

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM**

HỒ NHẬT LINH

**PHÁT TRIỂN VÀ TỐI ƯU HÓA TAY KẸP CHI TIẾT DẠNG TRỤC SỬ
DỤNG CƠ CẤU MỀM**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số chuyên ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – 07.2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. LÊ HIẾU GIANG

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. ĐÀO THANH PHONG

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở/Trường học
tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày tháng năm

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Công trình liên quan trực tiếp đến luận án

1. **Nhat Linh Ho**, Thanh-Phong Dao, Hieu Giang Le, Ngoc Le Chau (2019). “Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya”. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 1205–1220. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3445-2>. (SCIE - Q1).
2. **Nhat Linh Ho**, Thanh-Phong Dao, Ngoc Le Chau, Shyh-Chour Huang (2019). “Multi-objective optimization design of a compliant micro-gripper based on hybrid teaching learning-based optimization algorithm”, *Microsystem Technologies*, 25, 2067–2083. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4222-6> (SCIE - Q2).
3. Thanh Phong Dao, **Nhat Linh Ho**, Tan Thang Nguyen, Hieu Giang Le, Pham Toan Thang, Huy Tuan Pham, Hoang Thinh Do, Minh Duc Tran, Trung Thang Nguyen (2017). “Analysis and optimization of a micro displacement sensor for compliant micro-gripper”, *Microsystem Technologies*, 23, 5375–5395. <https://doi.org/10.1007/s00542-017-3378-9> (SCIE - Q2).
4. Ngoc Le Chau, **Nhat Linh Ho**, Ngoc Thoai Tran, Thanh-Phong Dao (2021). “Analytical Model and Computing Optimization of a Compliant Gripper for the Assembly System of Mini Direct-Current Motor”. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence*, 12(1), <https://doi.org/10.4018/IJACI.2021010101>. (SCOPUS)
5. **Nhat Linh Ho**, Minh Phung Dang, Thanh-Phong Dao (2020). “Design and analysis of a displacement sensor-integrated compliant micro-gripper based on parallel structure”, *Vietnam Journal of Mechanics*, 42 (4), 363–374. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/14874> (ACI index)

6. Ngoc Le Chau, **Nhat Linh Ho**, Tran The Vinh Chung, Shyh-Chour Huang, Thanh-Phong Dao (2021). “Computing Optimization of a Parallel Structure-Based Monolithic Gripper for Manipulation Using Weight Method Based Grey Relational Analysis”. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence*, 12(3), <https://doi.org/10.4018/IJACI.2021070103>. (**SCOPUS**)
7. **Nhat Linh Ho**, Minh Phung Dang, Ngoc Le Chau, Thanh-Phong Dao, Hieu Giang Le (2017). “A hybrid amplifying structure for a compliant micro-gripper”, *The 10th National Conference on Mechanics*, Ha Noi 12/2017, 42. (**National Conference**).

B. Công trình liên quan gián tiếp đến luận án

1. Duc Nam Nguyen, **Nhat Linh Ho**, Thanh-Phong Dao, Ngoc Le Chau (2019). “Multi-objective optimization design for a sand crab-inspired compliant microgripper”, *Microsystem Technologies*, 25, 3991–4009. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04331-4> (**SCIE - Q2**)
2. **Nhat Linh Ho**, Thanh-Phong Dao, Shyh-Chour Huang, Hieu Giang Le (2016). “Design and Optimization for a Compliant Gripper with Force Regulation Mechanism, *International Journal of Mechanical*”, *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Sciences*, 10.0(12). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1339720> (**International Journal**)
3. **Nhat Linh Ho**, Thanh Phong Dao, Hieu Giang Le (2017). “Analysis of sensitivity of a compliant micro-gripper”, *Journal of Technical Education Science*, 42, 53-61. (UTE – HCMC, **Domestic Journal**)

Chương 1 GIỚI THIỆU

1.1. Bối cảnh và động lực

Tay kẹp là một bộ phận nằm trong cánh tay rô-bốt và nó được phát triển để thay thế hoặc hỗ trợ con người trong các công việc lặp đi lặp lại, các công việc trong môi trường độc hại và nguy hiểm. Tay kẹp được sử dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau, chẳng hạn như y tế, sinh học, xử lý vật liệu, dây chuyền lắp ráp tự động và hỗ trợ con người trong việc cấp phôi cho máy. Tay kẹp công nghiệp được ưu tiên sử dụng trong các nhiệm vụ phức tạp do chi phí nhân công cao và chi phí cho tay kẹp thấp. Có năm loại tay kẹp công nghiệp cơ bản: (1) tay kẹp điện, (2) khí nén, (3) thủy lực, (4) từ (nam châm), (5) chân không. Các tay kẹp truyền thống có những hạn chế như cồng kềnh và chúng được tạo thành bởi nhiều chi tiết và chi phí bảo trì cao. Các tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm (Compliant mechanism - CG) đã được phát triển để giải quyết những vấn đề này, vì chúng có cấu trúc nguyên khối, ít bộ chi tiết, yêu cầu bôi trơn và ma sát thấp hơn, nhẹ và có chi phí thấp hơn. Tuy nhiên, sự phát triển của các cảm biến chuyển vị dành cho các CG, thiết bị cho phép kiểm soát trực tiếp hành trình và lực, là còn hạn chế. Ngoài ra, không có nghiên cứu nào liên quan đến các CG ứng dụng kẹp những chi tiết dạng trục với kích thước nhỏ như là trục của mô tơ điện một chiều cỡ nhỏ (mô-tơ rung ứng dụng cho điện thoại di động hoặc thiết bị điện tử). Do đó, động lực cho luận án này là phát triển một CG có cấu trúc không đối xứng với cảm biến chuyển vị tích hợp để tự đo hành trình của mô kẹp và một CG có cấu trúc đối xứng để định hướng ứng dụng trong hệ thống lắp ráp mô tơ điện một chiều cỡ nhỏ. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần phát triển các kỹ thuật thiết kế, phân tích và tối ưu hóa các CG cho ngành công nghiệp lắp ráp.

1.2. Mô tả vấn đề của tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm được đề xuất

Luận án này đề xuất hai CG để kẹp và nhả chi tiết dạng trục, tập trung vào lắp ráp cụm linh kiện điện tử nhỏ như trục và lõi của động cơ rung cho điện thoại di động (Hình 1.3). Vấn đề đầu tiên cần được giải quyết là làm thế nào để đo lường

sự dịch chuyển của mỏ kẹp một cách nhanh chóng và chính xác. Vấn đề thứ hai là làm thế nào để tăng cường hành trình và tốc độ của bộ kẹp. Để giải quyết những vấn đề này, luận án trình bày một tay kẹp không đối xứng có tích hợp cảm biến chuyển vị và một tay kẹp đối xứng được tối ưu hóa để cải thiện hành trình và tần số cộng hưởng.

Trong sản xuất điện tử, tay kẹp giữ vật không cần nhiều ma sát. Do đó, mô-đun kẹp cơ học truyền thống cung cấp đủ lực kẹp. Hơn nữa, độ trễ không phải là một yếu tố quan trọng cần xem xét do sự dịch chuyển tối thiểu của tay kẹp [1].



Hình 1.3: Mô-tơ rung cỡ nhỏ: a) Điện thoại di động, b) Mô-tơ rung trong điện thoại di động, c) Sơ đồ lắp ráp [2].

1.3. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án này bao gồm: (i) Một cảm biến chuyển vị sử dụng cho CG có cấu trúc không đối xứng; (ii) Một CG có cấu trúc đối xứng để kẹp và thả chi tiết có dạng hình trụ.

1.4. Mục tiêu nghiên cứu

(i) Phát triển một cảm biến chuyển vị để đo trực tiếp hành trình của một CG không đối xứng; (ii) Phát triển một CG có cấu trúc đối xứng kẹp và thả các chi tiết có dạng hình trụ; (iii) Xây dựng các phương trình toán học mô tả hành vi tĩnh học và động lực học của các tay kẹp được đề xuất; (iv) Phát triển các phương pháp tối ưu hóa dựa trên điện toán mềm mới nhằm cải thiện hiệu suất của các CG được đề xuất.

1.5. Phạm vi nghiên cứu

Theo [3], phạm vi của luận án này như sau: (i) Thiết kế một cảm biến chuyển vị mới để đo trực tiếp hành trình của CG có cấu trúc không đối xứng với phạm vi

chuyển vị trên 1000 μm , tần số trên 60 Hz và lực kẹp nhỏ nhất; (ii) Thiết kế một CG có cấu trúc đối xứng mới với phạm vi chuyển vị trên 1000 μm và tần số cao trên 60 Hz; (iii) Xây dựng các phương trình vi tính học và động lực học của bộ kẹp; (iv) Phát triển các kỹ thuật tối ưu hóa hiệu quả.

1.6. Phương pháp nghiên cứu

Trong luận án này, các phương pháp nghiên cứu sau được sử dụng: (i) Phương pháp thực nghiệm và tri thức chuyên gia; (ii) Phương pháp mô phỏng số; (iii) Quy hoạch thực nghiệm; (iv) Mô hình phân tích và phương pháp thông minh dựa trên trí tuệ nhân tạo; (v) Phương pháp tối ưu hóa; (vi) Phương pháp thực nghiệm.

1.7. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của luận án

1.7.1. Ý nghĩa khoa học

Ý nghĩa khoa học của luận án bao gồm các điểm sau: (i) Đề xuất nguyên lý thiết kế cảm biến chuyển vị mới; (ii) Phát triển các phương pháp thiết kế mới cho CG; (iii) Phương pháp giải tích và tính toán số; (iv) Các phương pháp tối ưu hóa kết hợp mới.

1.7.2. Ý nghĩa thực tiễn

Ý nghĩa thực tiễn của luận án bao gồm các điểm sau: (i) Cảm biến chuyển vị được phát triển dựa trên cơ cấu mềm có thể tự đo hành trình; (ii) Các tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm được phát triển có thể kẹp và nhả chi tiết dạng trục để sử dụng trong ngành lắp ráp; (iii) Các phương pháp thiết kế, phân tích và tối ưu hóa có thể được sử dụng cho CG cũng như các lĩnh vực kỹ thuật liên quan; (iv) Luận án có thể làm tài liệu tham khảo cho học viên sau đại học.

1.8. Đóng góp mới của luận án

Về khoa học: (i) Phương pháp thiết kế và phân tích mới; (ii) Các nguyên tắc thiết kế mới; (iii) Phương pháp điện toán mềm; (iv) Phương pháp tối ưu hóa kết hợp hiệu quả. **Về ứng dụng:** (i) Các cảm biến thay thế với chi phí thấp; (ii) Định hướng ứng dụng tiềm năng trong dây chuyền lắp ráp hoặc thu hoạch thực phẩm.

1.9. Cấu trúc của luận án

Chương 1: Mở đầu; Chương 2: Tổng quan; Chương 3: Cơ sở lý thuyết; Chương 4: Thiết kế, phân tích và tối ưu hóa cảm biến chuyển vị cho tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có cấu trúc không đối xứng; Chương 5: Mô hình tính toán và tối ưu hóa tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có cấu trúc đối xứng sử dụng cho gắp và thả chi tiết dạng trụ tròn; Chương 6: Kết luận và hướng phát triển.

Chương 2 TỔNG QUAN VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Tổng quan về cơ cấu mềm

2.1.1. Định nghĩa

Tương tự như cơ cấu cứng truyền thống, cơ cấu mềm dựa trên khớp bản lề uốn cũng có chức năng truyền lực, mô-men xoắn và chuyển động, nhưng dựa trên biến dạng đàn hồi của các phần tử mềm (tham khảo tài liệu [4]).

2.1.2. Phân loại cơ cấu mềm

2.1.2.1. Phân loại theo độ mềm [5]

2.1.2.2. Phân loại theo khả năng biến dạng [5]

2.1.2.3. Phân loại dựa theo sự liên kết của các phân đoạn mềm và chuyển động của cơ cấu [6]

2.1.2.4. Phân loại theo chức năng [7]

2.1.3. Khớp mềm hoặc khớp lá

Kết quả nghiên cứu trong tài liệu tham khảo [8] gợi ý rằng khớp lá có tiết diện hình chữ nhật là lựa chọn tốt nhất cho các kẹp được đề xuất.

2.2 Bộ truyền động

Bộ truyền động áp điện được sử dụng để vận hành các cơ cấu dựa trên cơ cấu mềm do kích thước nhỏ, chuyển vị chính xác và đáp ứng nhanh.

2.3 Khuếch đại chuyển vị dựa trên cơ cấu mềm

Phần này trình bày một số công trình nghiên cứu đáng chú ý về cấu trúc khuếch đại theo sau.

2.3.1. Cấu trúc đòn bẩy

2.3.2. Cấu trúc Scott-Russell

2.3.3. Cấu trúc cầu

Luận án sử dụng cấu trúc đòn bẩy do những lợi ích đặc biệt của nó, chẳng hạn như tỷ lệ khuếch đại cao hơn, hiệu quả, đơn giản và chi phí thấp.

2.4 Cảm biến chuyển vị dựa trên cơ cấu mềm

Để đảm bảo hoạt động tin cậy, CG cần được kiểm soát sự thay đổi vị trí, nhưng các cảm biến thương mại có thể đắt tiền. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã phát triển các cảm biến tích hợp sử dụng các cảm biến lá đo biến dạng (strain gauges) [9], [10]. Bằng cách tích hợp các cảm biến dịch chuyển vào các tay kẹp, các lợi ích như không gian làm việc, khả năng kiểm soát, độ chính xác, phản hồi lực và an toàn có thể đạt được, nhưng việc thực hiện tùy thuộc vào cấu trúc của tay kẹp. Trong bối cảnh này, luận án trình bày một cảm biến chuyển vị tích hợp nguyên khối được thiết kế cho một tay kẹp có cấu trúc không đối xứng.

2.5 Tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm tích hợp cảm biến chuyển vị

Tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có hai loại: có hoặc không có cảm biến. Tay kẹp không có cảm biến rẻ hơn nhưng kém chính xác hơn, trong khi tay kẹp có cảm biến đắt hơn nhưng cho khả năng kiểm soát tốt hơn. Việc lựa chọn tay kẹp phụ thuộc vào mức độ chính xác cần thiết cho từng ứng dụng [3], [11].

2.6 Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước

2.6.1. Nghiên cứu ngoài nước

2.6.1.1. Nghiên cứu về cơ cấu mềm

Cơ cấu mềm xuất hiện vào những năm 1960 và đạt được sự quan tâm lớn vào những năm 1990. Một số tác giả trong lĩnh vực này đã đề xuất các mô hình và kỹ thuật khác nhau, chẳng hạn như Howell and Midha (1994) [12], Chen và cộng sự (2023) [13], v.v. Xem Tài liệu tham khảo [14] để biết thêm thông tin.

2.6.1.2. Nghiên cứu về tay kẹp rô-bốt và tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm

Ngành công nghiệp rô-bốt đã phát triển nhiều loại tay kẹp khác nhau cho các ứng dụng khác nhau, bao gồm sản xuất công nghiệp, y sinh, phân loại sản phẩm và đóng gói. Ví dụ như các nghiên cứu của các nhà nghiên cứu như Molfino et al. (2006) [15], Chen et al. (2012) [16], Lu et al. (2014) [17], Nie et al. (2018) [18], và nhiều nghiên cứu khác được cung cấp trong tài liệu tham khảo [19]. Tuy nhiên, không có CG nào ứng dụng để gấp, định vị và thả các vật thể có biên dạng hình trụ định hướng ứng dụng cho hệ thống lắp ráp tương tự như việc lắp ráp cụm chi tiết "trục và lõi" của động cơ mô tơ rung được nghiên cứu.

2.6.2. Nghiên cứu trong nước

2.6.2.1. Nghiên cứu về cơ cấu mềm

Một cuộc khảo sát được thực hiện tại Việt Nam cho thấy hiện có rất ít nhóm nghiên cứu về cơ cấu mềm. Các nhóm đã được xác định bao gồm: nhóm nghiên cứu của Phạm, Trần, Đào, Đặng và một nhóm nghiên cứu khác cùng tên Phạm. Các nhà nghiên cứu Việt Nam chỉ mới bắt đầu làm việc trong lĩnh vực này từ những năm 2010. Phạm và cộng sự (2013) [20], Đào và Huang (2016) [21], Trần và cộng sự (2018) [22], và Nguyễn và cộng sự (2021) [23], và Châu và cộng sự (2021) [24].

2.6.2.2. Nghiên cứu về tay kẹp rô-bốt và tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm

Ngành công nghiệp tay kẹp rô-bốt tại Việt Nam đã có những bước phát triển đáng kể trong những năm gần đây nhờ hoạt động nghiên cứu và ứng dụng công nghệ vào sản xuất, chế tạo. Một số nghiên cứu đã được thực hiện bởi các nhà nghiên cứu trong nước, bao gồm Anh và cộng sự (2016) [25], Nguyễn và cộng sự (2022) [26], v.v. Ngoài ra, CG gần đây cũng được quan tâm với những nghiên cứu như: Lâm và cộng sự (2017) [27], Nguyễn và cộng sự (2022) [28], v.v. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu nào tương tự như tay kẹp được đề xuất trong luận án này.

2.7 Kết luận

Chương này bao gồm các chủ đề sau: khái niệm và lịch sử phát triển của cơ cấu

mềm, tổng quan về phân loại của chúng và giới thiệu về khớp mềm thường được sử dụng. Các khái niệm về bộ truyền động sử dụng cho cơ cấu mềm cũng được giới thiệu. Ngoài ra, các vấn đề về bộ khuếch đại dịch chuyển và cảm biến dịch chuyển dựa trên cơ cấu mềm cũng được thảo luận. Việc tích hợp cảm biến chuyển vị vào một tay kẹp được giải thích, các kết quả nghiên cứu liên quan cũng được giới thiệu. Cuối cùng, một cuộc khảo sát nghiên cứu trong nước và quốc tế về cơ cấu mềm, tay kẹp rô-bốt và tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm được tóm tắt. Kết quả khảo sát cho thấy nhiều cơ hội nghiên cứu về cơ cấu mềm và ứng dụng của chúng tại Việt Nam.

Chương 3 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

3.1. Thiết kế thực nghiệm

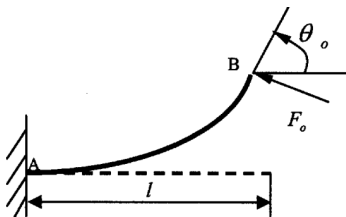
Luận án này sử dụng phương pháp Taguchi để thiết kế thực nghiệm và tìm ra lời giải tối ưu, dựa trên hai tiêu chí: (i) Càng nhỏ càng tốt và (ii) Càng lớn càng tốt [29].

3.2. Các phương pháp và cách tiếp cận mô hình hóa cho cơ cấu mềm

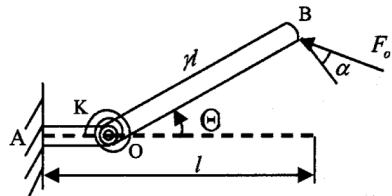
3.2.1. Các phương pháp phân tích

Trong luận án này, các phương pháp sau đây được sử dụng để mô tả hành vi của tay kẹp.

3.2.1.1. Phương pháp mô hình vật thể giả cứng (PRBM)



Hình 3.3: Dầm cantilever [30].



Hình 3.4: PRBM của dầm cantilever [30].

Để phân tích hành vi của CG trong điều kiện có độ biến dạng lớn và phi tuyến, luận án này sử dụng mô hình vật thể giả cứng (PRBM) [31], mô hình này thay thế các phần tử cứng bằng các phần tử mềm (tức là lò xo xoắn) với lực biến dạng

tương đương (xem Hình 3.3 and Hình 3.4).

3.2.1.2. Phương pháp mô hình hóa động học dựa trên Lagrange

Phương trình Lagrange mô tả động học được xác định như sau:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} = Q, \quad (3.8)$$

Trong đó: y chuyển vị đầu ra, V là thế năng, T là động năng, và Q là lực tổng quát tác động để tạo ra sự thay đổi theo trục y .

Thông qua mối quan hệ giữa V , T , K_{ds} và M của các lò xo, tần số dao động (f) được tính theo phương trình (3.10) như sau:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{ds}}{M}}, \quad (3.10)$$

3.2.1.3. Phương pháp phần tử hữu hạn

Trong luận án này, phương pháp phân tích phần tử phi tuyến trong phần mềm ANSYS được sử dụng để mô tả hành vi động và tĩnh học của tay kẹp [32].

3.2.1.4. Phương pháp họa đồ, phương pháp vector, và phương pháp giải tích

Trong luận án này, phương pháp họa đồ, phương pháp vector và phương pháp giải tích được sử dụng để mô tả chuyển động và ứng xử của tay kẹp. Xem tài liệu [33] để có nhiều thông tin chi tiết hơn.

3.2.2. Phương pháp mô hình hóa theo hướng dữ liệu

Luận án sử dụng ANFIS [34], một kỹ thuật mô hình hóa dựa trên dữ liệu, để thiết lập mối quan hệ giữa biến thiết kế và đáp ứng đầu ra của bài toán tối ưu hóa.

3.2.3. Phương pháp thống kê

Trong nghiên cứu này, ANOVA [35] được sử dụng để kiểm tra độ nhạy của các tham số thiết kế và phân tích sự đóng góp của chúng đối với đáp ứng đầu ra.

3.3. Các phương pháp tối ưu hóa

3.3.1. Giải thuật Metaheuristic

Các thuật toán metaheuristic được sử dụng để giải quyết các vấn đề khó khăn mà

các phương pháp chính xác không thể giải quyết được. Cách tiếp cận heuristic cho phép tinh chỉnh hoặc khám phá các giải pháp mới theo thời gian. Các thuật toán phổ biến bao gồm GA, PSO, SA, tìm kiếm Tabu, TLBO và Jaya. TLBO và Jaya đã được sử dụng trong luận án này.

3.3.2. Tối ưu hóa dựa trên dữ liệu

Tối ưu hóa dựa trên dữ liệu liên quan đến việc thu thập, phân tích, tối ưu hóa, đánh giá và liên tục cải thiện dữ liệu. Các phương pháp như TM, GRA, TLBO và ANFIS được sử dụng vì các ưu điểm của chúng như dễ thực hiện và hội tụ nhanh. Các kỹ thuật TLBO, ANFIS, Jaya được sử dụng trong luận văn này

3.4. Trọng số trong bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu

Các giá trị trọng số (weight factor - WF) được sử dụng trong các bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu (MOOP) để cân bằng tầm quan trọng của các mục tiêu khác nhau. Chúng có thể được quyết định dựa vào kinh nghiệm chuyên gia, nhà thiết kế hoặc được xác định bằng các phương pháp như: phương pháp gán trực tiếp, phương pháp véc tơ riêng hoặc phương pháp thống kê hai biến [36]–[39]. Trong luận văn này, phương pháp thống kê được sử dụng để tính toán các trọng số.

3.5. Kết luận

Chương này bao gồm các lý thuyết cơ bản để phân tích, mô hình hóa và tối ưu hóa các cơ cấu mềm. Các phương pháp phân tích bao gồm Taguchi, Mô hình giá cứng, Lagrange, phần tử hữu hạn, đồ họa, véc tơ và phân tích toán học. Kỹ thuật mô hình hóa ANFIS, kỹ thuật tối ưu hóa liên quan đến các thuật toán Metaheuristic và các phương pháp thông minh. Các kỹ thuật phân tích thống kê tính toán các giá trị trọng số và giới hạn không gian tìm kiếm để tối ưu hóa.

Chương 4 THIẾT KẾ, PHÂN TÍCH VÀ TỐI ƯU HÓA CẢM BIẾN CHUYÊN VỊ CHO TAY KẸP DỰA TRÊN CƠ CẤU MỀM CÓ CẤU TRÚC KHÔNG ĐỐI XỨNG

4.1 Mục tiêu nghiên cứu cảm biến chuyên vị cho tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm

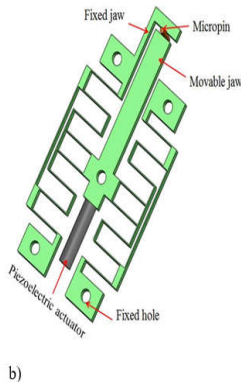
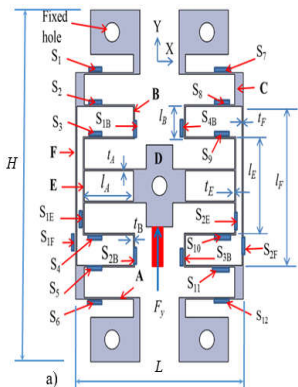
Chương này nhằm mục đích giải quyết việc đo trực tiếp hành trình của hàm kẹp bằng cách xem xét hai vấn đề chính. Đầu tiên, một cảm biến chuyển vị sẽ được phát triển và tích hợp vào tay kẹp để cải thiện tính kinh tế và giảm sự công kênh của nó. Thứ hai, một cách tiếp cận mới sẽ được đề xuất để phân tích, thiết kế và tối ưu hóa tay kẹp, bao gồm kỹ thuật tính toán giá trị trọng số chính xác. Yêu cầu kỹ thuật của bộ kẹp đề xuất sẽ được trình bày trong phần 4.2.2.

4.2 Cấu trúc của bộ cảm biến chuyển vị được đề xuất

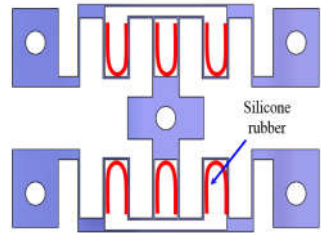
Dựa trên kinh nghiệm của nhà thiết kế và các nghiên cứu có liên quan [40]. Thiết kế cơ học của cảm biến dịch chuyển được đề xuất trong Hình 4.1.

4.2.1. Thiết kế cơ khí và nguyên tắc hoạt động

4.2.1.1. Mô tả cấu trúc



Hình 4.1: Thiết kế cấu trúc: (a) Cảm biến chuyển vị và (b) Tay kẹp có cấu trúc đối xứng.



Hình 4.2: Cao su silicon được gia cố dọc theo đường viền của khoang.

Cảm biến chuyển vị được đề xuất bao gồm một bộ di động (mobile platform) và cảm biến lá đo biến dạng (strain gauges) được mô tả như Hình 4. 1(a). Mobile platform được thiết kế để hoạt động với một bộ kẹp tương thích không đối xứng như minh họa trong Hình 4. 1(b). Các FH bao gồm các loại A, B, E và F. Các khớp đàn hồi được dán các strain gauges trên các bề mặt FH ($S_1 \sim S_{12}$), ($S_{1B} \sim S_B$) và (S_{1E} , S_{2E} , S_{1F} , S_{2F}). Vật liệu chế tạo là Al7075. Cao su silicon (SR) được sử dụng để cải thiện độ cứng của mobile platform (Hình 4. 2).

4.2.1.2. Nguyên lý làm việc của cảm biến chuyển vị

Để tạo thuận lợi cho việc thiết kế cảm biến chuyển vị, mạch “half-Wheatstone bridge” được sử dụng, trong Hình 4. 3. Sơ đồ của hình này có thể được tìm thấy trong [41]. Hệ số đo của cảm biến biến dạng có thể tính theo phương trình sau:

$$G = \frac{\Delta R}{R \times \varepsilon}, \quad (4.1)$$

Qua quá trình phân tích, độ nhạy của các Strain gauge (S) được tính toán bởi phương trình (4.10):

$$S = \frac{3V_{ex} G t_A}{l_A^2}, \quad (4.10)$$

Giá trị này có thể được đo bằng cách xem xét độ dịch chuyển đầu ra của bộ cảm biến dịch chuyển và điện áp đầu ra.

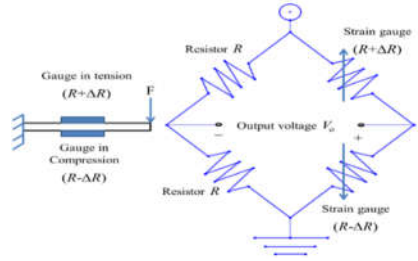
4.2.2. Tiêu chuẩn kỹ thuật của cảm biến chuyển vị đề xuất

Đối tượng kẹp trong nghiên cứu này được giả thuyết có biên dạng giống như trục của DC mô-tơ với đường kính 600-800 μm [3], cảm biến chuyển vị phải có phạm vi chuyển vị lớn hơn 1000 μm , tần số lớn hơn 60Hz, và lực gấp là nhỏ nhất.

4.3 Phân tích ứng xử của cảm biến chuyển vị

4.3.1. Biến dạng và ứng suất

Trong phần này, các vị trí thích hợp được phân tích để dán các strain gauges. Mối quan hệ giữa biến dạng và ứng suất được trình bày theo định luật Hooke's law. Phân tích này thực hiện với hai trường hợp: (i) Thực nghiệm; (ii) Phân tích FEM. Ngoài ra, để tăng độ cứng của cấu trúc, SR được thêm vào ở một vài vị trí. Kết quả thu được ở mỗi vị trí trong 3 trường hợp: (i) Thực nghiệm với SR; (ii) Thực nghiệm không có SR; và FEA không có SR được so sánh. Do cấu trúc đối xứng của tay kẹp, chỉ một nửa cấu trúc (nhóm A, B, E và F của FH ở các vị trí bên trái) được đánh giá. Thí nghiệm được thiết lập như trong Hình 4.5. Biến dạng



Hình 4.3: Mạch cầu half-Wheatstone.

của từng vị trí được đo riêng biệt. Các thí nghiệm được đo 5 lần. Lực được tăng dần với các giá trị 2,2 N, 4,6 N và 7,8 N. Kết quả thu được tại các vị trí dán strain gauges được liệt kê trong Bảng 4.4 và được vẽ đồ thị để so sánh tương tự như Hình 4.10. Như trình bày trong Bảng 4.4, ứng suất cao nhất ở vị trí (S_{2B}), tiếp theo là (S_{2E}) và (11), trong đó nhóm F có ứng suất thấp nhất. Vì vậy, cần phải xem xét cẩn thận do tác động của nó đối với độ bền mỏi của nền tảng.

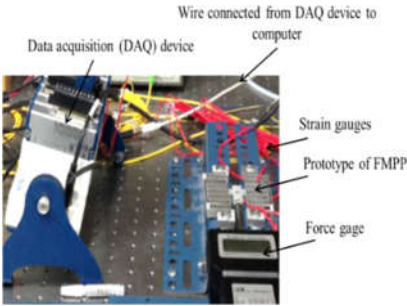


Figure 4.5: Đo biến dạng.

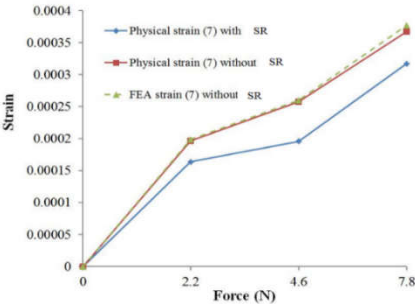


Figure 4.10: Biến dạng của vị trí (7) nhóm A trong trường hợp có SR và không có SR.

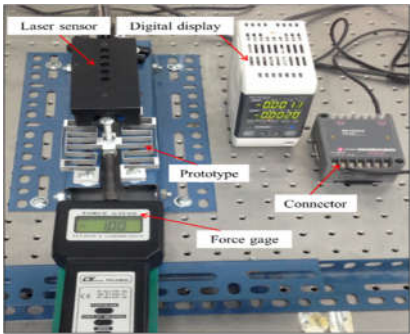
Bảng 4.4: Ứng suất tại các điểm đo khác nhau.

Vị trí đo	Giá trị ứng suất (MPa)
Vị trí (7)	26,78
Vị trí (8)	60,94
Vị trí (9)	51,93
Vị trí (10)	51,2
Vị trí (11)	70,48
Vị trí (12)	41,05
Vị trí (S_{1B})	37,49
Vị trí (S_{2B})	85,31
Vị trí (S_{1E})	32,14
Vị trí (S_{2E})	73,13
Vị trí (S_{1F})	9,91
Vị trí (S_{2F})	25,57

4.3.2. Phân tích độ cứng

SR không chỉ dùng để củng cố mobile platform mà tính đàn hồi của SR có thể làm thay đổi phản ứng động học của mobile platform. Các thí nghiệm và mô phỏng đã được tiến hành để nghiên cứu đặc điểm này, so sánh hiệu suất khi có và không có SR trong các điều kiện lực khác nhau. Mẫu được cố định và chuyển vị được đo bằng cảm biến dịch chuyển laze. Thí nghiệm được lặp lại bốn lần.

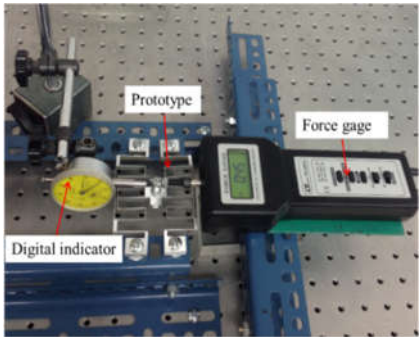
Thí nghiệm được thiết lập như trong Hình 4.25. Bảng 4.5 cho thấy rằng việc kết hợp SR đàn hồi đã tăng độ cứng của cảm chuyển vị từ 0,002 N/ μm lên 0,003 N/ μm , cho thấy tiềm năng cải thiện thiết kế mobile platform vi mô dựa trên độ uốn bằng cách bổ sung thêm SR. Kết quả thí nghiệm và mô phỏng phù hợp. Nhiều thí nghiệm và mô phỏng đã được thực hiện để xác định độ cứng, tập trung vào tải trọng trục x. Các lực 0,25 N, 0,5 N, 0,85 N và 1,3 N được tác dụng và đo chuyển vị (Hình 4.26). Độ cứng tăng từ 0,008 N/ μm lên 0,012 N/ μm với trường hợp có SR (Bảng 4.6), cho thấy độ cứng tổng thể tăng lên.



Hình 4.25: Thực nghiệm đo chuyển vị của cảm biến.

Bảng 4.5: Chuyển vị với lực thay đổi.

Chuyển vị (μm)	Lực (N)			
	0,25	0,5	0,85	1,3
Thực nghiệm: không SR	125	164	288	352
Thực nghiệm: có SR	86	91	153	200
FEA: không SR	128	172	294	356
FEA: có SR	94,0	110	158	210



Hình 4.26: Thực nghiệm đo độ cứng theo phương x của cảm biến.

Bảng 4.6: Chuyển vị dọc theo phương x.

Chuyển vị (μm)	Lực (N)			
	0,25	0,5	0,85	1,3
Thực nghiệm: không SR	30	50	70.0	140
Thực nghiệm: có SR	20	30	40.0	110
FEA: không SR	34	48	64.0	143
FEA: có SR	23	33	45.0	114

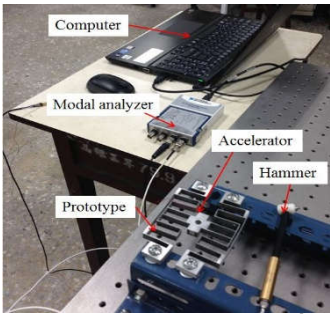
4.3.3. Đáp ứng tần số

Thí nghiệm nhằm kiểm tra các đặc tính động học của mobile platform trong một

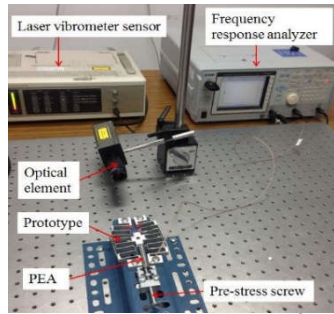
dải tần số nhất định (Hình 4.28 & Hình 4.30). Tần số dao động tự nhiên được đo khi có và không có SR. PEA cũng được thực hiện khi có và không có SR, và kết quả cho thấy độ cứng tăng từ 149 Hz lên 223 Hz. Số liệu được trình bày trong Bảng 4.7.

Table 4.7: Tần số dao động tự nhiên thứ nhất.

Không PEA và không SR (Hz)	Không PEA có SR (Hz)	Có PEA, không SR (Hz)	Có PEA có SR (Hz)
109,8	110,3	149,0	223,0



Hình 4.28: Thực nghiệm đo tần số sử dụng búa.



Hình 4.30: Thực nghiệm đo tần số với PEA.

Việc thêm SR vào các khoan hở đã tăng tần số, cho thấy tác động đáng kể đến độ cứng của mobile platform. Mobile platform dựa trên cơ cấu mềm trở nên cứng hơn sẽ hoạt động hiệu quả hơn ở tần số cao hơn, dẫn đến tốc độ và hiệu suất được cải thiện.

4.4 Thiết kế tối ưu cảm biến chuyển vị

4.4.1. Mô tả vấn đề tối ưu

4.4.1.1. Biến thiết kế

Biến thiết kế được xác định như sau: $\mathbf{X} = [l_A, l_B, t_A, t_B, t_E, t_F]^T$. Giá trị cận trên và dưới của biến thiết kế được xác định là là: $15 \text{ mm} \leq l_A \leq 35 \text{ mm}$; $7 \text{ mm} \leq l_B \leq 17 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_A \leq 1,0 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_B \leq 0,9 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_E \leq 1,2 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_F \leq 1,5 \text{ mm}$.

4.4.1.2. Hàm mục tiêu

Ba hàm mục tiêu chính bao gồm: (i) $\text{Max } f_1(\mathbf{X})$ (chuyển vị của tay gấp), (ii) $\text{Max } f_2(\mathbf{X})$ (tần số tự nhiên của tay gấp), and (iii) $\text{Min } f_3(\mathbf{X})$ (lực gấp).

4.4.1.3. Ràng buộc

Tay gấp chỉ hoạt động hiệu quả trong giới hạn đàn hồi của vật liệu AL-7075. Do đó, điều kiện ràng buộc sẽ là: $g(x) = \sigma \leq (\sigma_y/S)$. Với σ_y là giới hạn đàn hồi của Al-7075 và hệ số an toàn S , S được chọn là 1,5 để đảm bảo độ an toàn.

4.4.1.4. Phương pháp đề xuất cho bài toán tối ưu hóa

Quá trình tối ưu hóa đề xuất bao gồm hai bước. Thứ nhất, phương pháp Taguchi được sử dụng để tổ chức thực nghiệm và đánh giá ảnh hưởng của các tham số thiết kế đến đáp ứng đầu ra. Kỹ thuật này cho phép giới hạn không gian tìm kiếm và xác định giá trị trọng số cho từng mục tiêu thiết kế một cách chính xác. Thứ hai, thuật toán tối ưu hóa TLBO, không gian tìm kiếm và giá trị trọng số ở bước 1 được sử dụng để tối ưu hóa bài toán.

4.4.2. Kết quả và thảo luận

4.4.2.1. Xác định giá trị trọng số

Biến thiết kế được chia là ba mức (lever), thực nghiệm được tổ chức bởi mảng trực giao L_{27} của Taguchi. Lực kẹp, chuyển vị và tần số tự nhiên đầu tiên được phân tích thông qua hệ số S/N . Phân tích ANOVA được sử dụng để xác định ảnh hưởng của các tham số thiết kế đối với phản hồi đầu ra. Do đó, không gian tìm kiếm được giới hạn như sau:

Case 1: Với chuyển vị

$$\begin{cases} 25 \text{ mm} \leq l_A(A) \leq 35 \text{ mm} \\ 12 \text{ mm} \leq l_B(B) \leq 17 \text{ mm} \\ 0,5 \text{ mm} \leq t_A(C) \leq 0,75 \text{ mm} \\ 0,5 \text{ mm} \leq t_B(D) \leq 0,9 \text{ mm} \\ 0,5 \text{ mm} \leq t_E(E) \leq 0,85 \text{ mm} \end{cases}$$

Case 2: với tần số

$$\begin{cases} 15 \text{ mm} \leq l_A(A) \leq 25 \text{ mm} \\ 7 \text{ mm} \leq l_B(B) \leq 12 \text{ mm} \\ 0,75 \text{ mm} \leq t_A(C) \leq 1,0 \text{ mm} \\ 0,5 \text{ mm} \leq t_B(D) \leq 0,7 \text{ mm} \\ 0,85 \text{ mm} \leq t_E(E) \leq 1,2 \text{ mm} \end{cases}$$

Case 3: với lực kẹp

$$\begin{cases} 7 \text{ mm} \leq l_B(B) \leq 12 \text{ mm} \\ 0,5 \text{ mm} \leq t_A(C) \leq 0,75 \text{ mm} \\ 0,7 \text{ mm} \leq t_B(D) \leq 0,9 \text{ mm} \end{cases}$$

Giá trị WF cho mỗi đáp ứng được xác định như sau (Bảng 4.18, 4.19, và 4.20):

Bảng 4.18: WF cho chuyển vị

Mức	Giá trị trung bình của các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa					
	A	B	C	D	E	F
Mức 1	0,2102	0,4645	0,7054	0,5653	0,5668	0,5293
Mức 2	0,5587	0,5440	0,4939	0,4994	0,5113	0,5231
Mức 3	0,7957	0,5560	0,3653	0,4998	0,4864	0,5121
Phạm vi r_{ij}	0,5855	0,0915	0,3401	0,0660	0,0804	0,0172
$w_1 = 0.3083$						

Bảng 4.19: WF cho tần số.

Mức	Giá trị trung bình của các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa					
	A	B	C	D	E	F
Mức 1	0,8700	0,7625	0,3857	0,5797	0,4969	0,5409
Mức 2	0,5480	0,5302	0,6090	0,5509	0,5666	0,5410
Mức 3	0,2350	0,3603	0,6583	0,5224	0,5895	0,5711
Phạm vi r_{ij}	0,6350	0,4022	0,2725	0,0573	0,0926	0,0302
$w_2 = 0.3891$						

Bảng 4.20: WF cho lực kẹp

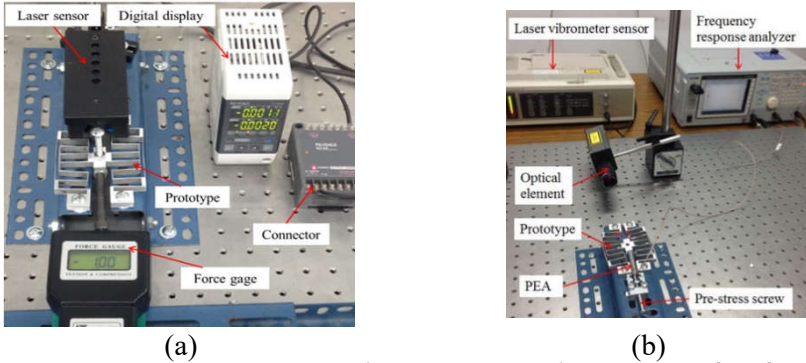
Mức	Giá trị trung bình của các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa					
	A	B	C	D	E	F
Mức 1	0,6766	0,6227	0,4661	0,6982	0,5403	0,6515
Mức 2	0,6137	0,4357	0,6343	0,6326	0,5974	0,5464
Mức 3	0,5007	0,7326	0,6906	0,4602	0,6533	0,5931
Phạm vi r_{ij}	0,1760	0,2968	0,2245	0,2380	0,1130	0,1051
$w_3 = 0.3026$						

4.4.2.2. Kết quả tối ưu

Sau khi WF được xác định, quá trình tối ưu hóa cho 3 trường hợp ((#case 1, #case 2, and #case 3)) được thực hiện. Kết quả cho thấy rằng, hàm f_{val} của #case 3 là tốt nhất (# case 1: $f_{val} = -1,4288$; # case 2: $f_{val} = -1,6129$; # case 3: $f_{val} = -1,6190$). Do đó, case 3 được chọn là thiết kế tối ưu của tay kẹp. Giá trị tham số thiết kế tối ưu của case 3 là $X_{val} = [15; 11,67; 0,62; 0,86; 0,7; 1,25] \sim [l_A, l_B, t_A, t_B, t_E, t_F]^T$. Ngoài ra, kết quả tối ưu thu được từ thuật toán đề xuất còn được so sánh với kết quả thu được từ các phương pháp khác như PSO, AEDE và GA.

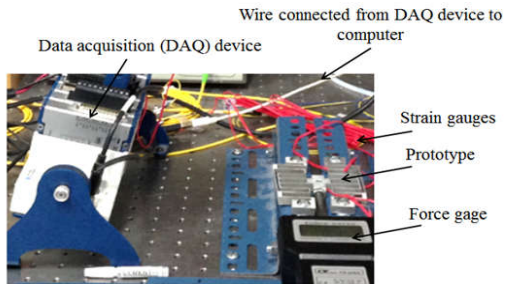
4.4.3. Kiểm chứng

Tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm được thiết kế bằng #case 3 và được thử nghiệm bằng phần mềm ANSYS 16. Một nguyên mẫu đã được gia công và thử nghiệm bằng cách sử dụng máy đo lực và cảm biến dịch chuyển laze. Tần số tự nhiên thứ nhất của tay kẹp cũng được thử nghiệm với PEA, chuyển vị được đo bởi cảm biến chuyển vị lazer có độ phân giải ở kích thước nano (tham khảo Hình 4.36).



Hình 4.36: Thử nghiệm kiểm tra: (a) Chuyển vị và (b) Tần số.

Thí nghiệm kiểm tra biến dạng thể hiện trong Hình 4.37, một lực 5 N được tác dụng từ một máy đo lực (force gauge) và các cảm biến đo được gắn vào các FH để đo biến dạng thực, với các phép đo được thực hiện 5 lần.



Hình 4.37: Thử nghiệm kiểm tra biến dạng.

Bảng 4. 27 cho thấy kết quả thực nghiệm là tiệm cận với kết quả dự đoán.

Bảng 4.27: Kết quả thực nghiệm.

Đáp ứng	HTLBO	Thực nghiệm	FEA	Sai số (%) giữa HTLBO và thực nghiệm	Sai số (%) giữa HTLBO và FEA
Chuyển vị (μm)	1924,15	1831,40	1845,15	4,82	4,10
Tần số (Hz)	170,45	164,63	164,90	3,41	3,25
Ứng suất (MPa)	46,71	44,54	44,06	4,64	5,67

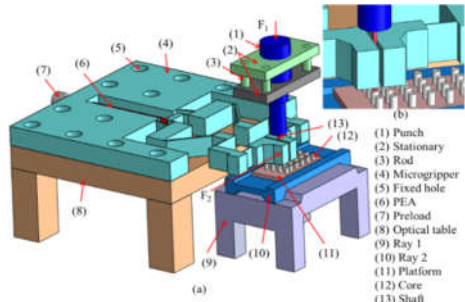
4.5 Kết luận

Trong chương này, kết quả cho thấy (i) CG được phát triển đã đáp ứng giả thuyết ban đầu với độ dịch chuyển 1924,15 μm , tần số 170,45 Hz và ứng suất tối đa 46,71 MPa; (ii) Thuật toán được đề xuất vượt trội so với các trình tối ưu hóa khác; (iii) HTLBO tạo ra các giải pháp tối ưu tốt hơn các thuật toán khác; và (iv) các kết quả dự đoán phù hợp tốt với cả xác thực mô phỏng và thực nghiệm.

Chương 5 MÔ HÌNH TÍNH TOÁN VÀ TỐI ƯU HÓA TAY KẸP DỰA TRÊN CƠ CẤU MỀM CÓ CẤU TRÚC ĐỐI XỨNG SỬ DỤNG CHO GẤP VÀ THẢ CHI TIẾT DẠNG TRỤ TRÒN

5.1 Ứng dụng cơ bản của tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có cấu trúc đối xứng cho các mẫu hình trụ

Một tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có cấu trúc đối xứng (Hình 5.1) đã được phát triển để đáp ứng yêu cầu thực tế cho hệ thống lắp ráp cụm chi tiết trực và lõi của động cơ mô-tơ rung DC (Hình 1.3, Chương 1). Tay kẹp được sử dụng để điều chuyển trực về phía lõi của động cơ rung điện thoại di động. Kích thước trực dao động từ 600-800 μm [40].



Hình 5.1: Hệ thống lắp ráp động cơ rung mini: (a) Hệ thống lắp ráp, (b) Chi tiết trực và lõi động cơ.

5.2 Mục tiêu nghiên cứu của tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm có cấu trúc đối xứng

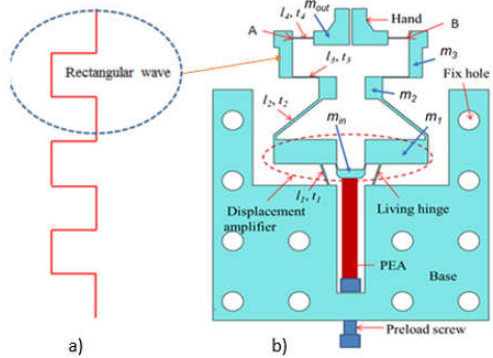
Hai mục tiêu đã được xác định để thiết kế là: (i) phát triển một CG để kẹp và định vị các bộ phận dạng trụ của động cơ rung được sử dụng trong điện thoại di động, với các yêu cầu kỹ thuật được trình bày trong phần 5.3.2; và (ii) tạo ra một CG được tối ưu hóa, tập trung vào tính dễ sử dụng, độ tin cậy và hiệu quả kinh tế.

5.3 Thiết kế cơ khí của tay kẹp

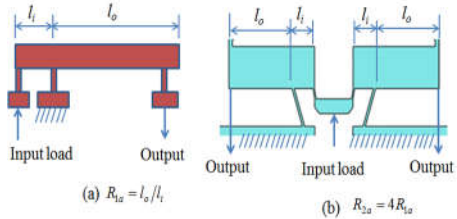
5.3.1. Mô tả thiết kế

Ho và cộng sự. [42] đã phát triển một tay kẹp phù hợp để ứng dụng trong công đoạn lắp ráp động cơ DC rung [20]. Tay kẹp sử dụng loại tín hiệu sóng vuông, cứng, đơn giản với FH đàn hồi để chuyển động (Hình 5.2. (a-b)), cơ chế khuếch đại chuyển vị (Hình 5. 3) và bộ truyền động áp điện để tạo lực.

Mỏ kẹp trái và phải có chuyển động tương tự nhau, với tải trước đảm bảo khả năng can thiệp ban đầu tốt. Tín hiệu sóng sin hoặc cosin sẽ làm tăng độ phức tạp cấu trúc liên kết của kẹp.



Hình 5.2: Mô hình CAD: a) Sóng vuông và b) CG có cấu trúc đối xứng



Hình 5.3: Cơ cấu đòn bẩy: (a) Cơ cấu đòn bẩy, (b) Cơ cấu đòn bẩy kép.

5.3.2. Thông số kỹ thuật của tay kẹp được đề xuất

CG có cấu trúc đối xứng được đề xuất phải đáp ứng các thông số kỹ thuật sau: (ii) Tay kẹp được chế tạo với thiết kế sóng vuông. Mô hình này có thể đảm bảo rằng cả hai hàm di chuyển đối xứng; (ii) Có dải chuyển vị lớn ($>1000 \mu\text{m}$), tần số cao ($>60 \text{ Hz}$); (iii) và ứng suất tương đương của CG phải thấp hơn ứng suất chảy của vật liệu.

5.3.3. Phân tích ứng xử của tay kẹp được đề xuất

Trong phần này, thông qua quan hệ hình học của phần tử và khớp. Các ứng xử của tay kẹp được phân tích. Ngoài ra, quá trình phân tích còn cho phép dự đoán xu hướng chuyển động của tay kẹp. Sau đó, các tham số thiết kế được điều chỉnh để phù hợp với mục tiêu thiết kế.

5.3.3.1. Phân tích động lực học

5.3.3.2. Phân tích độ cứng

5.3.3.3. Phân tích tĩnh học

5.3.3.4. Phân tích động học

5.4 Thiết kế tối ưu tay kẹp dựa trên cơ cấu mềm

5.4.1. Tuyên bố vấn đề tối ưu hóa

Để đáp ứng mục tiêu thiết kế, tay kẹp phải đáp ứng các yêu cầu sau: (i) Có tần số tự nhiên đầu tiên cao để có băng thông hoạt động lớn và ngăn ngừa cộng hưởng với tần số kích thích của cơ cấu chấp hành; (ii) hành trình đóng mở mở kẹp lớn; (iii) Có ứng suất nhỏ để đạt tiêu chí bền.

5.4.1.1. Biến thiết kế

Biến thiết kế được xác định là: $\mathbf{X} = [l_0, l_i, l_1, l_2, l_3, l_4, t_1, t_2, t_3, t_4]^T$. Giá trị cận trên, cận dưới của biến thiết kế được xác định là: $10 \text{ mm} \leq l_1 \leq 14 \text{ mm}$; $20 \text{ mm} \leq l_2 \leq 24 \text{ mm}$; $11 \text{ mm} \leq l_3 \leq 15 \text{ mm}$; $6 \text{ mm} \leq l_4 \leq 10 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_1 \leq 0,7 \text{ mm}$; $0,8 \text{ mm} \leq t_2 \leq 1,2 \text{ mm}$; $0,4 \text{ mm} \leq t_3 \leq 0,8 \text{ mm}$; $0,5 \text{ mm} \leq t_4 \leq 0,9 \text{ mm}$.

5.4.1.2. Hàm mục tiêu

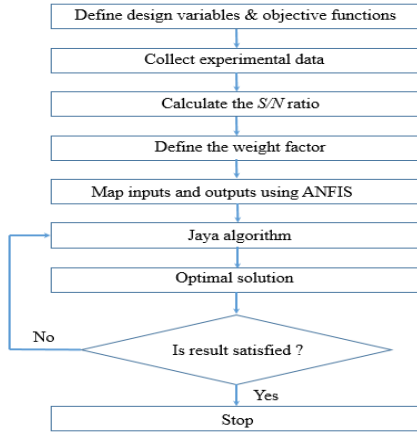
Hai hàm mục tiêu bao gồm: (i) $\text{Max } f_1(\mathbf{X})$ (chuyên vị), (ii) $\text{Max } f_2(\mathbf{X})$ (tần số dao động tự nhiên thứ nhất).

5.4.1.3. Ràng buộc

Tay kẹp chỉ hoạt động hiệu quả trong giới hạn đàn hồi của vật liệu AL-7075. Do đó, điều kiện ràng buộc sẽ là: $g(x) = \sigma \leq (\sigma_y/S)$. Với σ_y là giới hạn đàn hồi của AL-7075 và hệ số an toàn S , S được chọn là 1,5 để đảm bảo độ an toàn.

5.4.2. Phương pháp tối ưu hóa đề xuất

Trong phần này, giải thuật tích hợp giữa ANFIS với Jaya đã được sử dụng để triển khai bài toán tối ưu hóa. Chương trình tối ưu được thực hiện với MATLAB R2015b. Hình 5. 8 minh họa lưu đồ để tối ưu hóa.



Hình 5.8: Lưu đồ tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng ANFIS-Jaya.

5.4.3. Kết quả tối ưu và đánh giá

5.4.3.1. Kết quả tối ưu

Sau khi thí nghiệm được tổ chức bởi mảng trực giao L_{27} của Taguchi. Dữ liệu được thu thập. S/N được tính toán. WF của mỗi đáp ứng được tính toán chính xác (Bảng 5.5 & 5.6).

Bảng 5.5: WF cho chuyển vị

Mức	Giá trị trung bình của các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Mức 1	0,6137	0,3447	0,3257	0,3437	0,4109	0,2978	0,3579	0,3371
Mức 2	0,2426	0,2761	0,2769	0,3009	0,3426	0,4588	0,3163	0,3158
Mức 3	0,1368	0,3723	0,3905	0,3485	0,2396	0,2365	0,3189	0,3762
Phạm vi r_{ij}	0,4769	0,0963	0,1136	0,0476	0,1713	0,2223	0,0417	0,0604

$$w_l = 0,5202$$

Bảng 5.6: WF cho tần số

Mức	Giá trị trung bình của các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Mức 1	0,6490	0,7846	0,7246	0,6515	0,5899	0,6865	0,5884	0,6539
Mức 2	0,7230	0,7265	0,6563	0,7557	0,7588	0,6394	0,6504	0,7716
Mức 3	0,7168	0,5777	0,7080	0,6816	0,7402	0,7630	0,8500	0,6447
Phạm vi r_{ij}	0,0739	0,2069	0,0683	0,1041	0,1689	0,1236	0,2616	0,1270

$$w_2 = 0,4798$$

ANFIS được sử dụng để xây dựng mối quan hệ giữa các biến thiết kế và phản

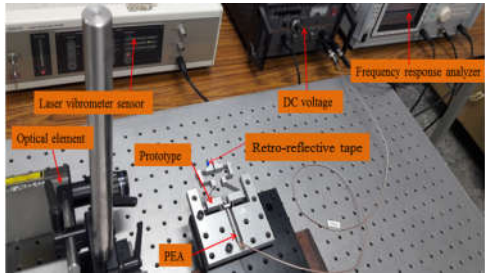
hồi đầu ra thông qua hộp đen (black box). Jaya được áp dụng để thực hiện quá trình tối ưu hóa. Kết quả tối ưu được xác định là $l_1= 10,0$ mm, $l_2= 20,6$ mm, $l_3= 11,2$ mm, $l_4= 6.0$ mm, $t_1= 0,5$ mm, $t_2= 0,8$ mm, $t_3= 0,4$ mm, $t_4= 0,9$ mm. Chuyển vị và tần số lý tưởng được tìm thấy lần lượt là khoảng 3260 μm và 61,9 Hz. Hiệu suất của thuật toán tối ưu hóa Jaya-ANFIS được so sánh với các phương pháp khác. Mặc dù các giải pháp tối ưu là tương tự nhau, nhưng thuật toán Jaya-ANFIS đã thể hiện tốc độ hội tụ nhanh hơn và tiêu tốn ít thời gian hơn đáng kể (Bảng 5.8).

Bảng 5.8: So sánh một số kỹ thuật tối ưu hóa.

Phương pháp	Thời gian (giây)	Số lần lập	Chuyển vị (μm)	Tần số (Hz)
NGSA-II ANFIS	787,3	1000	3260	61,9
TLBO-ANFIS	660	500	3260	61,9
Jaya-ANFIS	30	44	3260	61,9

5.4.3.2. Đánh giá

Sau khi tối ưu, mẫu thử với thông số thiết kế là giá trị tối ưu và độ dày 10 mm được chế tạo để kiểm chứng bằng thực nghiệm. Thí nghiệm được bố trí như Hình 5.10.



Hình 5.10: Thiết lập thí nghiệm.

Thí nghiệm được thực hiện 5 lần, giá trị trung bình được ghi lại trong Bảng 5. 9. Ngoài ra, FEA cũng được thực hiện và so sánh kết quả.

Bảng 5.9: Các kết quả tối ưu, FEA và thử nghiệm được so sánh.

Đáp ứng	Kết quả tối ưu	FEA	Thực nghiệm	Sai số giữa kết quả tối ưu và FEA (%)	Sai số giữa kết quả tối ưu và thực nghiệm (%)
Chuyển vị(μm)	3260	3097	3064	5,26	6,39
Tần số (Hz)	61,9	59,42	58,18	4,16	6,38

Phần này phác thảo thiết kế tốt nhất của CG để ứng dụng trong công đoạn lắp ráp động cơ rung điện thoại di động. Tối ưu hóa đa mục tiêu đã được sử dụng để thiết kế CG, với độ chuyển vị và tần số dao động được chọn làm hàm mục tiêu. Phân tích tối ưu được thực hiện bằng phương pháp Taguchi, hệ số S/N , ANFIS và thuật toán Jaya. Các giá trị tham số tốt nhất và chuyển vị tối ưu và tần số đã được xác định. Thuật toán tối ưu hóa kết hợp được đề xuất là hiệu quả và mạnh mẽ, với các lỗi quan sát được nằm trong khoảng từ 4,16% đến 6,39%.

5.5 Kết luận

Trong chương này, một CG có cấu trúc đối xứng mới được phát triển để sử dụng trong hệ thống lắp ráp lắp ráp động cơ rung DC. Một phương pháp tiếp cận dựa trên điện toán mềm đã được sử dụng để lập mô hình và tối ưu hóa tay kẹp được đề xuất, bao gồm việc tạo ra cơ chế mở rộng hành trình kiểu chữ L cho hành trình làm việc lớn. Hình dạng của tay kẹp được mô hình hóa bằng cách sử dụng sóng vuông để mang lại cấu trúc đơn giản và độ cứng cao. Các kết quả phân tích đã được xác nhận thông qua các mô phỏng và thử nghiệm. Một kỹ thuật tính toán thông minh đã được đề xuất để cải thiện chiến lược tối ưu hóa, đó là sự kết hợp giữa ANFIS với Jaya. Kết quả cho thấy CG được phát triển có chuyển vị khoảng 3260 μm và tần số 61,9 Hz. Thuật toán tối ưu hóa lai được đề xuất cũng được cho là mạnh mẽ và hiệu quả so với các phương pháp khác. Sai số giữa phương pháp tối ưu hóa được đề xuất và kết quả phân tích thử nghiệm/FEA lần lượt là dưới 7% đối với tần số và chuyển vị.

Chương 6 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

6.1 Kết luận

Luận án này đã phát triển của hai loại bộ kẹp dựa trên cơ cấu mềm để kẹp các chi tiết dạng trục nhỏ được sử dụng trong động cơ rung của điện thoại di động. Tay kẹp đầu tiên có cấu trúc không đối xứng và tích hợp các cảm biến chuyển vị, trong khi bộ kẹp thứ hai có cấu trúc đối xứng và được thiết kế cho một hệ thống lắp ráp. Phần đầu tiên của nghiên cứu sẽ phân tích và tối ưu hóa một CG có cấu trúc đối xứng bằng cách sử dụng strain gauges, SR và HTLBO. Kết quả

thu được đối với chuyển vị là 1924,15 μm và tần số 170,45 Hz. Trong phần thứ hai của nghiên cứu, một CG có hai hàm đối xứng cho ngành lắp ráp được thiết kế bằng mô hình vật thể giả cứng, phương pháp Lagrange và ANFIS kết hợp với thuật toán Jaya, cho kết quả chuyển vị tối ưu khoảng 3260 μm và tần số 61,9 Hz. Cuối cùng, các thí nghiệm được tiến hành và kết quả cho thấy cả hai tay kẹp đều hoạt động hiệu quả, phù hợp với kết quả lý thuyết.

6.2 Hướng phát triển

Trong tương lai, một số bước sẽ được thực hiện liên quan đến việc phát triển cảm biến chuyển vị và tay kẹp được đề xuất. Đầu tiên, một nguyên mẫu của cảm biến chuyển vị sẽ được sản xuất và thử nghiệm về độ nhạy và độ phân giải. Sau đó, cảm biến sẽ được tích hợp vào tay kẹp không đối xứng để kiểm tra hành trình tự đo của nó. Tiếp theo, cả tay kẹp đối xứng và không đối xứng sẽ được sản xuất và thử nghiệm trên cánh tay rô-bốt dùng để lắp ráp động cơ DC trong điện thoại di động để xác minh hiệu quả của chúng. Cuối cùng, một bộ điều khiển bổ sung sẽ được triển khai để kiểm tra vị trí chính xác và độ bám của các hàm kẹp.

References

- [1] F. Chen, K. Sekiyama, P. Di, J. Huang, and T. Fukuda, “i-Hand: An Intelligent Robotic Hand for Fast and Accurate Assembly in Electronic Manufacturing,” *2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1976–1981, 2012.
- [2] “<https://www.precisionmicrodrives.com/eccentric-rotating-mass-vibration-motors-erms>,” 2022.
- [3] N. Le Chau, N. L. Ho, N. T. Tran, and T. P. Dao, “Analytical model and computing optimization of a compliant gripper for the assembly system of mini direct-current motor,” *Int. J. Ambient Comput. Intell.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–28, 2021, doi: 10.4018/IJACI.2021010101.
- [4] R. H. Burns, “The Kinetostatic Synthesis of Flexible Link Mechanisms,” Yale University, 1964.
- [5] L. Zentner and V. Böhm, “On the classification of compliant mechanisms,” *Proceedings of EUCOMES 2008 - The 2nd European Conference on Mechanism Science*. pp. 431–438, 2009. doi: 10.1007/978-1-4020-8915-2_52.

- [6] S. G. B. Pratheek Bagivalu Prasanna, Ashok Midha, “Classification of Compliant Mechanisms and Determination of the Degrees of Freedom Using the Concepts of Compliance Number and Pseudo-Rigid-Body Model,” 2019.
- [7] and Z. H. Heng Wu, Xianmin Zhang, Jinqiang Gan, Hai Li, “High-precision displacement measurement method for three degrees of freedom-compliant mechanisms based on computer micro-vision,” *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 10, pp. 2594–2600, 2016.
- [8] S. Linß, S. Henning, and L. Zentner, “Modeling and Design of Flexure Hinge-Based Compliant Mechanisms,” *Kinemat. - Anal. Appl.*, 2019, doi: 10.5772/intechopen.85224.
- [9] T.-P. Dao and S.-C. Huang, “Design and analysis of a compliant micro-positioning platform with embedded strain gauges and viscoelastic damper,” *Microsyst. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 441–456, 2016, doi: 10.1007/s00542-016-3048-3.
- [10] Z. Chen, Z. Li, X. Jiang, and X. Zhang, “Strain-based multimode integrating sensing for a bridge-type compliant amplifier,” *Measurement Science and Technology*, vol. 30, no. 10. 2019. doi: 10.1088/1361-6501/ab1984.
- [11] A. N. Reddy, N. Maheshwari, D. K. Sahu, and G. K. Ananthasuresh, “Miniature compliant grippers with vision-based force sensing,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, no. 5, pp. 867–877, 2010, doi: 10.1109/TRO.2010.2056210.
- [12] A. M. L. L. Howell, “A Method for the Design of Compliant Mechanisms With Small-Length Flexural Pivots,” *J. Mech. Des.*, vol. 116, no. 1, pp. 280–290, 1994.
- [13] J. Chen, R., Wang, W., Wu, K., Zheng, G., Xu, X., Wang, H., & Luo, “Design and optimization of a novel compliant planar parallelogram mechanism utilizing initially curved beams,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 179, 2023.
- [14] B. Zhu *et al.*, “Design of compliant mechanisms using continuum topology optimization: A review,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 143, p. 103622, 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2019.103622.
- [15] R. Molfino, R. P. Razzoli, and M. Zoppi, *A low-cost reconfigurable gripper for assembly and disassembly tasks in white industry*, vol. 8, no. PART 1. IFAC, 2006. doi: 10.3182/20060906-3-it-2910.00084.

- [16] F. Chen, K. Sekiyama, P. Di, J. Huang, and T. Fukuda, “i-Hand: An intelligent robotic hand for fast and accurate assembly in electronic manufacturing,” *2012 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1976–1981, 2012.
- [17] K. Lu, J. Zhang, W. Chen, J. Jiang, and W. Chen, “A monolithic microgripper with high efficiency and high accuracy for optical fiber assembly,” *Proc. 2014 9th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2014*, pp. 1942–1947, 2014, doi: 10.1109/ICIEA.2014.6931486.
- [18] K. Nie, W. Wan, and K. Harada, “A Hand Combining Two Simple Grippers to Pick Up and Arrange Objects for Assembly,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 958–965, 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2893153.
- [19] Z. Lyu and Q. Xu, “Recent design and development of piezoelectric-actuated compliant microgrippers: A review,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 331, p. 113002, 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.113002.
- [20] D. Wang, J.-H. Chen, and H.-T. Pham, “A constant-force bistable micromechanism,” *Sensors Actuators A Phys.*, pp. 481–487, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.042>.
- [21] D. Thanh-phong and S. Huang, “Multi-objective Optimal Design of a 2-DOF Flexure-Based Mechanism Using Hybrid Approach of Grey-Taguchi Coupled Response Surface Methodology and Entropy Measurement,” 2016, doi: 10.1007/s13369-016-2242-z.
- [22] H. Van Tran, T. H. Ngo, N. D. K. Tran, T. N. Dang, T.-P. Dao, and D.-A. Wang, “A threshold accelerometer based on a tristable mechanism,” *Mechatronics*, vol. 53, pp. 39–55, 2018.
- [23] N. VL, N. VK, and P. HH, “Dynamics Study of Compliant Mechanism with Damping,” *J. Appl. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 4, 2020.
- [24] N. Le Chau, N. T. Tran, and T.-P. Dao, “A hybrid computational method for optimization design of bistable compliant mechanism,” *Eng. Comput.*, vol. 38, no. 4, 2020.
- [25] N. D. Anh, L. T. Nhat, and T. V. P. Nhan, “Design and Control Automatic Chess-Playing Robot Arm,” *Recent Adv. Electr. Eng. Relat. Sci. Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 371, 2016, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-27247-4_41.
- [26] Pho Van NGUYEN, P. N. NGUYEN, T. NGUYEN, and T. L. LE, “Hybrid robot hand for stably manipulating one group objects,” *Arch.*

Mech. Eng., vol. 6, no. 3, pp. 375–391, 2022.

- [27] D. B. Lam, N. T. Khoa, N. D. Thuan, and P. H. Phuc, “Modeling and force analysis of an electrothermal micro gripper with amplification compliant mechanism,” *J. Sci. Technol.*, vol. 119, pp. 22–27, 2017, [Online]. Available: <https://jst.hust.edu.vn/journals/jst.119.khcn.2017.27.4.5>
- [28] T. T. N. & T.-P. D. Duc Nam Nguyen, Minh Phung Dang, “Intelligent computation modeling and analysis of a gripper for advanced manufacturing application,” *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00885-2>.
- [29] R. K. Roy, “Design of experiments using the Taguchi approach : 16 steps to product and process improvement.” p. 538, 2001. doi: DOI: 10.1520/JTE12406J.
- [30] M.-G. H. Yue-Qing Yu, Larry L. Howell, Craig Lusk, Ying Yue, “Dynamic Modeling of Compliant Mechanisms Based on the Pseudo-Rigid-Body Model,” *J. Mech. Des.*, vol. 127, no. 4, pp. 760–765, 2005.
- [31] O. S. Martin Philip Bendsoe, *Topology Optimization: Theory, Methods And Applic.* Springer; 2nd edition (October 4, 2013), 2003.
- [32] O. Kessler, “INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD,” *Rev. Int. Stud.*, vol. 38, no. 1, pp. 187–189, 2012, doi: 10.1017/S0260210511000623.
- [33] J. J. Dicker, G. R. Pennock, and J. E. Shigley, *THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS*, Third. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2003.
- [34] T. V. T. Nguyen, N. T. Huynh, N. C. Vu, V. N. D. Kieu, and S. C. Huang, “Optimizing compliant gripper mechanism design by employing an effective bi-algorithm: fuzzy logic and ANFIS,” *Microsyst. Technol.*, vol. 27, no. 9, pp. 3389–3412, 2021, doi: 10.1007/s00542-020-05132-w.
- [35] R. W. Emerson, “ANOVA and t-tests,” *J. Vis. Impair. Blind.*, vol. 111, no. 2, pp. 193–196, 2017, doi: 10.1177/0145482x1711100214.
- [36] H. An, S. Chen, and H. Huang, “Multi-objective optimization of a composite stiffened panel for hybrid design of stiffener layout and laminate stacking sequence,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 57, no. 4, pp. 1411–1426, 2018, doi: 10.1007/s00158-018-1918-2.
- [37] Z. Li and X. Zhang, “Multiobjective topology optimization of compliant microgripper with geometrically nonlinearity,” *Proc. Int. Conf. Integr.*

Commer. Micro Nanosyst. 2007, vol. A, pp. 1–7, 2007, doi: 10.1115/MNC2007-21294.

- [38] Q. Lu, Z. Cui, and X. Chen, “Fuzzy multi-objective optimization for movement performance of deep-notch elliptical flexure hinges,” vol. 065005, pp. 1–9, 2015.
- [39] M. Meinhardt, M. Fink, and H. Tünschel, “Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics,” *Geomorphology*, vol. 234, no. 2015, pp. 80–97, 2015, doi: 10.1016/j.geomorph.2014.12.042.
- [40] N. Le Chau, N. L. Ho, T. T. Vinh Chung, S. C. Huang, and T. P. Dao, “Computing optimization of a parallel structure-based monolithic gripper for manipulation using weight method-based grey relational analysis,” *Int. J. Ambient Comput. Intell.*, vol. 12, no. 3, pp. 39–74, 2021, doi: 10.4018/IJACI.2021070103.
- [41] N. L. Ho, M. P. Dang, and T.-P. Dao, “Design and analysis of a displacement sensor-integrated compliant microgripper based on parallel structure,” *Vietnam J. Mech. Vietnam Acad. Sci. Technol.*, pp. 1–12, 2020, <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.03.019>
- [42] N. L. Ho, T. Dao, H. G. Le, and N. Le Chau, “Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 2, pp. 1205–1220, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3445-2>.