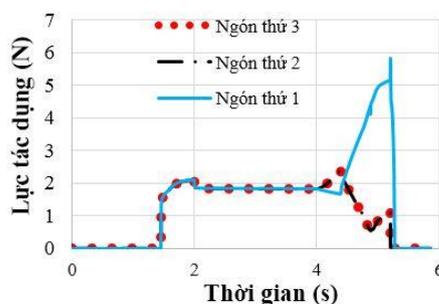
3.2.2. Gắp vật có dạng hình trụ

Trong mô phỏng này, vật được gắp có dạng hình trụ với đường kính 70 mm và chiều cao 70 mm (Hình 11b). Đồ thị hình 14 mô tả quy luật độ cao Z, gia tốc của vật thể (a) và

lực tương tác của các ngón tay vào vật thể (b) trong mô tả quá trình gấp-giữ vật. Khi độ cao của vật bị đột ngột giảm hoặc lực tương tác có giá trị bằng 0 là thời điểm vật thể bị rơi. Tương tự như kết luận ở hình 12, có thể thấy rằng, ở gần thời điểm vật thể bị rơi, lực tiếp tương tác của các ngón tay vào vật có giá trị khác nhau, vật thể bị lệch về phía ngón tay thứ 1 nên lực tương tác của ngón thứ 1 lên vật thể là lớn nhất.



(a) Độ cao và gia tốc



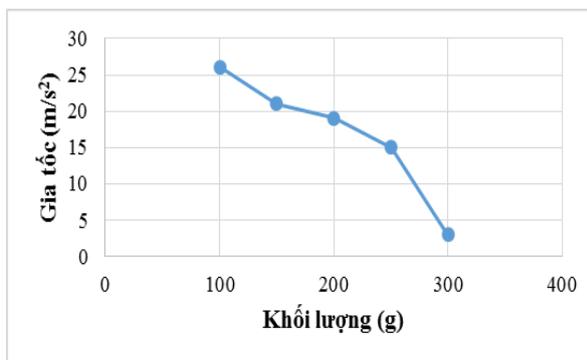
(b) Lực tương tác của các ngón tay lên vật

Hình 14. Đồ thị quá trình gấp-giữ vật thể hình trụ 100 g.

Khả năng giữ vật của tay gấp đối với các vật có khối lượng thay đổi từ 100 g đến 300 g được thể hiện trên hình 15. Tương tự như khi gấp vật hình cầu, vật càng nặng thì gia tốc tối đa mà tay gấp có thể di chuyển càng nhỏ. Có thể thấy rằng, các kết quả mô phỏng thu được đều phù hợp với lý thuyết và thực tế.

Ngoài ra, có thể thấy rằng, tay gấp mềm có thể giữ vật hình cầu có khối lượng 300 g di chuyển với gia tốc lớn nhất là $9,9 \text{ m/s}^2$, tuy nhiên khi gấp hình trụ cùng khối lượng thì chỉ có thể di chuyển với gia tốc tối đa là $3,6 \text{ m/s}^2$. Kết quả này cũng phản ánh đúng thực tế, vì vật thể hình trụ được giữ bởi lực ma sát giữa ngón tay mềm với vật, trong khi đó vật thể hình trụ được giữ bởi hai thành phần là lực ma sát và lực pháp tuyến do ngón tay mềm ôm vào vật.

Khối lượng (g)	Thời điểm rơi (s)	Gia tốc khi bị rơi (m/s^2)
100	4,47	26,178
150	4,36	20,904
200	4,33	19,259
250	4,25	14,776
300	4,06	3,605



Hình 15. Khả năng cùm tay gấp giữ vật thể hình trụ có khối lượng khác nhau.

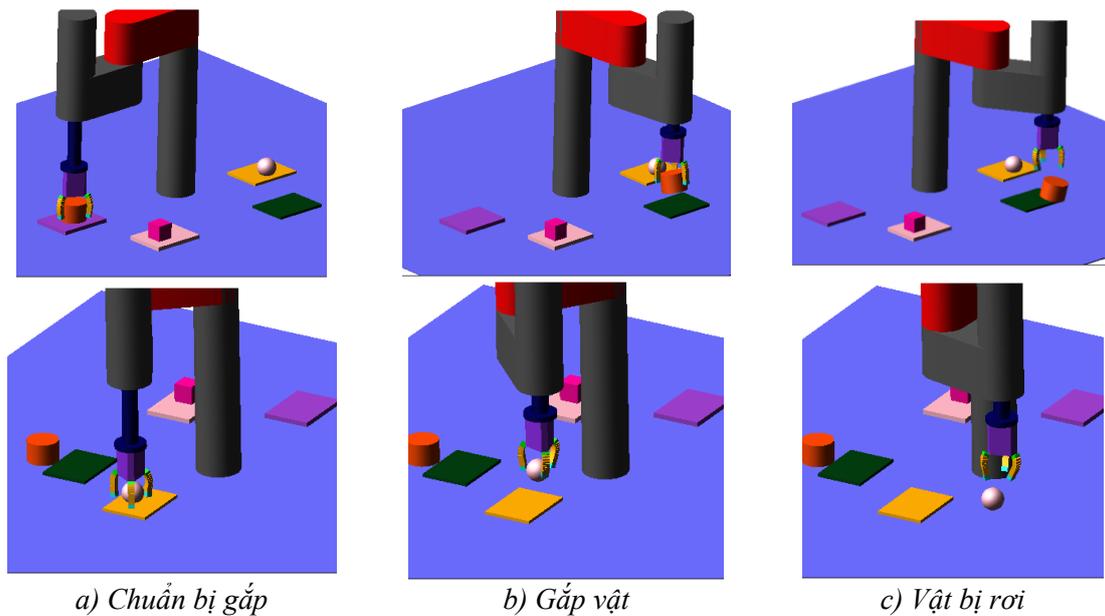
3.3. Mô phỏng khả năng gấp, giữ vật của cụm tay gấp mềm gắn trên tay máy Scora ER14Pro

Để mô phỏng gần hơn với điều kiện làm việc thực tế của cụm tay gấp mềm, mô hình tay máy công nghiệp Scora ER14Pro tích hợp với cụm tay gấp mềm đã được xây dựng trong môi trường MSC Adams. Điều này cho phép mô phỏng khả năng gấp-giữ vật của tay gấp mềm theo các quỹ đạo phức tạp, gần với điều kiện làm việc thực tế trong môi trường công nghiệp (quỹ đạo của vật giống quỹ đạo khâu công tác cuối của tay máy).

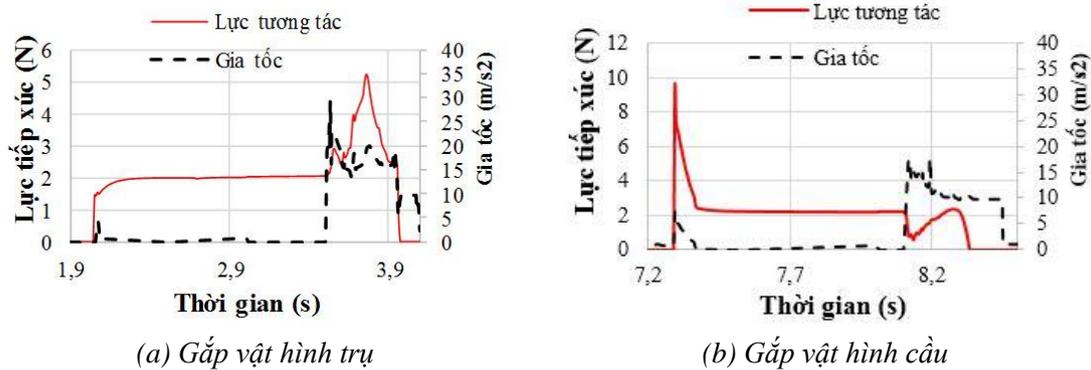
Quá trình gấp vật gồm 3 giai đoạn là chuẩn bị gấp vật, gấp-giữ vật di chuyển và vật bị rơi (Hình 16). Đồ thị mô tả quá trình gấp-giữ vật thể hình trụ (có đường kính 90 mm, chiều cao 70 mm, khối lượng 200 g) được thể hiện ở hình 17a. Vì quỹ đạo khâu công tác của tay máy trong thực tế có độ cao thay đổi, nên lực tương tác của một ngón tay lên vật sẽ được sử dụng để nhận biết thời điểm vật thể bị rơi. Kết quả cho thấy, vật thể hình trụ sẽ bị rơi tại thời điểm 3,94 s khi gia tốc vật đạt $19,38 \text{ m/s}^2$.

Quá trình gấp-giữ vật hình cầu (có đường kính 70 mm, khối lượng là 400 g) được mô tả ở hình 17b. Kết quả cho thấy, vật hình cầu bị văng ở thời điểm 8,33 s tương ứng với gia tốc của vật là $10,29 \text{ m/s}^2$.

Ngoài ra, có thể nhận thấy rằng đồ thị gia tốc của vật thể bị thay đổi (bị nhiễu) ở một số thời điểm. Lý do là ngón tay mềm được mô hình hóa bởi các khâu cứng nối với nhau thông qua các lò xo xoắn nên trong quá trình cụm tay gấp mềm giữ vật và di chuyển, vật không bị kẹp cứng giống như sử dụng tay gấp cứng mà có thể xảy ra các hiện tượng như vật bị trượt (một khoảng nhỏ) hoặc bị rung lắc. Đó chính là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi gia tốc của vật thể trong quá trình tay gấp giữ vật.



Hình 16. Các giai đoạn trong quá trình gấp vật.



Hình 17. Đồ thị biểu diễn quá trình gấp vật trên tay máy Scora.

4. Kết luận

Bài báo trình bày phương pháp xây dựng mô hình động lực học và mô phỏng tay gấp mềm rô bốt. Mô hình động lực học ngón tay mềm được xây dựng theo mô hình chuỗi các khâu dựa trên cách tiếp cận động lực học hệ nhiều vật. Các tham số về động lực học của hệ được xác định dựa trên mô phỏng kết cấu nhờ phương pháp phần tử hữu hạn và thực nghiệm. Độ cong của tay gấp tính theo mô hình đề xuất có sai số không nhiều so với kết quả tính toán nhờ phương pháp phần tử hữu hạn (< 8%).

Trên cơ sở mô hình được xây dựng, quá trình gấp-giữ vật của tay gấp mềm đã được mô phỏng thành công trên phần mềm MSC Adams. Tương tác giữa ngón tay mềm và vật được mô phỏng tuân theo lý thuyết tiếp xúc Hertz. Để mô tả gần nhất với điều kiện làm việc thực tế, mô hình tay gấp mềm gắn trên tay máy công nghiệp Scora đã được thiết lập.

Mô hình được xây dựng đã cho phép đánh giá khả năng gấp-giữ vật có khối lượng, hình dạng khác nhau ở các tốc độ khác nhau trước khi chế tạo thực nghiệm. Mô phỏng cho thấy, cụm tay mềm có khả năng gấp-giữ các vật hình cầu tốt hơn vật thể hình trụ và khi vật càng nặng thì khả năng di giữ vật ở gia tốc lớn càng giảm. Các kết quả mô phỏng thu được về định tính là phù hợp với thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Hughes, U. Culha, F. Giardina, F. Guenther, A. Rosendo, and F. Iida, “Soft manipulators and grippers: A review,” *Frontiers Robotics AI*, vol. 3, no. NOV. Frontiers Media S.A., p. 1, Nov. 01, 2016, doi: 10.3389/frobt.2016.00069.
- [2] T. Rehman, A. A. M. Faudzi, D. E. O. Dewi, and M. S. M. Ali, “Finite element analysis for PDMS based dual chamber bellows structured pneumatic actuator,” in *Communications in Computer and Information Science*, 2017, vol. 751, pp. 392–402, doi: 10.1007/978-981-10-6463-0_34.

- [3] J. R. Bemfica, C. Melchiorri, L. Moriello, G. Palli, and U. Scarcia, "A three-fingered cable-driven gripper for underwater applications," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sep. 2014, pp. 2469–2474, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907203.
- [4] Y. Haibin, K. Cheng, L. Junfeng, and Y. Guilin, "Modeling of grasping force for a soft robotic gripper with variable stiffness," *Mech. Mach. Theory*, vol. 128, pp. 254–274, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.005.
- [5] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, and H. Shea, "Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electro-adhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 231–238, Jan. 2016, doi: 10.1002/adma.201504264.
- [6] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, and P. Dario, "Soft robot arm inspired by the octopus," *Adv. Robot.*, vol. 26, no. 7, pp. 709–727, 2012, doi: 10.1163/156855312X626343.
- [7] H. Zhang, Y. Wang, M. Y. Wang, J. Y. H. Fuh, and A. S. Kumar, "Design and Analysis of Soft Grippers for Hand Rehabilitation," *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Jun. 2017, doi: 10.1115/msec2017-2814.
- [8] N. V. T. Vang Tran Anh, Van Binh Phung, "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, 2019.
- [9] H. M. Dang, C. T. Vo, N. T. Trong, V. D. Nguyen, and V. Binh, "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, 2021.
- [10] H. X. Trinh, P. Van Binh, L. D. Manh, and N. V. Q. Manh, Nguyen Van, "Soft Robotic Fingered-Hand Based on Working Principle of Asymmetric Soft Actuator," *Sixth Int. Conf. Res. Intell. Comput. Eng. (RICE 2021)-(accepted)*, pp. 1–6, 2021.
- [11] W. Hu, R. Mutlu, W. Li, and G. Alici, "A structural optimisation method for a soft pneumatic actuator," *Robotics*, vol. 7, no. 2, Jun. 2018, doi: 10.3390/robotics7020024.
- [12] H. M. D. Van Binh Phung, Quoc Anh Nguyen, Trong Hoang Nguyen, Anh Vang Tran, "Determination of hyper-elastic material parameters and automatic computation for the soft-robotic gripper," *J. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 3, pp. 1–11, 2021.
- [13] A. V. T. Hoang Minh Dang, Chi Thanh Vo, Viet Duc Nguyen, Hai Nam Nguyen and V. B. Phung, "A method for determining parameters of hyperelastic materials and its application in simulation of pneumatic soft actuator," *Int. J. Comput. Mater. Sci. Eng.*, pp. 1–23, 2021, doi: <https://doi.org/10.1142/S2047684121500172>.
- [14] Z. Wang and S. Hirai, "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, Apr. 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2650149.

- [15] V. D. T. Le, A. T. Nguyen, V. B. Phung, T. D. Pham, and J.-H. Han, “The beam modelling of the hawkmoth wing structure,” in *Proc. SPIE 11374, Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication X, 113740L*, 2020, no. April, p. 21, doi: 10.1117/12.2558146.
- [16] J. Giesbers, *Contact mechanics in MSC Adams - A technical evaluation of the contact models in multibody dynamics software MSC Adams*, 2012.
- [17] A. T. Nguyen, A. V. Tran, Q. N. Tang, L. H. Nguyen, M. D. Ha, and T. T. Nguyen, “An Integrated Simulation Approach to Study the Propulsion Mechanism of a Biomimetic Fishtail,” in *Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2020)*, 2021, pp. 808–814, doi: 10.1007/978-3-030-69610-8_107.

SIMULATION RESEARCH ON THE GRASPING PROCESS OF THE SOFT ROBOT GRIPPER

Abstract: *This article presents a method to simulate the dynamics of the grasping process of a soft robotic gripper that is made of silicon. The pneumatically actuated soft fingers are composed of interconnecting hollow chambers. Each soft finger is modeled as a series of line-segment links using a multibody dynamics approach. Numerical simulations using Abaqus/CAE software are used to determine the system's dynamic parameters. The soft gripper's model is then integrated into the robotic manipulators that are built on MSC Adams software. The interaction between soft grippers and objects is modeled according to the Hertz contact theory. The proposed model allows for the investigation of soft gripper gripping capacity with various types of objects and different moving velocities and accelerations. The simulation shows that the soft gripper can hold a spherical object and a cylindrical object with the same mass of 300 g at a maximum acceleration of 9.9 m/s^2 and 3.6 m/s^2 respectively. The results of the study are being used to improve the design of the robot's soft gripper.*

Keywords: Softrobotic gripper; dynamic; grasping process; Abaqus/CAE; MSC Adams.

Nhận bài: 01/12/2021; *Hoàn thiện sau phản biện:* 04/05/2022; *Chấp nhận đăng:* 16/09/2022

