

## LARGE AMPLIFICATION AND SELF-LOCKING MICROGRIPPER BASED ON ELECTROSTATIC COMB-DRIVE ACTUATORS

Bui Duy Thai<sup>1</sup>, Phan Hoang Hiep<sup>1</sup>, Nguyen Tien Dzung<sup>2</sup>, Pham Hong Phuc<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hanoi University of Science and Technology

<sup>2</sup>TNU – University of Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Received:</b> 13/12/2024</p> <p><b>Revised:</b> 31/12/2024</p> <p><b>Published:</b> 31/12/2024</p>	<p>The paper presents the design, analysis, and simulation of a novel electrostatic microgripper featuring a self-locking mechanism, enhanced displacement amplification of the gripping jaws, and a release mechanism to address adhesion issues. The microgripper operates using tangential electrostatic forces generated by applying voltage to comb-shaped electrodes. Through the displacement amplification mechanism, the gripping jaws achieve a maximum displacement of 44.16 <math>\mu\text{m}</math> for each side at the applied voltage of 112.47 V. The self-locking mechanism, comprising a V-shaped beam and a locking ratchet, ensures the object remains securely held without the need for a continuous voltage supply. Detailed calculations and simulations were conducted to assess the displacement and stress distributions across the elastic components. The results demonstrate good agreement between simulation and theoretical calculations, with a maximum deviation of 13.8% observed at a voltage of 84.6 V. This innovative design effectively overcomes common challenges in microgripping applications, offering enhanced performance and reliability.</p>
<p><b>KEYWORDS</b></p> <p>Microgripper</p> <p>Electrostatic comb-drive microactuator</p> <p>Self-locking mechanism</p> <p>Displacement amplification</p> <p>Micro electromechanical systems</p>	

## CƠ CẤU VI TAY GẤP KHUẾCH ĐẠI CHUYỂN VỊ KIỂU TỰ KHÓA DẪN ĐỘNG BẰNG CÁC VI CHẤP HÀNH TĨNH ĐIỆN RĂNG LƯỢC

Bùi Duy Thái<sup>1</sup>, Phan Hoàng Hiệp<sup>1</sup>, Nguyễn Tiến Dũng<sup>2</sup>, Phạm Hồng Phúc<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Đại học Bách khoa Hà Nội, <sup>2</sup>Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p><b>Ngày nhận bài:</b> 13/12/2024</p> <p><b>Ngày hoàn thiện:</b> 31/12/2024</p> <p><b>Ngày đăng:</b> 31/12/2024</p>	<p>Bài báo trình bày về thiết kế, tính toán và mô phỏng cơ cấu vi tay gấp tĩnh điện mới với cơ chế tự khóa, khả năng khuếch đại chuyển vị má kẹp và cơ chế gạt vật ra khỏi mỏ gấp, khắc phục hiện tượng bám dính. Cơ cấu hoạt động nhờ lực tĩnh điện tiếp tuyến sinh ra khi đặt điện áp vào các bản tụ hình răng lược. Nhờ cơ chế khuếch đại chuyển vị, má kẹp có thể đạt chuyển vị tối đa 44,16 <math>\mu\text{m}</math> mỗi bên tại điện áp 112,47 V. Ngoài ra, cơ cấu tự khóa gồm dầm chữ V và răng cóc khóa chốt chắc chắn giúp giữ vật kẹp mà không cần duy trì điện áp. Kết quả tính toán và mô phỏng đánh giá chuyển vị và ứng suất các thành phần đàn hồi cho thấy sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng và tính toán, với sai lệch lớn nhất là 13,8% tại điện áp 84,6 V. Thiết kế sáng tạo này đã khắc phục đáng kể những hạn chế thường gặp trong các ứng dụng của vi tay gấp, đồng thời mang lại hiệu suất cao và tăng độ tin cậy trong quá trình hoạt động.</p>
<p><b>TỪ KHÓA</b></p> <p>Vi tay gấp</p> <p>Vi chấp hành tĩnh điện răng lược</p> <p>Cơ cấu tự khóa</p> <p>Khuếch đại chuyển vị</p> <p>Công nghệ vi cơ điện tử</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11691>

\* Corresponding author. Email: phuc.phamhong@hust.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Hệ thống vi cơ điện tử (Micro Electromechanical Systems - MEMS) là hệ thống tích hợp các phần tử cơ (vi chấp hành) và điện (vi cảm biến, mạch điện) có kích thước từ vài đến vài trăm micromet, được chế tạo bằng các công nghệ vi cơ hiện đại trên nền tấm Silic, polymer, SiC, hay một số vật liệu bán dẫn khác [1].

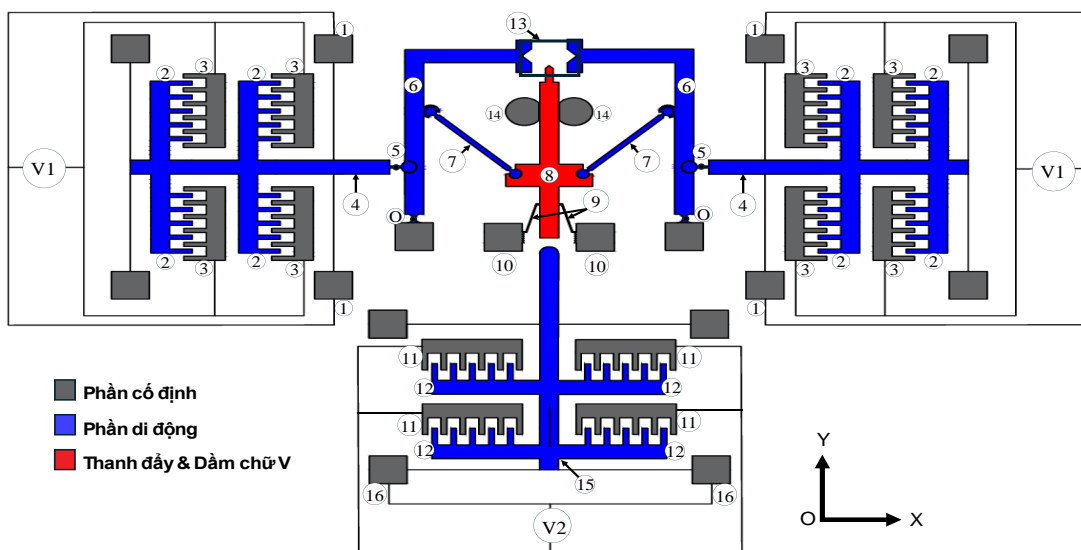
Vi tay gấp là một ứng dụng phổ biến của hệ thống vi cơ điện tử, có khả năng xử lý các thao tác nắm, kẹp hoặc di chuyển vật với độ chính xác micromet. Một số ứng dụng của vi tay gấp có thể kể đến như vi lắp ráp, vi phẫu trong y học, các thí nghiệm sinh học, v.v. Đặc biệt trong việc nghiên cứu các cấu trúc vi mô, vi tay gấp là một dụng cụ hiệu quả để gấp và di chuyển các hạt micro/nano và vi mẫu [2]. Dựa vào hiệu ứng vật lý, chúng được phân loại như là vi gấp kiểu tĩnh điện, nhiệt điện, áp điện, hay vật liệu nhớ hình [3]. Trong đó, vi chấp hành kiểu điện từ [4] có thể đạt được chuyển vị lớn nhưng với yêu cầu của vật liệu sắt từ khiến nó khó có thể tích hợp với các công nghệ CMOS hiện nay; vi chấp hành kiểu điện nhiệt [5], [6] có thể tích hợp dễ dàng với công nghệ CMOS nhưng lại sinh nhiệt độ cao và thời gian trễ nhiệt lớn [7]. Vi tay gấp kiểu tĩnh điện [8] – [11] có các ưu điểm như cấu tạo, gia công đơn giản, đáp ứng nhanh (độ trễ nhỏ), không sinh nhiệt, do đó chúng được sử dụng tương đối rộng rãi và đang là xu hướng phát triển mới. Các cấu trúc vi tay gấp kiểu tĩnh điện công bố gần đây đã tương đối hoàn chỉnh nhưng trong quá trình di chuyển vật cần duy trì điện áp tạo lực tĩnh điện để giữ vật ở trong má kẹp dẫn tới tiêu tốn năng lượng [12], [13]. Trong bài báo này, tác giả đề xuất một cấu trúc vi tay gấp kiểu tĩnh điện kết hợp tay kẹp với cơ cấu tự khóa có khả năng kẹp và giữ vật trong thời gian dài mà không cần phải cấp điện áp liên tục. Điều này giúp giảm đáng kể năng lượng tiêu thụ cho vi tay gấp, đồng thời đảm bảo an toàn cho mẫu vật được kẹp, nhất là các loại mẫu vật nhạy cảm với dòng điện như trong các ứng dụng y sinh, vi phẫu. Ngoài ra, vi tay gấp được tích hợp cơ cấu đẩy có thêm khả năng gạt mẫu vật ra khỏi đầu kẹp khi cần nhả kẹp, giúp khắc phục hiện tượng vật bị dính tại đầu kẹp.

## 2. Phương pháp thiết kế và nguyên lý hoạt động

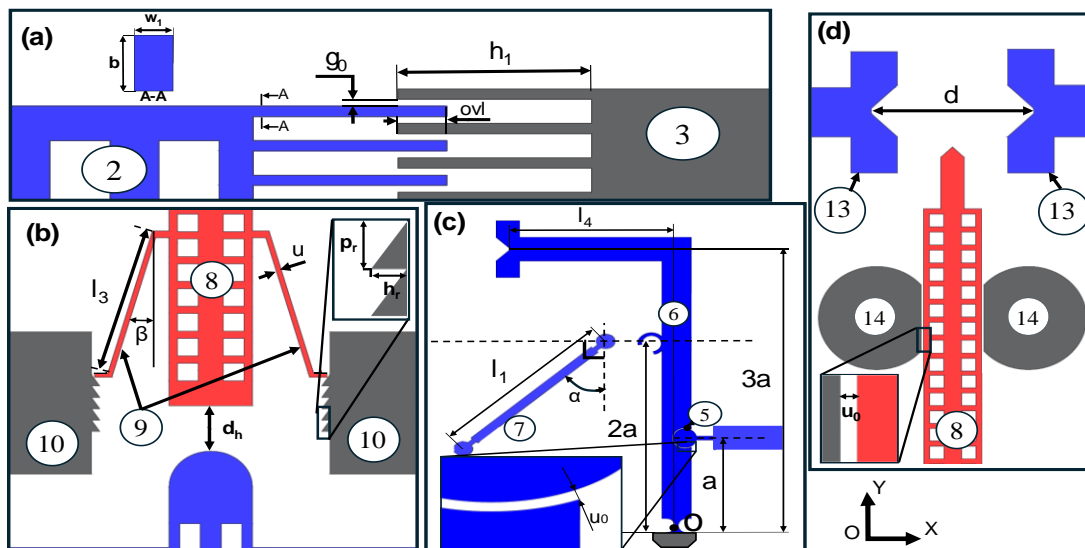
Cấu tạo của vi tay gấp được mô tả như Hình 1, hoạt động dựa trên chuyển vị ngang của các bản tụ song song (răng lược di động số (2)) ở hai bên được nối với điện cực cố định (1) và nằm xen kẽ với các răng lược cố định (3). Dầm đẩy (4) được nối với tay kẹp (6) ở một phía bằng cơ cấu bản lề, phía còn lại của tay kẹp được nối với con trượt (8) thông qua thanh nối (7). Phía dưới con trượt (8) là cơ cấu dầm chữ V và răng cóc khóa (9,10). Cơ cấu răng lược phía dưới (15) có tác dụng đẩy dầm chữ V (9) trượt ra khỏi răng cóc, đưa cơ cấu về vị trí ban đầu khi thôi kẹp vật.

**Khi kẹp vật:** Cấp điện áp  $V_1$  vào hai điện cực cố định (1) và (3). Lực tĩnh điện tiếp tuyến sinh ra giữa các bản tụ làm răng lược di động (2) dịch chuyển theo phương Ox, thông qua khớp bản lề (5) đẩy tay kẹp (6) quay quanh điểm đàn hồi O và kẹp chặt vật tại má kẹp (13). Khi đó, thanh nối (7) vừa quay vừa tịnh tiến đẩy con trượt (8) đi xuống phía dưới. Dầm chữ V (9) được nối liền với con trượt (8) khi đó sẽ di chuyển xuống, trượt theo các răng cóc cố định (Hình 2b). Nếu dầm chữ V (9) di chuyển vượt qua một bước răng cóc  $p_r = 8\mu\text{m}$ , khi ngừng cấp điện áp  $V_1$ , dầm chữ V vẫn sẽ bị khoá tại răng cóc (10) và ngăn con trượt (8) không thể di chuyển về vị trí ban đầu, nghĩa là tay kẹp tự khóa giữ chặt vật kẹp. Số răng cóc mà dầm chữ V vượt qua nhờ điện áp  $V_1$  ban đầu sẽ quyết định hành trình má kẹp hay đường kính của vật kẹp.

**Khi nhả vật:** Cấp điện áp  $V_2$  vào các điện cực cố định (11) và (16). Thanh đẩy (15) phía dưới tịnh tiến lên trên theo phương Oy, khi vượt qua khe hở  $d_h$  (Hình 2b) sẽ chạm vào đuôi thanh trượt (8) kéo dầm chữ V (9) đi lên theo phương Oy, trượt ra khỏi đỉnh răng cóc (10), mở khóa cho vật đang bị kẹp. Thanh trượt (8) được dẫn hướng bởi hai gối cố định (14) sẽ tịnh tiến lên trên đẩy thanh nối (7) và đưa tay kẹp (6) về vị trí ban đầu (Hình 2d), khi đó vật được nhả ra khỏi má kẹp (13), đồng thời đầu nhọn con trượt (8) sẽ gạt vào vật và đẩy vật rời khỏi má kẹp nếu còn bị dính.



Hình 1. Cấu tạo chung vi tay gấp



Hình 2. Cấu tạo chi tiết: (a) Cụm răng lược; (b) Thanh đẩy dầm chữ V và răng cóc khóa; (c) Tay kẹp và thanh nối; (d) Thanh đẩy và mỏ kẹp

Trong cơ cấu vi tay gấp này, ưu điểm được thể hiện ở khả năng tự khóa các má kẹp với hành trình kẹp lớn mà không cần duy trì điện áp  $V_1$  nhờ vào cơ cấu tự khoá (9), (10), cấu trúc tay kẹp (6) có thể khuếch đại chuyển vị của má kẹp lên khoảng 3 lần (Hình 2c). Ngoài ra, vi tay gấp còn được tích hợp khả năng tự gạt vật khi nhả, nhờ vào di chuyển lên xuống của thanh trượt (8).

Các kích thước cơ bản của hệ thống vi chấp hành tĩnh điện cũng như các kích thước chính của vi tay gấp được cho ở Hình 2 và Bảng 1.

Bảng 1. Các kích thước cơ bản của vi tay gấp

Tham số	Ký hiệu	Đơn vị đo	Giá trị	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị đo	Giá trị
Chiều dài răng lược	$h_1$	$\mu\text{m}$	40	Chiều dài dầm chữ V (9)	$l_3$	$\mu\text{m}$	200
Khoảng chồng răng lược (Overlapped)	$o_{vl}$	$\mu\text{m}$	10	Góc nghiêng của dầm chữ V so với trục $Oy$	$\beta$	$^\circ$	15
Bước răng lược	$u_1$	$\mu\text{m}$	10	Bề rộng dầm chữ V	$u$	$\mu\text{m}$	3

Tham số	Ký hiệu	Đơn vị đo	Giá trị	Tham số	Ký hiệu	Đơn vị đo	Giá trị
Số răng lược di động mỗi bên đế kẹp vật	$n_1$	răng	280	Khoảng cách từ góì cố định O đến cổ bản lè (5)	$a$	$\mu\text{m}$	500
Khe hở giữa hai răng lược	$g_0$	$\mu\text{m}$	2	Chiều dài phần trên tay kẹp	$l_4$	$\mu\text{m}$	520
Bề dày lớp cấu trúc (răng lược)	$b$	$\mu\text{m}$	30	Khe hở chế tạo khớp bản lè	$u_0$	$\mu\text{m}$	2
Bề rộng răng lược	$w_1$	$\mu\text{m}$	3	Chiều cao răng cóc	$h_r$	$\mu\text{m}$	5
Chiều dài mỗi dầm đàn hồi	$L_1$	$\mu\text{m}$	700	Bước răng cóc	$p_r$	$\mu\text{m}$	8
Số răng lược di động của vi chấp hành nhả kẹp	$n_2$	răng	400	Khoảng cách giữa con trượt (8) và cụm răng phía dưới	$d_h$	$\mu\text{m}$	24
Chiều rộng mỗi dầm đàn hồi	$W$	$\mu\text{m}$	5	Bề dày cổ đàn hồi tại tay kẹp	$u_c$	$\mu\text{m}$	8
Số dầm đơn trên mỗi bộ vi chấp hành tĩnh điện	$N_1$		4	Chiều dài cổ đàn hồi tại tay kẹp	$l_c$	$\mu\text{m}$	40
Chiều dài thanh nối (7)	$l_1$	$\mu\text{m}$	700	Bán kính cong cổ đàn hồi tại điểm O	$r_c$	$\mu\text{m}$	10
Góc nghiêng thanh nối so với trục Oy	$\alpha$	$^\circ$	45	Hệ số khuếch đại chuyển vị của vi gấp	$k$		3
Khoảng cách ban đầu giữa hai má kẹp	$d$	$\mu\text{m}$	140	Chiều dài phần đầu dầm chữ V	$s$	$\mu\text{m}$	15
Chiều dài con trượt (8)	$l_2$	$\mu\text{m}$	1250	Góc nghiêng của bề mặt răng cóc	$\gamma$	$^\circ$	32

### 3. Kết quả tính toán và mô phỏng vi tay gấp

#### 3.1. Tính toán động học

Hình 3 mô tả quan hệ chuyển vị điểm A, C và G trong quá trình kẹp vật. Khi cấp điện áp  $V_1$  vào hai điện cực cố định (1) và (3), lực tĩnh điện tiếp tuyến gây ra dịch chuyển điểm A đến vị trí A' gọi là  $\Delta x$ . Khi đó, con trượt 8 sẽ bị đẩy xuống một đoạn là  $GG' = \Delta y$ . Ta có công thức liên hệ giữa hai chuyển vị  $\Delta y$  và  $\Delta x$ :

$$\Delta y = \sqrt{l_1^2 - (l_1 \sin \alpha - 2\Delta x + 3u_0)^2} - l_1 \cos \alpha - u_0 \quad (1)$$

Trong đó,  $l_1$ ,  $\alpha$ ,  $u_0$ ,  $d$  được xác định theo Bảng 1.

Nhờ cơ cấu tay kẹp khuếch đại chuyển vị, nên chuyển vị mỗi bên má kẹp sẽ là  $3(\Delta x - u_0)$ , khi đó chuyển vị tổng của hai bên má kẹp là  $6(\Delta x - u_0)$  (do chuyển vị kẹp vật là theo phương Ox nên ta cũng chỉ tập trung vào chuyển vị  $d'$  theo phương Ox). Như vậy, khoảng cách giữa hai má kẹp được tính theo công thức:  $d' = d - 6(\Delta x - u_0)$  (2)

#### 3.2. Phân tích lực

Như đã đề cập trước đó, cơ cấu vi tay gấp được dẫn động bởi hai cơ cấu chấp hành răng lược đối xứng ở hai bên. Do đó, ta chỉ cần phân tích các lực tác động tại một bên như trong Hình 4. Khi cấp điện áp  $V_1$  vào hai điện cực cố định (1) và (3), lực tĩnh điện gây ra chuyển động phương Ox.

Theo [14], lực này được xác định theo công thức:  $F_e = \frac{n_1 b \epsilon \epsilon_0 V_1^2}{g_0}$  (3)

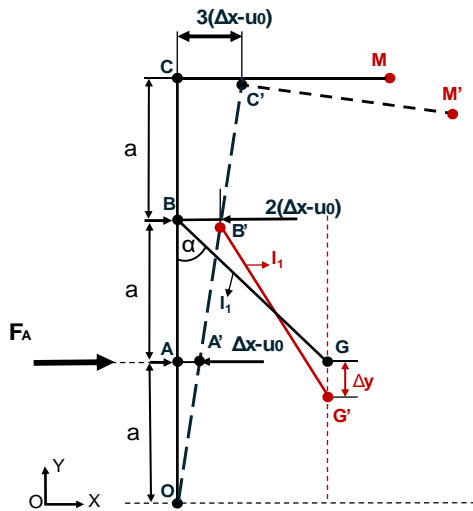
Trong đó,  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m và  $\epsilon = 1$  lần lượt là hằng số điện môi của chân không và không khí.

Theo Hình 4, lực đẩy tại điểm A được tính bởi công thức:  $F_A = F_e - F_b$  (4)

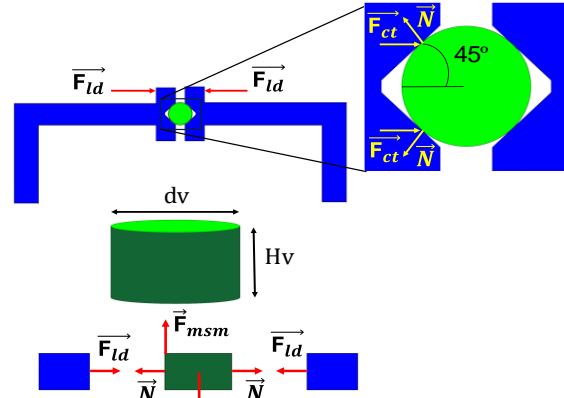
Trong đó,  $F_b$  là tổng lực đàn hồi của hệ dầm răng lược:  $F_b = k_b \Delta x$  (5)

Ở đây,  $\Delta x$  là chuyển vị của răng lược di động tại điểm A theo phương Ox;  $k_b$  là độ cứng của 4 dầm đàn hồi [14]:  $k_b = 2 \times \frac{24EI}{L^3} = \frac{4EbW^3}{L_1^3} = 7,39 \left( \frac{\mu\text{N}}{\mu\text{m}} \right)$ , với  $E = 169 \text{ GPa}$ : mô đun đàn hồi của Silic.

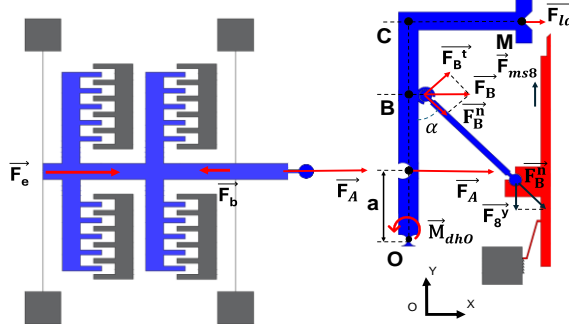
Như vậy, các lực và momen tác động lên tay kẹp bao gồm: Lực đẩy  $F_A$  từ dầm răng lược tác động lên tay kẹp; Lực dẫn cần thiết  $F_B$  để đẩy thanh trượt (8) và dầm chữ V vượt qua 1 răng cóc; Lực kẹp  $F_{1d}$  cần thiết để kẹp và nâng được vật.



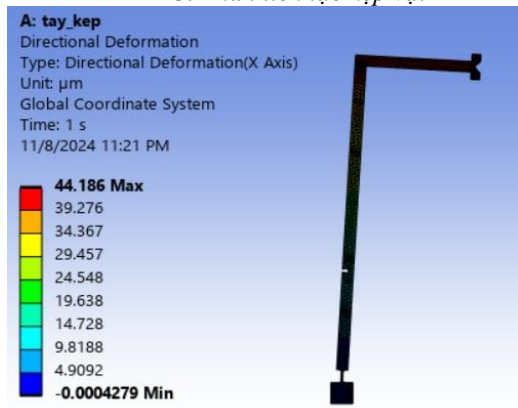
Hình 3. Phân tích chuyển vị của vi tay kẹp



Hình 5. Phân tích lực kẹp vật



Hình 4. Phân tích lực cho một bên tay kẹp



Hình 6. Mô phỏng tìm độ cứng ngang của tay kẹp

Để vật không bị rơi trong quá trình kẹp, các lực ma sát  $F_{msm}$  được tạo ra bởi 4 vị trí tiếp xúc ở hai má kẹp phải lớn hơn trọng lượng  $P$  của vật kẹp (Hình 5):

$$4F_{msm} \geq P \tag{6}$$

$$F_{ct} = N \cos 45^\circ = \frac{P}{4f_m} \cos 45^\circ = \frac{mG}{4f_m} \cos 45^\circ = \frac{\pi d_v^2 H_v \rho}{16 f_m} G \cos 45^\circ \tag{7}$$

$$F_{ld} = 2F_{ct} \tag{8}$$

Ở đây,  $F_{ld}$  là lực đẩy tay kẹp có thể nâng được vật; giả sử  $H_v = 40 \mu\text{m}$  là chiều cao vật mẫu;  $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$  là khối lượng riêng của silicon;  $G = 9,81 \text{ m/s}^2$  là gia tốc trọng trường;  $d_v$  là đường kính vật mẫu, giả sử  $d_v = 48 \mu\text{m}$ . Lực  $F_{ld}$  cần thiết là:  $F_{ld} = \frac{\pi d_v^2 H_v \rho}{8 f_m} G \cos 45^\circ$   $\tag{9}$

$M_{dh0}$  là momen đàn hồi tại điểm đàn hồi  $O$  được tính bằng công thức:

$$M_{dh0} = k_O \Delta_C 3a \tag{10}$$

Ở đây,  $k_O$  là độ cứng của cô đàn hồi  $O$  theo phương  $x$ ;  $\Delta_C = 3(\Delta x - u_0)$  là chuyển vị theo phương  $x$  của điểm  $C$ ;  $a = OA = AB = BC = 500 \mu\text{m}$  là khoảng cách giữa các điểm nằm trên tay kẹp. Dựa vào các kích thước ở Bảng 1, độ cứng  $k_O$  được xác định bằng phương pháp mô phỏng. Khi tác động lực  $80 \mu\text{N}$  vào điểm  $C$ , chuyển vị tại điểm này theo phương  $Ox$  được xác định bằng  $44,186 \mu\text{m}$  (Hình 6). Như vậy, độ cứng tương đương được xác định bằng:  $k_O = \frac{80}{44,186} = 1,811 \left(\frac{\mu\text{N}}{\mu\text{m}}\right)$

Phương trình cân bằng momen của tay kẹp tại điểm  $O$  được viết như sau:

$$F_A r - M_{dh0} = F_B 2r + F_{ld} 3r \tag{11}$$

Hay:  $F_A - 9k_O(\Delta x - 2) = 2F_B + 3F_{ld}$   $\tag{12}$

Trong đó,  $F_B$  là lực dẫn của tay kẹp tác động lên thanh nối tại vị trí điểm  $B$ .

Phân tích lực  $F_B$  thành các thành phần lực theo phương pháp tuyến và tiếp tuyến với thanh nối (7) (Hình 4), ta có:

$$\vec{F}_B = \vec{F}_B^t + \vec{F}_B^n \quad (13)$$

$$F_B^n = F_B \sin \alpha \quad (14)$$

$$F_B^t = F_B \cos \alpha \quad (15)$$

Khi đó, ta tính được lực đẩy tại bản lề của con trượt (8) theo phương Oy là:

$$F_8^y = F_B^n \cos \alpha \quad (16)$$

Ở đây,  $\alpha = 45^\circ$  là góc nghiêng của thanh nối (7) so với trục Oy (Bảng 1).

Khi đó, tổng lực đẩy con trượt 8 xuống là  $2F_8^y - F_{ms8}$ . Trong đó,  $F_{ms8}$  là tổng lực ma sát giữa con trượt với nền và giữa con trượt với khe dẫn hướng, vì trọng lượng con trượt (8) rất nhỏ nên lực ma sát này có thể bỏ qua.

$$\text{Kết hợp từ công thức (13) – (16), ta có: } F_B = \frac{2F_8^y}{\sin(2\alpha)} \quad (17)$$

$$\text{Phân tích lực tại đầu dầm chữ V, ta có: } \vec{F}_8^y + \vec{F}_{dhv} + \vec{F}_{msv} + \vec{F}_N = 0 \quad (18)$$

Lực cản tại hệ thống răng cóc khóa bao gồm các thành phần:  $F_{dhv}$  là lực đàn hồi của dầm chữ V,  $F_{msv}$  là lực ma sát giữa đầu của dầm chữ V và bề mặt răng cóc (Hình 7), các lực cản đó được tính theo công thức:  $F_{msv} = fF_N$

$$\vec{F}_{dh} = \vec{F}_{dhv}^x + \vec{F}_{dhv}^y \quad (19)$$

Trong đó,  $\vec{F}_{dhv}^x$  và  $\vec{F}_{dhv}^y$  có được từ phép chiếu của  $\vec{F}_{dh}$  lần lượt lên 2 phương Ox và Oy, giá trị của chúng bằng:  $F_{dhv}^x = k_v \Delta v$

$$F_{dhv}^y = k_v \Delta v \tan \beta \quad (22)$$

Ta có phương trình cân bằng lực tại răng cóc chiếu trên hai phương Ox và Oy:

$$\text{Ox: } F_N \cos \gamma - F_{msv} \sin \gamma - F_{dhv}^x = 0 \quad (23)$$

$$\text{Oy: } F_N \sin \gamma + F_{msv} \cos \gamma + F_{dhv}^y - F_8^y = 0 \quad (24)$$

Trong đó,  $\gamma = \tan^{-1} \frac{h_r}{p_r} = 32^\circ$  là góc nghiêng của bề mặt răng cóc so với trục Oy;  $u = 3 \mu m$  là bề rộng dầm chữ V;  $f = 0,3$  là hệ số ma sát của vật liệu silic giữa dầm chữ V và răng cóc;  $\Delta v$  là độ dịch chuyển của đầu dầm chữ V theo phương Ox ( $0 \leq \Delta v \leq h_r$ ).

Khi đặt lực 1  $\mu N$  vào đầu di động của dầm chữ V, ta đạt được chuyển vị tại vị trí đặt lực là  $0,26298 \mu m$  (Hình 8). Như vậy, độ cứng dầm chữ V ( $k_v$ ) được tính:  $k_v = \frac{1}{0,26298} = 3,8 \left( \frac{\mu N}{\mu m} \right)$

$$\text{Từ (19)-(24), ta rút ra: } F_N = \frac{k_v \Delta v}{\cos \gamma - f \sin \gamma} \quad (25)$$

$$F_8^y = k_v \Delta v \left( \frac{\sin \gamma + f \cos \gamma}{\cos \gamma - f \sin \gamma} + \tan \beta \right) \quad (26)$$

Như vậy, để cơ cấu chữ V có thể đi xuống và tay kẹp làm việc thì cần thỏa mãn:

$$F_8^y \geq k_v \Delta v \left( \frac{\sin \gamma + f \cos \gamma}{\cos \gamma - f \sin \gamma} + \tan \beta \right) \quad (27)$$

Vậy giá trị điện áp  $V_1$  nhỏ nhất để dẫn động con trượt (8) đi xuống là:

$$V_1 \geq \sqrt{\frac{\Delta x (k_b + 9k_o) - 18k_o + \frac{4k_v \Delta v (\sin \gamma + f \cos \gamma)}{\sin(2\alpha) (\cos \gamma - f \sin \gamma)} + 3F_{ld}}{\frac{n_1 b \epsilon \epsilon_0}{g_0}}} \quad (28)$$

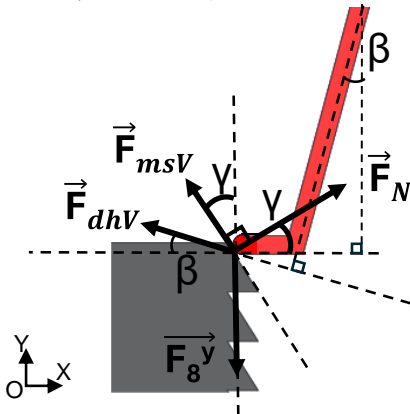
Để đảm bảo hoạt động của cơ chế tự khóa, chuyển vị  $\Delta y$  của thanh đẩy phải lớn hơn hoặc bằng một bước răng cóc:  $\Delta y \geq p = 8 \mu m$ . Thay vào (1), ta tìm được giá trị  $\Delta x$  tương ứng:

$$\Delta x \geq 8,1 \mu m \quad (29)$$

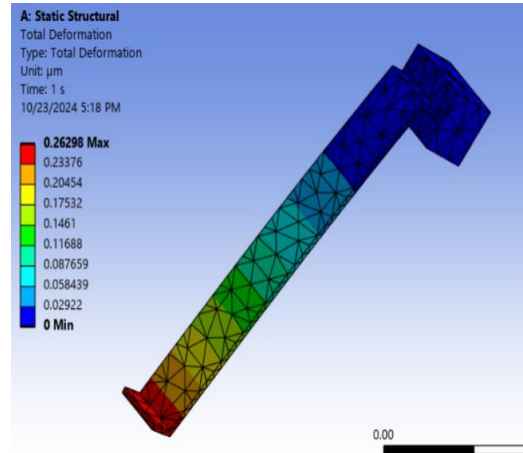
Khi đó, điện áp  $V_1$  phải thỏa mãn:

$$V_1 \geq \sqrt{\frac{8,1(k_b + 9k_o) - 18k_o + \frac{4k_v \Delta v (\sin \gamma + f \cos \gamma)}{\sin(2\alpha) (\cos \gamma - f \sin \gamma)} + 3F_{ld}}{\frac{n_1 b \epsilon \epsilon_0}{g_0}}} \quad (30)$$

Từ đó, ta tính được  $V_{1min} = 80,95$  (V)



Hình 7. Phân tích lực cân tại cơ cấu rãnh cóc và dầm chữ V

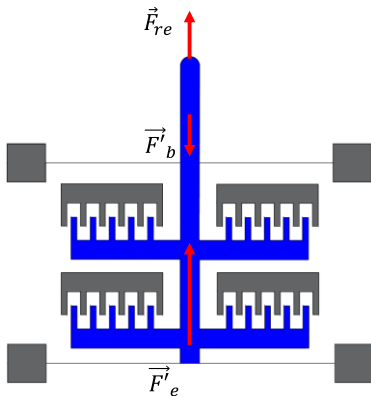


Hình 8. Mô phỏng tìm độ cứng của dầm chữ V

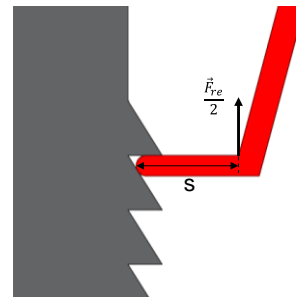
### 3.3. Tính toán điện áp khi nhả vật

Khi cấp điện áp  $V_2$  vào điện cực cố định (11) và (16) của cơ cấu rãnh lực phía dưới, dầm rãnh lực tạo ra lực đẩy  $F'_e$  được xác định giống như lực tĩnh điện  $F_e$  ở công thức (3) [14]:

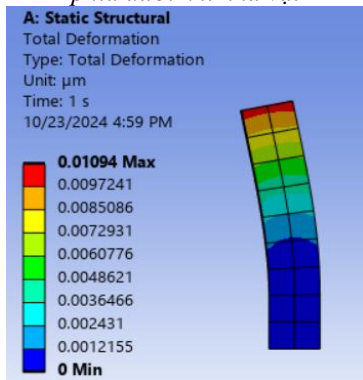
$$F'_e = \frac{n_2 b \epsilon \epsilon_0 V_2^2}{g_0} \quad (31)$$



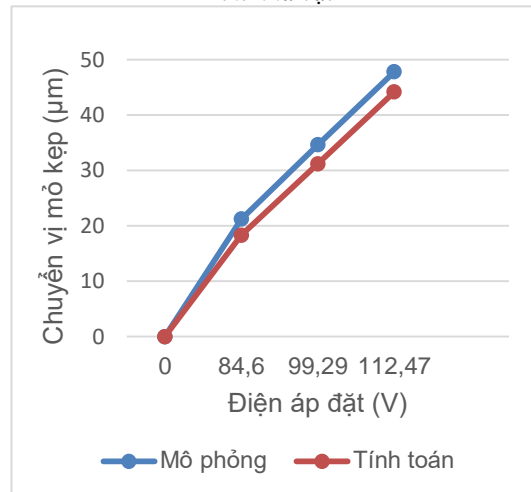
Hình 9. Phân tích lực tại dầm rãnh lực phía dưới khi nhả vật



Hình 10. Phân tích lực tại đầu dầm chữ V khi nhả vật



Hình 11. Mô phỏng đầu di động dầm chữ V



Hình 12. So sánh chuyển vị mô phỏng và tính toán

Phân tích lực khi nhả vật như trên Hình 9, phương trình cân bằng lực của dầm rãnh lực phía dưới được thể hiện bởi công thức:  $F_{re} = F'_e - F'_b$  (32)

Trong đó,  $F'_b$  được tính bởi công thức [14]:  $F'_b = k_b \Delta x'$  (33)

$$k_b = 2 \times \frac{24EI}{L^3} = \frac{4EbW_1^3}{L_1^3} = 7,39 \left( \frac{\mu N}{\mu m} \right)$$

Để đẩy cơ cấu về trạng thái ban đầu, lực đẩy của cơ cấu răng lược phía dưới phải đủ lớn để vượt qua răng cóc cuối cùng (khi đó lực đàn hồi kéo về của tay kẹp và dầm răng lược ở hai bên là rất nhỏ, vì vậy ta coi lực kéo về chủ yếu do lực đẩy  $F_{re}$  gây ra – Hình 10).

Coi đầu di động của dầm chữ V như một dầm có dạng hình hộp chữ nhật với vùng cố định là bề mặt ngoài của dầm chữ V. Ở đây, lực cần thiết để uốn cong đầu dầm chữ V để nó trượt trên răng cóc (có nghĩa là chuyển vị đầu dầm đạt khoảng 0,01  $\mu m$ ) và di chuyển ngược lại về vị trí ban đầu là  $F_u = 250 \mu N$  (Giá trị lực này được ước lượng từ kết quả mô phỏng chuyển vị Hình 11).

Nói cách khác, để uốn cong đầu di động của dầm chữ V, lực đẩy phải thỏa mãn:

$$F_{re} = 2F_u \quad (34)$$

Từ (32) - (34), ta có:  $F'_e - F'_b = 2F_u$  (35)

Từ các công thức (31) - (35), ta tìm được mối quan hệ giữa điện áp và chuyển vị  $\Delta x'$ :

$$V_2 = \sqrt{\frac{(500+k_b \Delta x')g_0}{n_2 b \epsilon \epsilon_0}} \quad (36)$$

Vậy, điện áp cần thiết để dầm chữ V trượt về vị trí đầu (vật bị nhả kẹp) là:  $V_2 = 107,88$  (V).

### 3.4. Nhận xét

Hình 12 mô tả quan hệ chuyển vị mô phỏng và tính toán của má kẹp khi điện áp dần thay đổi từ 0 đến 112,47V.

Kết quả so sánh giữa tính toán và mô phỏng cho thấy độ lệch lớn nhất giữa hai phương pháp là 13,8% tại điện áp 84,6V. Nguyên nhân chính của sai số khi tính toán có thể do hiệu ứng viền của tụ điện chưa được kể đến trong biểu thức (3), và do biến dạng phi tuyến của dầm răng lược chưa được kể đến trong công thức 5.

Mặc dù vậy, sai số này có thể chấp nhận được khi thiết kế, tính toán sơ bộ chuyển vị của vi tay gấp, kể cả trong các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như vi lắp ráp hoặc vi phẫu.

### 4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một thiết kế mới của vi tay gấp tính điện răng lược kiểu tự khóa. Phân tích chuyển vị và tính toán lực cho vi tay gấp cũng được thực hiện. Ưu điểm của loại vi tay gấp này là sử dụng khớp bản lề tại A thay cho khớp đàn hồi nhằm giảm tập trung ứng suất, nâng cao tuổi thọ của vi tay gấp; hệ số khuếch đại lớn ( $k = OC/OA = 3$ ) nhờ cơ cấu khuếch đại chuyển vị nên tăng độ linh hoạt khi kẹp các mẫu vật có đường kính khác nhau; khả năng tự đẩy vật ra khỏi má kẹp nhờ con trượt (8) và đặc biệt là khả năng tự khóa vật sau khi kẹp nhờ cơ cấu răng cóc khóa một chiều không cần duy trì điện áp kẹp  $V_1$ , giúp giảm bớt năng lượng tiêu thụ của tay kẹp khi kẹp và di chuyển vật có các đường kính khác nhau. Độ dịch chuyển và phân bố ứng suất trên các phần tử đàn hồi cũng được mô phỏng kiểm tra bằng phần mềm ANSYS để đảm bảo độ bền của cơ cấu khi làm việc. Kết quả mô phỏng và tính toán cho thấy vi tay gấp có thể đạt được chuyển vị 44,16  $\mu m$  tại một bên má kẹp (khoảng cách MM' như Hình 3) khi điện áp dần đạt giá trị 112,47 V. Trong giai đoạn tiếp theo, quá trình chế thử và thí nghiệm đo chuyển vị của vi tay gấp sẽ được thực hiện. Vi tay gấp này tương lai có thể được ứng dụng trong hệ thống lắp ráp vi mô hoặc trong hệ thống vi robot giúp kẹp, di chuyển và định vị chính xác vị trí của các mẫu vật.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. Iqbal and A. Malik, "A review on MEMS based micro displacement amplification mechanisms," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 300, 2019, Art. no. 111666, doi: 10.1016/j.sna.2019.111666.
- [2] M. Verotti, A. Dochshanov, and N. P. Belfiore, "A comprehensive survey on microgrippers design: Mechanical structure," *Journal of Mechanical Design*, vol. 139, no. 6, 2017, doi: 10.1115/1.4036351.

- 
- [3] H. P. Pham, V. D. Bui, and M. C. Pham, "Study and Design of Micro Gripper Driven by Electrothermal V-Shaped Actuator," *JST: Smart Systems and Devices*, vol. 1, no. 1, pp. 108-115, 2021, doi: 10.51316/jst.150.ssad.2021.31.1.14.
- [4] G. Shao, H. O. T. Ware, J. Huang, R. Hai, L. Li, and C. Sun, "3D printed magnetically-actuating micro-gripper operates in air and water," *Additive Manufacturing*, vol. 38, 2021, Art. no. 101834, doi: 10.1016/j.addma.2020.101834.
- [5] Y.-Y. Feng, S.-J. Chen, P.-H. Hsieh, and W.-T. Chu, "Fabrication of an electro-thermal micro-gripper with elliptical cross-sections using silver-nickel composite ink," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 245, pp. 106-112, 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.04.045.
- [6] A. Deutschinger, U. Schmid, M. Schneider, W. Brenner, H. Wanzenböck, B. Volland, T. Ivanov, and I. W. Rangelow, "Characterization of an electro-thermal micro gripper and tip sharpening using FIB technique," *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 1901-1908, 2010, doi: 10.1007/s00542-010-1110-0.
- [7] P. Bauwens, S. Cornelis, and J. Doutreloigne, "A leakage compensated charge control driving circuit with sensor feedback for a comb drive actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 329, 2021, Art. no. 112799, doi: 10.1016/j.sna.2021.112799.
- [8] Y. Jia, M. Jia, and Q. Xu, "A Dual-Axis Electrostatically Driven MEMS Microgripper Regular Paper," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 11, 2014, doi: 10.5772/59677.
- [9] A. R. Kalaiarasi and S. H. Thilagar, "Design and modeling of electrostatically actuated microgripper," *Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*, August 2012, doi: 10.1109/MESA.2012.6275528.
- [10] M. Hamed, P. Salimi, and M. Vismeh, "Simulation and experimental investigation of a novel electrostatic microgripper system," *Microelectronic Engineering*, vol. 98, pp. 467-471, October 2012, doi: 10.1016/j.mee.2012.07.096.
- [11] W. C. Tang *et al.*, "Electrostatic-comb drive of lateral polysilicon resonators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 21, no. 1-3, pp. 328-331, 1990, doi: 10.1016/0924-4247(90)85065-C.
- [12] Y. Hao, C. Wang, Z. Sun, W. Yuan, and H. Chang, "Rotatory microgripper based on a linear electrostatic driving scheme," *Microelectronic Engineering*, vol. 248, 2021, Art. no. 111601, doi: 10.1016/j.mee.2021.111601.
- [13] S. A. Bazaz, F. Khana, and R. I. Shakoor, "Design, simulation and testing of electrostatic SOI MUMPs based microgripper integrated with capacitive contact sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 167, no. 1, pp. 44-53, 2011, doi: 10.1016/j.sna.2010.12.003.
- [14] P. H. Pham, L. B. Dang, and H. N. Vu, "Micro robot system with moving micro-car driven by electrostatic comb-drive actuators," *Microsystem Technologies*, vol. 16, pp. 505-510, 2010, doi: 10.1007/s00542-010-1017-9.