

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**



CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU KHOA HỌC CẤP TRƯỜNG

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ TỐI ƯU BỘ ĐỊNH VỊ
TÍNH TIẾN SANG XOAY SỬ DỤNG CƠ CẤU
MỀM ỨNG DỤNG CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ
KIỂM TRA ĐỘ CỨNG VẬT LIỆU**

MÃ SỐ: T2019 – 06TĐ



Tp. Hồ Chí Minh, tháng 04/2020

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM 2019**

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ TỐI ƯU BỘ ĐỊNH VỊ TỊNH
TIẾN SANG XOAY SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM ỨNG
DỤNG CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ KIỂM TRA
ĐỘ CỨNG VẬT LIỆU
Mã số: T2019 – 06TD**

Chủ nhiệm đề tài: ThS. ĐẶNG MINH PHỤNG

TP. HCM, Tháng 04/Năm 2020

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
KHOA CƠ KHÍ MÁY**

**BÁO CÁO TỔNG KẾT
ĐỀ TÀI KH&CN CẤP TRƯỜNG TRỌNG ĐIỂM 2019**

**NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ TỐI ƯU BỘ ĐỊNH VỊ TỊNH
TIẾN SANG XOAY SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM ỨNG
DỤNG CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ KIỂM TRA
ĐỘ CỨNG VẬT LIỆU**

Mã số: T2019 – 06TĐ

**Chủ nhiệm đề tài: ThS. ĐẶNG MINH PHỤNG
Thành viên đề tài:**

**PGS.TS. LÊ HIẾU GIANG
TS. ĐÀO THANH PHONG**

TP. HCM, Tháng 04/Năm 2020

Tp. HCM, Ngày 10 tháng 04 năm 2020

THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: Nghiên cứu thiết kế tối ưu bộ định vị tịnh tiến sang xoay sử dụng cơ cấu mềm ứng dụng cho hệ thống định vị kiểm tra độ cứng vật liệu

- Mã số: **T2019 – 06TD**

- Chủ nhiệm: ThS. Đặng Minh Phụng

- Cơ quan chủ trì: Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

- Thời gian thực hiện: **1/2019-12/2019**

2. Mục tiêu:

Thiết kế bộ định vị mềm tịnh tiến sang xoay. Tiếp theo, tác giả phân tích ảnh hưởng của thông số hình đến đặc tính chất lượng của bộ định vị xoay. Phát triển thuật toán tối ưu kết hợp để tối ưu hóa đa mục tiêu. Cuối cùng, tác giả đánh giá kiểm chứng các kết quả tối ưu.

3. Tính mới và sáng tạo:

- (i) Thiết kế mới kết cấu bộ định vị mềm tịnh tiến sang xoay
- (ii) Một giải thuật kết hợp mới được đề xuất sử dụng trong tối ưu hóa đa mục tiêu cho các đặc tính chất lượng của bộ định vị
- (iii) Tích hợp phương pháp tính trọng số dựa trên độ nhạy của các đáp ứng kết hợp với thống kê.

4. Kết quả nghiên cứu:

STT	Nội dung nghiên cứu theo Thuyết minh đề tài	Nội dung nghiên cứu đã thực hiện	Tự đánh giá
1	Tổng quan	Tổng quan về bộ định vị mềm và các phương pháp tối ưu	Đạt yêu cầu
2	Phát triển bộ định vị xoay mềm	<ul style="list-style-type: none">- Đề xuất thiết kế mới dựa trên biên dạng chân con bọ- Đề xuất bài toán tối ưu- Đề xuất giải thuật tối ưu hóa đa mục tiêu kết hợp- Đánh giá độ nhạy của biến thiết kế.- Kết quả tối ưu và phân tích thống kê.- Xác nhận kết quả tối ưu	Đạt yêu cầu
3	Kết luận, kiến nghị	<ul style="list-style-type: none">- Kết luận những kết quả nghiên cứu.	Đạt yêu cầu

5. Sản phẩm: Một bài báo SCIE

6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:

Nghiên cứu đề xuất thiết kế mới và tối ưu hóa bộ định vị xoay mềm. Phương pháp đề xuất giúp giảm thời gian thiết kế, đảm bảo độ tin cậy. Ngoài ra, phương pháp đề xuất trong nghiên cứu này cũng có giá trị về mặt học thuật. Có thể được ứng dụng trong đào tạo và nghiên cứu.

Trưởng Đơn vị
(ký, họ và tên)

Chủ nhiệm đề tài
(ký, họ và tên)

ThS. Đặng Minh Phụng

INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

1. General information:

Project title: Design optimization the of the new compliant rotary positioning stage intended to apply for checking the material hardness testing positioning system

Code number: **T2019 – 06TD**

Coordinator: ME. **Dang Minh Phung**

Implementing institution: HCMC University of Technology and Education

Duration: from 1/2019 to 12/2019

2. Objective(s):

A new compliant rotary positioning stage is designed and analyzed. Next, authors analyze the effect of the main parameters on the quality characteristics of the rotary stage. In addition, a new hybrid optimization algorithm is developed to optimize multiple goals. Finally, the optimal results are validated by FEA.

3. Creativeness and innovativeness:

- (i) New design for a compliant rotary positioning stage
- (ii) A new combined algorithm is proposed for using multi-objective optimization for the quality characteristics of the stage
- (iii) Integrating a weight factor calculating method based on the sensitivity of the responses combined with statistics.

4. Research results:

No.	Content	The research content has been done	Self assessment
1	Overview	Overview of the compliant positioning stage	Qualified
2	- Develop a new compliant rotary stage - Propose hybrid optimal algorithm	- Design for a new compliant rotary stage - Statement of optimization problem - Proposed hybrid optimal algorithm - Analyse the sensitivity of design variables on the quality responses - Optimal results and statistical analysis. - Validation of optimal results by FEA	Qualified
3	Conclusions	- Conclusions	Qualified

5. Products: A SCIE paper

6. Effects, transfer alternatives of reserach results and applicability:

This study proposed a new hybrid method in order to design and optimize a compliant rotary stage. The proposed method reduces design time and ensures reliability. In addition, the method proposed in this study also has a good academic value. It can be applied for training and researching.

**DANH SÁCH NHỮNG THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU ĐỀ TÀI
VÀ ĐƠN VỊ PHỐI HỢP CHÍNH**

STT	Họ và tên	Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn	Nội dung nghiên cứu cụ thể được giao	Chữ ký
1	ThS. Đặng Minh Phụng	Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh	Chủ nhiệm đề tài	
2	PGS.TS Lê Hiếu Giang	NCS, Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh	Thành viên	
3	TS. Đào Thanh Phong	Viện Khoa Học Tính Toán, Trường Đại Học Tôn Đức Thắng	Thành viên	

TÓM TẮT

Bài viết này đề xuất một thuật toán tối ưu hóa lai hiệu quả cho thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu của bộ định vị quay sử dụng cơ cấu mềm định hướng ứng dụng cho hệ thống kiểm tra độ cứng vật liệu. Bộ định vị được tạo ra dựa trên cảm hứng từ sự linh hoạt của biên dạng chân con bọ. Để đáp ứng nhu cầu thực tế của bộ định vị, các thông số hình học được tối ưu hóa để cải thiện các đặc tính chất lượng. Trong công việc hiện tại, phương pháp Taguchi được sử dụng để bố xây dựng số lượng thí nghiệm số. Sau đó, phương pháp phân tử hữu hạn được xây dựng để lấy dữ liệu số. Các mô hình toán học sau đó được thiết lập dựa trên phương pháp đáp ứng bề mặt. Trước khi tiến hành thực hiện tối ưu hóa, trọng số của từng đáp ứng được tính toán chính xác. Dựa trên các mô hình toán đã được thiết lập, các đáp ứng được tối ưu hóa đồng thời sử dụng thuật toán tối ưu dựa trên dạy và học. Các trọng số của hệ số an toàn và chuyển vị lần lượt là 0,5995 (59,95%) và 0,4005 (40,05%). Kết quả cho thấy hệ số an toàn tối ưu là khoảng 1.558 và chuyển vị tối ưu là 2.096 mm. Các xác nhận là một thỏa thuận tốt với kết quả dự đoán. Phân tích độ nhạy được thực hiện để xác định ảnh hưởng của các biến đến các đáp ứng. Sử dụng kiểm tra thống kê phi thông số Wilcoxon và Friedman, hiệu quả của phương pháp lai được đề xuất là tốt hơn so với thuật toán tiến hóa khác. Nó đảm bảo hiệu quả tốt để giải quyết vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu phức tạp.

MỤC LỤC

TÓM TẮT	i
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN	1
1. Tổng quan tình hình nghiên cứu	1
CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT	4
2.1. Cơ cấu mềm và phạm vi ứng dụng	4
2.2. Khớp mềm.....	6
2.3. Bộ truyền động.....	8
CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ BỘ ĐỊNH VỊ XOAY SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM	9
3.1. Cấu trúc động học	9
3.2. Bộ khuếch đại chuyển vị kết hợp.....	9
3.3. Bộ định vị xoay mềm.....	12
CHƯƠNG 4: PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU	15
4.1. Xây dựng bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu	15
4.2. Phương pháp tối ưu tích hợp.....	16
CHƯƠNG 5: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN.....	22
5.1. Thu thập dữ liệu	22
5.2. Phân tích độ nhạy.....	24
5.3. Kết quả tối ưu và phân tích thống kê.....	28
5.3.1 Kết quả tối ưu.....	28
5.3.2 Phân tích thống kê.....	28
5.4. Xác nhận	30
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	31
TÀI LIỆU THAM KHẢO	32

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1. Tổng quan tình hình nghiên cứu

Thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu được thiết kế để cung cấp tải nhỏ với chiều sâu trong phạm vi tỷ lệ nano chỉ việc kiểm tra độ cứng vật liệu, mô đun đàn hồi và độ dẻo. Hệ thống có thể được sử dụng để kiểm tra đặc tính vật liệu vô cơ, vật liệu hữu cơ, vật liệu mềm và vật liệu cứng. Với kỹ thuật tham chiếu bề mặt trên cùng, thiết bị đo độ cứng có thể được thực hiện trong vòng chưa đầy 3 phút mà không cần chờ ổn định nhiệt. Do đó, quá trình định vị phải có độ chính xác cao. Vật liệu có thể được kiểm tra, bao gồm các loại cứng và mềm từ mô, tế bào sinh học, vật liệu nano, quang học, chất bán dẫn, cơ sinh học, hệ thống vi cơ điện tử và điện tử [1-3]. Trong quá trình kiểm tra độ cứng vật liệu, nhiều kính hiển vi được sử dụng để ghi lại hình ảnh của mẫu vật liệu trước và sau khi thử để kiểm tra đặc tính đường cong dịch chuyển tải trong khi mẫu vật liệu được đưa ra trước kính hiển vi. Để đạt được chất lượng hình ảnh tốt, một bộ định vị chính xác là điều cần thiết. Điều đó có nghĩa là tóm tắt rằng một bộ định vị là một cơ cấu quan trọng cho thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu. Trong thương mại hóa, bộ định vị hiện tại khó có thể cho phép độ chính xác vị trí cao do ảnh hưởng bất lợi của ma sát và mòn tồn tại trong các khớp động học cứng. Để khắc phục nhược điểm của các công nghệ truyền thống, Bộ định vị định vị quay sử dụng cơ cấu mềm được đề xuất để tăng cường độ phân giải vì các ưu điểm cơ bản của chúng như không hao mòn, không ma sát, trọng lượng nhẹ, chi phí thấp, không bôi trơn, cấu trúc nguyên khối, độ chính xác cao và nhỏ gọn cấu trúc [4-8]. Tương tự như các ứng dụng khác nhau, hệ thống định vị cũng cần các hành trình lớn với hệ số an toàn cao để thực hiện các nhiệm vụ định vị. Điều này phụ thuộc lớn vào bộ định vị đề xuất.

Một vài năm gần đây, các nhà nghiên cứu tập trung vào phát triển các bộ định vị với hành trình làm việc lớn [9,10]. Zhu et.al đã thiết kế một bộ khuếch đại kết hợp cơ cấu Scott-Russell và cơ cấu nửa cầu cho bộ định vị nano XY [11]. Kim et al. đã sử dụng cơ cấu khuếch đại kép cho hệ thống định vị 3 bậc cơ cấu mềm [12]. Ngoài ra, bộ định vị xoay với góc xoay lớn đã được đề xuất [13]. Tuy nhiên, một bộ định vị chuyển từ tịnh tiến sang xoay định hướng ứng dụng cho hệ thống kiểm tra vật liệu ít sự quan tâm.

Để đáp ứng các yêu cầu thực tế của khoa học vật liệu tiên tiến, khả năng của một không gian định vị lớn và tuổi thọ dài của bộ định vị đề xuất cần được tăng cường hơn nữa. Nói chung, bộ khuếch đại cần hoặc cầu được sử dụng rộng rãi để cải thiện hành trình làm việc của bộ định vị. Trong nghiên cứu này, để đạt hành trình làm việc tốt, cơ cấu khuếch đại 4 cần nguyên khối được tích hợp trong bộ định vị. Mặc dù bộ khuếch đại có thể cải thiện việc hành trình làm việc nhưng nó vẫn còn hạn chế. Do đó, một thiết

kế tối ưu hóa đa mục tiêu được thực hiện trong nghiên cứu này để tăng cường đồng thời các đặc tính tĩnh của bộ định vị. Để tối ưu hóa cấu trúc, cấu trúc liên kết, kích thước hoặc tối ưu hóa hình dạng được sử dụng. Cấu trúc liên kết cho phép kết nối của miền trong khi tối ưu hóa kích thước biểu thị cho kích thước thiết kế [14-18].

Tối ưu hóa hình dạng cho một cấu hình phù hợp. Trong nghiên cứu này, tối ưu hóa kích thước được chọn trong khi cấu hình hình dạng của bộ định vị đề xuất được thiết kế dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế. Do các mô hình toán học cho bộ định vị tương đối phức tạp, một giải pháp tối ưu có thể không chính xác. Do đó, một thuật toán tối ưu hóa kết hợp được đề xuất trong nghiên cứu này. Nó là sự kết hợp của phương pháp Taguchi (TM), phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) và thuật toán tối ưu hóa dựa trên học tập giảng dạy và học tập (TLBO). Một cách tiếp cận tối ưu hóa dựa trên dữ liệu như vậy có thể hạn chế các lỗi không mong muốn từ các phương pháp phân tích. Cụ thể, FEM đã được sử dụng rộng rãi cho các lĩnh vực kỹ thuật khác nhau [19-21].

Phương pháp Taguchi (TM) là một phương pháp thống kê để tối ưu hóa tham số nhưng nó chỉ tối ưu hóa một mục tiêu duy nhất. Để tối ưu hóa nhiều mục tiêu, TM cần kết hợp với các phương pháp khác [22]. Dao và các cộng sự đã phát triển một thuật toán tìm kiếm kết hợp Taguchi-Cuckoo để tối ưu hóa đồng thời các mục tiêu đồng thời cho một bộ định vị sử dụng cơ cấu mềm [23]. Hơn nữa, RSM [24] có thể thiết lập các mô hình hồi quy trước khi thực hiện một vấn đề tối ưu hóa. Các thuật toán tiến hóa thông thường thường yêu cầu các tham số điều khiển ban đầu trong khi TLBO [25-27] có thể tối ưu hóa nhanh chóng đa mục tiêu chỉ ít tham số hơn. Một sự tích hợp của các thuật toán tối ưu cho bộ định vị tịnh tiến sang xoay ít được quan tâm. Kết quả là, thuật toán lai được đề xuất phát triển để giải quyết vấn đề thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu đồng thời trong nghiên cứu này.

Như đã biết, nhiều mục tiêu thường mâu thuẫn với nhau. Để tìm kiếm sự cân bằng giữa chúng, một yếu tố trọng số (WF) phải được chỉ định cho mỗi đáp ứng. WF gần như được xác định dựa mức độ ưu tiên của các đáp ứng hoặc kinh nghiệm của kỹ sư thiết kế. Không giống như các nghiên cứu trước đây, trước khi tối ưu hóa, các mô hình toán học được xây dựng để xác định chính xác các trọng số cho mỗi đáp ứng.

Mục tiêu chính của bài viết này là phát triển một phương pháp tối ưu hóa kết hợp mới để giải quyết thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu cho bộ định vị nhằm cải thiện các đặc tính tĩnh tốt. Phân tích độ nhạy sau đó được phân tích dựa trên phương pháp thống kê. Dữ liệu được thu thập bằng cách tích hợp TM và FEM. Các phương trình toán được thiết lập bởi RSM. Trọng số cho mỗi mục tiêu được tính toán và các giải pháp tối ưu hóa được tìm kiếm thông qua giải thuật TLBO. Tiếp theo, việc xác minh được tiến hành để

xác định giá trị kết quả dự đoán. Cuối cùng, một vài phân tích thống kê được thực hiện để so sánh phương pháp tối ưu kết hợp với các phương pháp khác.

CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Cơ cấu mềm và phạm vi ứng dụng

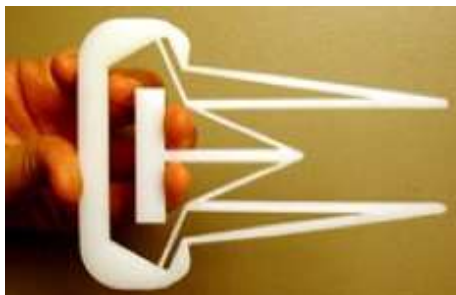
Ngày nay, dựa trên các ưu điểm của các cơ cấu mềm, chúng được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như các thiết bị sử dụng hàng ngày như trong y học, MEMS và robot.

a. Cuộc sống hàng ngày: có một số lượng lớn các thiết bị phổ biến sử dụng cơ cấu mềm vì tính linh hoạt, như được minh họa trong Hình 2.1.



Hình 2.1. Các thiết bị sử dụng cơ cấu mềm phổ biến: kẹp giấy, chốt ba lô, dụng cụ uốn lông mi và kéo cắt móng tay [35]

b. Trong y học: cơ cấu mềm vì cấu trúc nguyên khối, không bị mài mòn, không ma sát và không bôi trơn. Nó phù hợp với môi trường bên trong cơ thể. Do đó, các cơ cấu mềm đã được nghiên cứu để sử dụng trong lĩnh vực y tế, như được mô tả trong Hình 2.2.



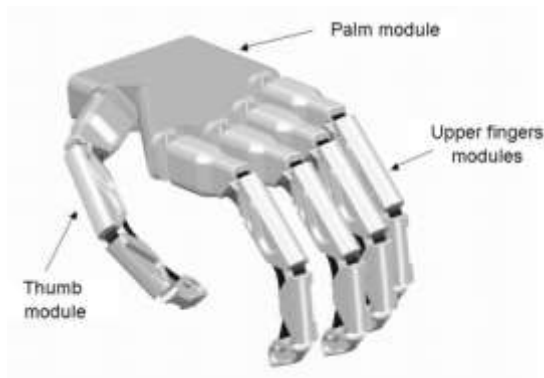
(a)



(b)

Hình 2.2. Các ứng dụng của các cơ cấu mềm trong y học: (a) Nguyên mẫu của dụng cụ kẹp sử dụng cơ cấu mềm [36], (b) Thiết bị phục hồi chức năng mắt cá chân [37]

Ngoài ra, các cơ cấu mềm đã được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp robot sinh học, như trong Hình 2.3, và áp dụng hệ thống mắt cá chân 02 bậc tự do sử dụng cơ cấu mềm được lấy cảm hứng từ ứng xử cơ sinh học cho robot hình người, như được chỉ ra trong Hình 2.4.



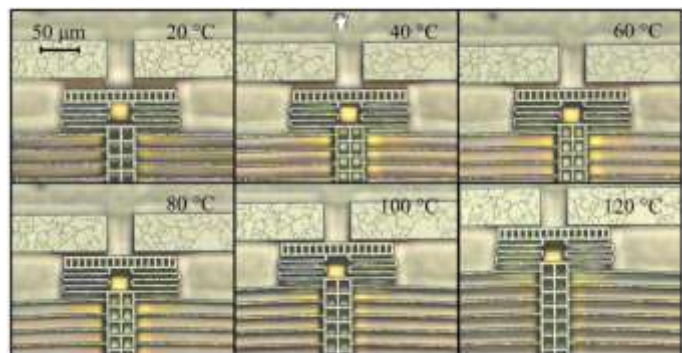
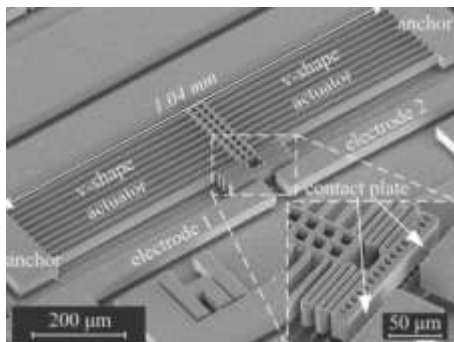
Hình 2.3. Bàn tay robot dựa trên cơ cấu mềm [38]



Hình 2.4. Hệ thống chân-mắt cá chân 2-bậc tự do dựa trên cơ cấu mềm [39]

c. Hệ thống vi cơ điện tử (MEMS):

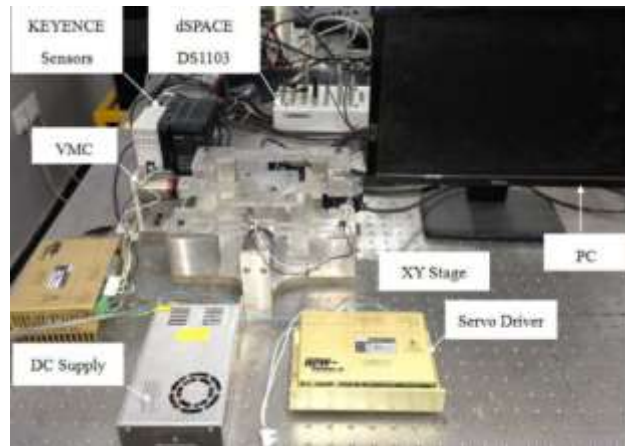
MEMS là một quy trình công nghệ được sử dụng để tạo ra các thiết bị hoặc hệ thống tích hợp các thành phần điện và cơ khí. Các phần tử MEMS có thể được chế tạo bằng cách sử dụng các kỹ thuật xử lý hàng loạt mạch tích hợp (IC) và nó có kích thước từ vài micromet đến milimét. Dựa trên những lợi ích của kích thước nhỏ, cơ cấu mềm là sự lựa chọn phù hợp cho ứng dụng. Hình 2.5 minh họa một thiết bị MEMS dựa trên các cơ cấu mềm.



Hình 2.5. Các ứng dụng của các cơ cấu mềm trong MEMS [40]: Công tắc MEMS kích hoạt bằng nhiệt độ.

d. Các bộ định vị mềm

Hơn nữa, các cơ cấu mềm đã được sử dụng rộng rãi trong các bộ định vị micro-/nano, như được minh họa trong Hình 2.6.



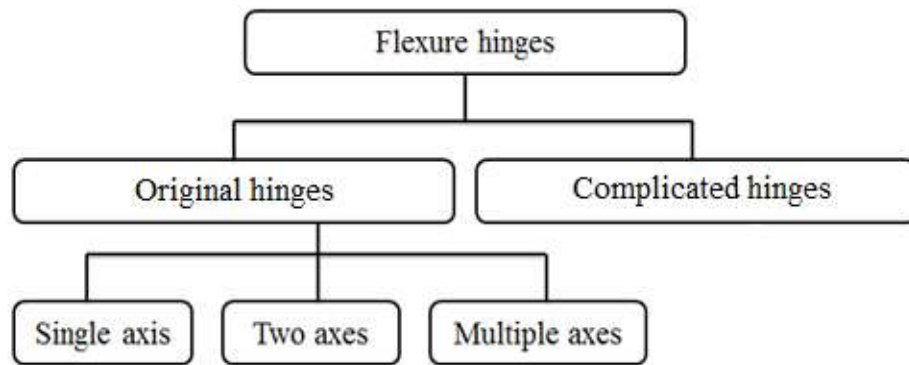
Hình 2.6. Bộ định vị XY sử dụng cơ cấu mềm [41].

2.2. Khớp mềm

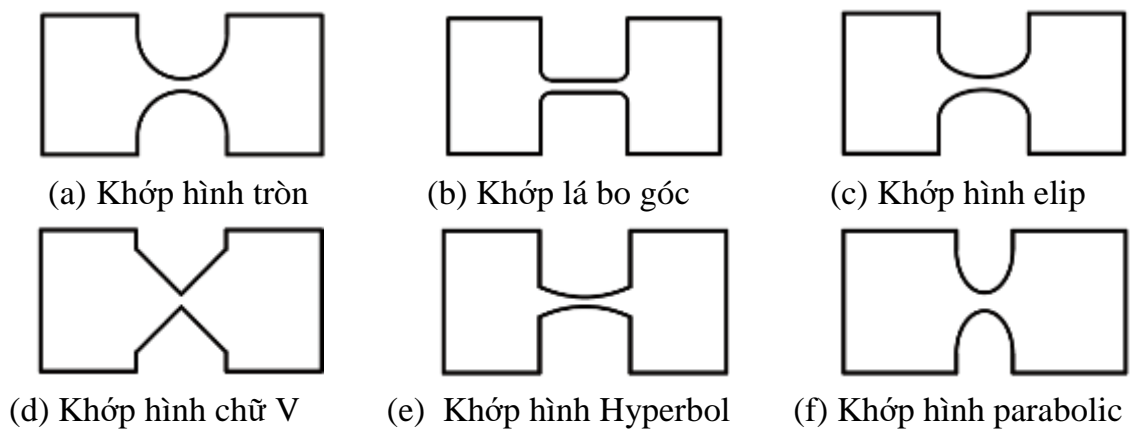
Khớp mềm là chi tiết quan trọng nhất trong lĩnh vực cơ chế tuân mềm. Để biết chi tiết, khớp mềm là một yếu tố cơ khí hỗ trợ xoay tương đối cho các phần tử cứng dựa trên khả năng uốn của nó thay vì sử dụng khớp quay truyền thống [42]. Trong những năm gần đây, nhiều loại khớp mềm linh hoạt đã được nghiên cứu và cải tiến. Paro et al. [43] đề xuất các công thức tính mềm và các phương trình kỹ thuật tính ước lượng cho khớp mềm đối xứng tròn và đối xứng tròn phải vào năm 1965.

Sau đó, dựa trên kết quả nghiên cứu của Paros et al. [44], Smith và cộng sự. [45] đề xuất khớp mềm hình elip và khớp mềm hình tròn dựa trên sự điều chỉnh kết quả ban đầu của Paros và cộng sự, Lobontiu và cộng sự [45-47] đã đề xuất các công thức mềm chính xác để tính toán khớp mềm bo góc đối xứng. Các loại khớp mềm khác nhau đã được nghiên cứu trong những năm gần đây, một giới thiệu ngắn về phân loại khớp mềm được thể hiện dựa trên các nguyên tắc chức năng và cấu hình hình học liên quan. Ngoài ra, Lobontiu et al. [48] đề xuất một cách tiếp cận để tính toán và thiết kế một khớp mềm bằng cách tính toán, xác định góc quay, độ chính xác quay và độ phân tán ứng suất. Nói chung, khớp mềm có thể được chia thành hai lớp: khớp mềm đơn giản cũng như khớp mềm phức tạp [49, 50], như được minh họa trong hình 2.7. Để biết chi tiết, khớp mềm trục đơn có tiết diện hình chữ nhật với chiều rộng hằng số và chiều cao thay đổi.

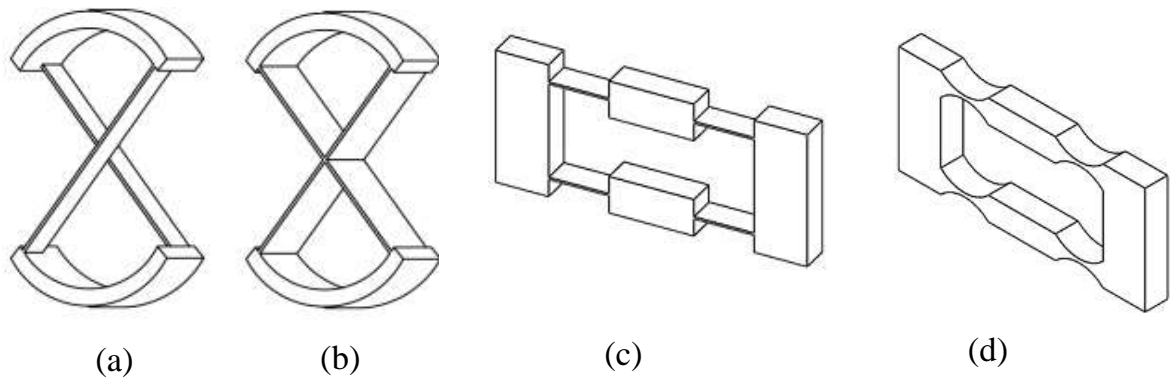
Loại khớp mềm này có thể được phân loại dựa trên các hình dạng của mặt cắt ngang của chúng, chẳng hạn như khớp mềm kiểu notch, như minh họa trong hình 2.8 và khớp mềm phức tạp [51, 52], như trong hình 2.9. Đặc biệt hơn, khớp mềm loại notch đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống chính xác macro/micro/nano. khớp mềm này bao gồm khớp mềm hình tròn [53-55], khớp mềm bo cong góc [56-58], khớp mềm hình chữ V [59, 60], khớp mềm hình elip [61, 62], khớp mềm hình parabolic [63, 64] và khớp mềm hình hyperbol [63].



Hình 2.7. Các loại chính của khớp mềm



Hình 2.8. Khớp mềm kiểu notch



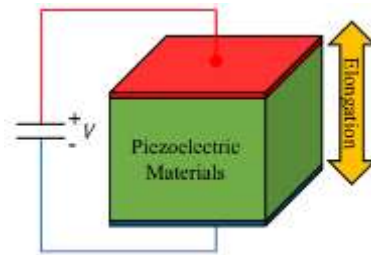
(a) Khớp mềm dải chéo, (b) Khớp mềm kiểu bánh xe,
 (c) Khớp mềm dạng lá, (d) Khớp mềm Hyperbol

Hình 2.9. Khớp mềm phức tạp

Mỗi loại khớp mềm có phạm vi sử dụng riêng, tùy thuộc vào cấu trúc và phạm vi hoạt động của nó. Ngày nay, khớp mềm, đặc biệt là khớp mềm kiểu notch được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, đặc biệt là trong các bộ định vị và hệ thống MEMS.

2.3. Bộ truyền động

Thiết bị truyền động áp điện (PEA) là một loại thiết bị truyền động dựa trên hiệu ứng áp điện ngược của tinh thể ion [63], tức là, bằng cách áp dụng một trường điện bên ngoài, vật liệu áp điện sẽ kéo dài để điều chỉnh điện trường bên trong của nó để chống lại sự thay đổi. Hình 2.9 cho thấy hiệu ứng áp điện ngược của một lớp vật liệu áp điện. Các hình thức của PEA có thể dựa trên ngăn xếp và dựa trên phim. Hiện tại, PEA dựa trên ngăn xếp chủ yếu được sử dụng để truyền động, bởi vì nó được xếp chồng lên nhau bởi nhiều lớp vật liệu áp điện, cung cấp lực đầu ra và hành trình khá lớn. Ngoài ra, tính dễ sử dụng làm cho PEA trở thành thiết bị truyền động được sử dụng rộng rãi nhất trong định vị micro-/nano.

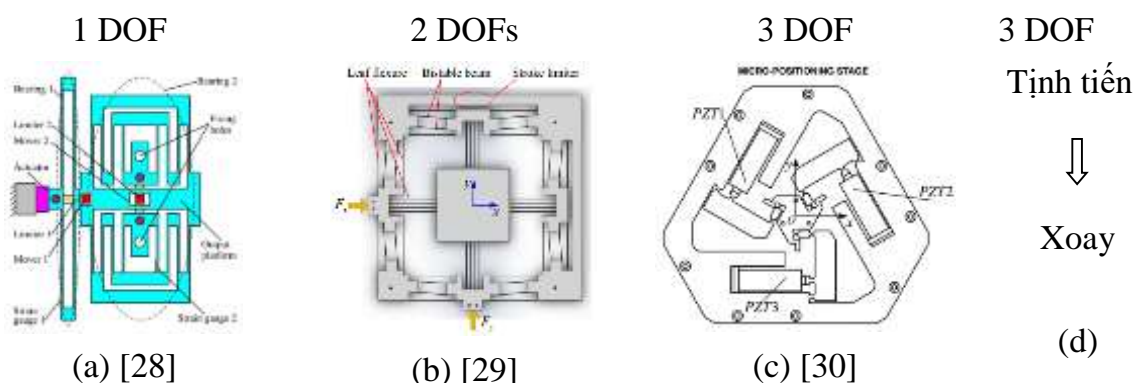


Hình 2.9. Bộ truyền động áp điện (PEA).

CHƯƠNG 3: THIẾT KẾ BỘ ĐỊNH VỊ XOAY SỬ DỤNG CƠ CẤU MỀM

3.1. Cấu trúc động học

Rất nhiều nghiên cứu về bộ định vị micro sử dụng cơ cấu mềm từ một bậc tự do [28], 2 bậc tự do [29] và 3 bậc tự do [30] đã được minh họa tương ứng trong Hình 3. 1a – c. Tuy nhiên, bộ định vị xoay sử dụng cơ cấu mềm (CRPS) định hướng ứng dụng cho hệ thống kiểm tra độ cứng vật liệu ít được nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, một chuyển động tịnh tiến thẳng sang xoay để xác định vị trí mẫu vật liệu cho việc kiểm tra bằng cách sử dụng đầu đâm và theo dõi bằng kính hiển vi trước và sau khi đâm vào mẫu vật liệu. Nếu bộ định vị xoay được thiết kế trực tiếp chỉ bằng cách xoay thuần túy, bộ điều khiển tiếp theo sẽ phức tạp. Trong khi đó, từ tịnh tiến sang xoay, bộ định vị đề xuất có thể được kiểm soát dễ dàng bằng cách giải quyết kết thúc tuyến tính. Cuối cùng, nguyên lý hoạt động của CRPS được đề xuất đã được chuyển từ chuyển động tuyến tính sang chuyển động xoay, như được đưa ra trong Hình 3.1 (d).



Hình 3.1. Các bộ định vị khác nhau: (a) một bộ định vị 1 bậc, (b) bộ định 2 bậc, (c) bộ định vị 3 bậc

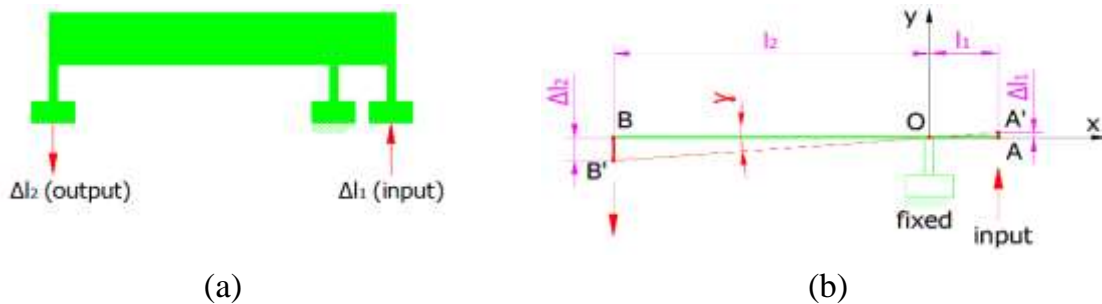
3.2. Bộ khuếch đại chuyển vị kết hợp

Cơ cấu cần vẫn là một cấu trúc hữu ích để khuếch đại tải hoặc chuyển vị. Cấu trúc của cần bao gồm một thanh dầm hoặc thanh cứng đặt trên một bản lề cố định hoặc điểm tựa, như minh họa trong Hình 2. Điểm O được coi là tâm xoay của đòn bẩy, A là đầu vào và B là đầu ra. Nguyên lý hoạt động của cơ cấu cần được mô tả như sau: khi định vị chuyển vị dọc trên điểm đầu vào A, đòn bẩy sẽ xoay một góc γ so với trục z. Kết quả là, điểm B di chuyển đến B', và sự dịch chuyển đầu ra Δl_2 có thể đạt được theo hướng dọc (trục y). Đầu tiên, một cơ cấu cần có thể được sử dụng để khuếch đại dịch chuyển

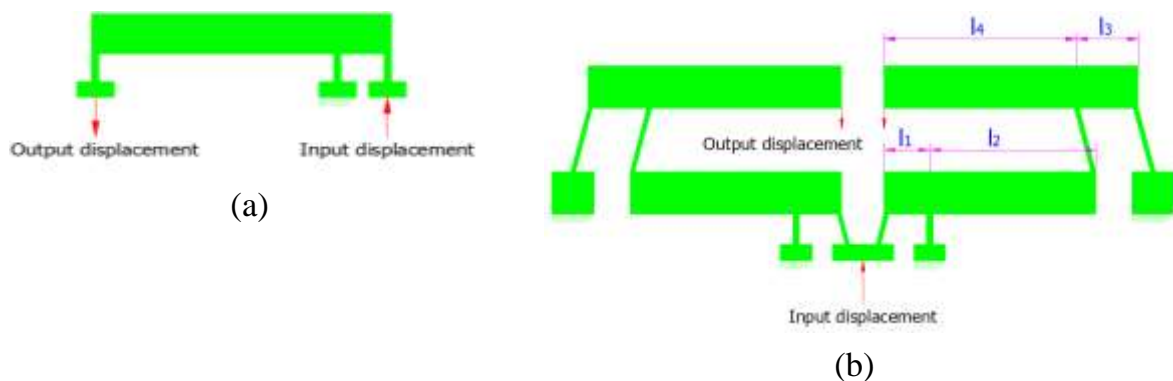
đầu ra, như được mô tả trong hình 3.3a (Trường hợp 1). Tuy nhiên, cơ cấu này dễ dàng tạo ra một chuyển động theo lớn.

Ngoài ra, để khuếch đại dịch chuyển đầu ra lớn hơn cũng như tạo chuyển động tuyến tính dựa trên cấu trúc đối xứng, bộ khuếch đại dịch chuyển bốn cần được đề xuất để đạt được dịch chuyển lớn hơn và dịch chuyển tuyến tính, như được mô tả trong hình 3b (Trường hợp 2). Nhờ các đặc điểm cấu trúc của bộ khuếch đại, tỷ lệ khuếch đại có thể đạt được xấp xỉ như phương trình sau:

$$r_{lever} = \Delta l_2 / \Delta l_1 = l_2 / l_1. \quad (1)$$



Hình 3.2. Sơ đồ: (a) Nguyên lý hoạt động của cơ cấu cần, (b) Phân tích tỷ lệ khuếch đại



Hình 3.3. Mô hình bộ khuếch đại cần: (a) trường hợp 1: cơ cấu một cần, (b) trường hợp 2: cơ cấu bốn cần

Phương trình của bộ khuếch đại dịch chuyển đa cần được giả định như sau:

$$r_T = l_2 / l_1 \times l_4 / l_3 \quad (2)$$

trong đó r_T là tỷ lệ khuếch đại của bộ khuếch đại chuyển vị của bốn cần.

Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) trong phần mềm ANSYS đã được sử dụng để mô hình hóa và so sánh tỷ lệ khuếch đại giữa trường hợp 1 và trường hợp 2. Điều kiện biên cho cả hai trường hợp được đưa ra trong Hình. 3a và b. Giá trị của dịch chuyển đầu vào được chỉ định trong phạm vi từ 0.1 mm đến 0,24 mm. Y_{old} và Y_{new} đại diện cho sự dịch chuyển

đầu ra của trường hợp 1 và trường hợp 2 dọc theo trục Y, tương ứng đã được lấy ra. Các tỷ lệ khuếch đại cho trường hợp 1 và trường hợp 2 được tính là R_{old} và R_{new} , tương ứng trong Bảng 1 và 2. Sự cải thiện tỷ lệ khuếch đại là khoảng 221,6%, như được đưa ra trong Bảng 3 và Hình 3.4.

Bảng 1. Tỷ lệ khuếch đại cho trường hợp 1

Input (mm)	Y_{old} (mm)	R_{old}
0.1	0.443	4.43
0.12	0.532	4.43
0.14	0.620	4.43
0.16	0.709	4.43
0.18	0.797	4.43
0.2	0.886	4.43
0.22	0.975	4.43
0.24	1.063	4.43

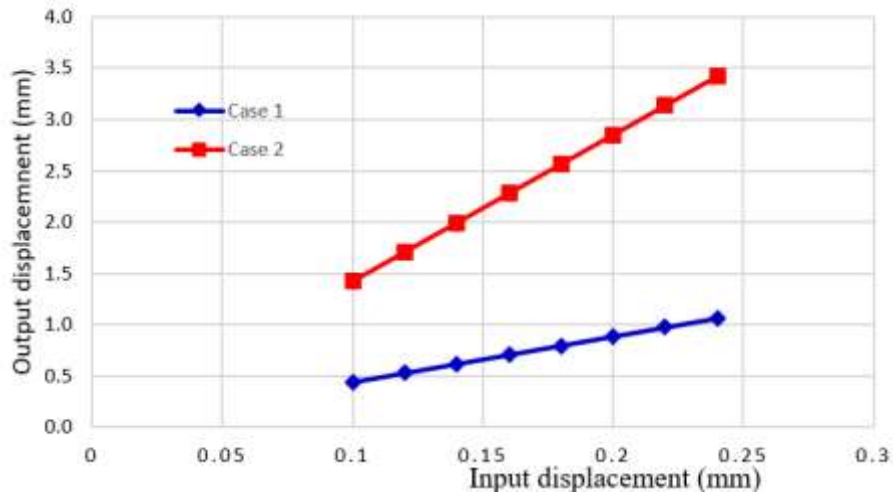
Bảng 2 Tỷ lệ khuếch đại cho trường hợp 2

Input (mm)	Y_{new} (mm)	R_{new}
0.1	1.425	14.25
0.12	1.710	14.25
0.14	1.995	14.25
0.16	2.280	14.25
0.18	2.564	14.25
0.2	2.849	14.25
0.22	3.134	14.25
0.24	3.419	14.25

Bảng 3 So sánh tỷ lệ khuếch đại của trường hợp 1 và trường hợp 2

Input (mm)	R_{old}	R_{new}	Improvement (%)
0.1	4.43	14.25	221.6
0.12	4.43	14.25	221.6
0.14	4.43	14.25	221.6
0.16	4.43	14.25	221.6

0.18	4.43	14.25	221.6
0.2	4.43	14.25	221.6
0.22	4.43	14.25	221.6
0.24	4.43	14.25	221.6



Hình 3.4. Chuyển vị đầu vào so với dịch chuyển đầu ra cho trường hợp 1 và trường hợp 2

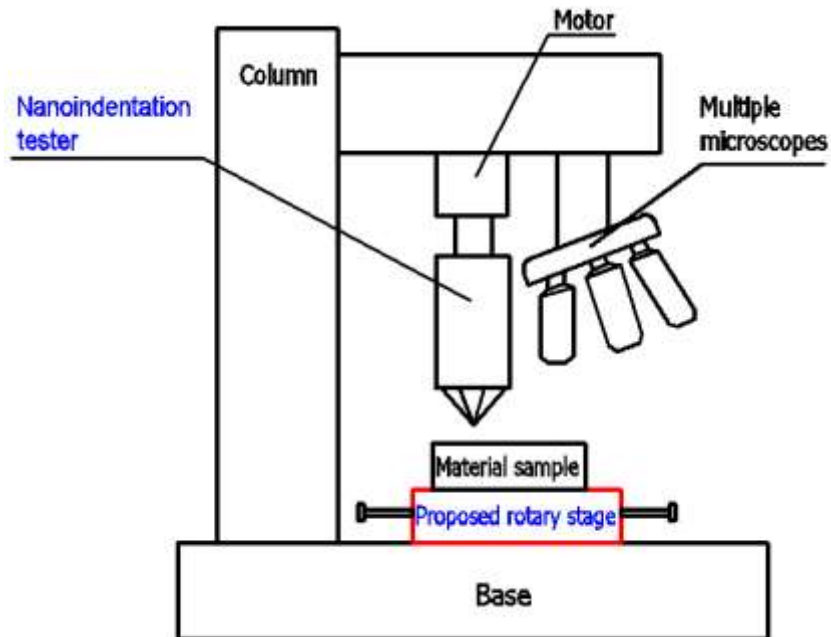
3.3. Bộ định vị xoay mềm

Nguyên lý hoạt động của CRPS dựa trên biên dạng đàn hồi của vật liệu. CRPS đã được sử dụng để định vị mẫu trong quá trình kiểm tra độ cứng vật liệu. Một ứng dụng cơ bản cho thiết bị đo độ cứng đã được đề xuất trong hình 5. Vật liệu Al 7075 được chọn cho CRPS được đề xuất vì độ bền ứng suất cao 503 MPa, mô đun đàn hồi $E = 71700$ MPa, tỉ trọng nhẹ 2770 kg/m^3 và hệ số Poisson là 0,33.

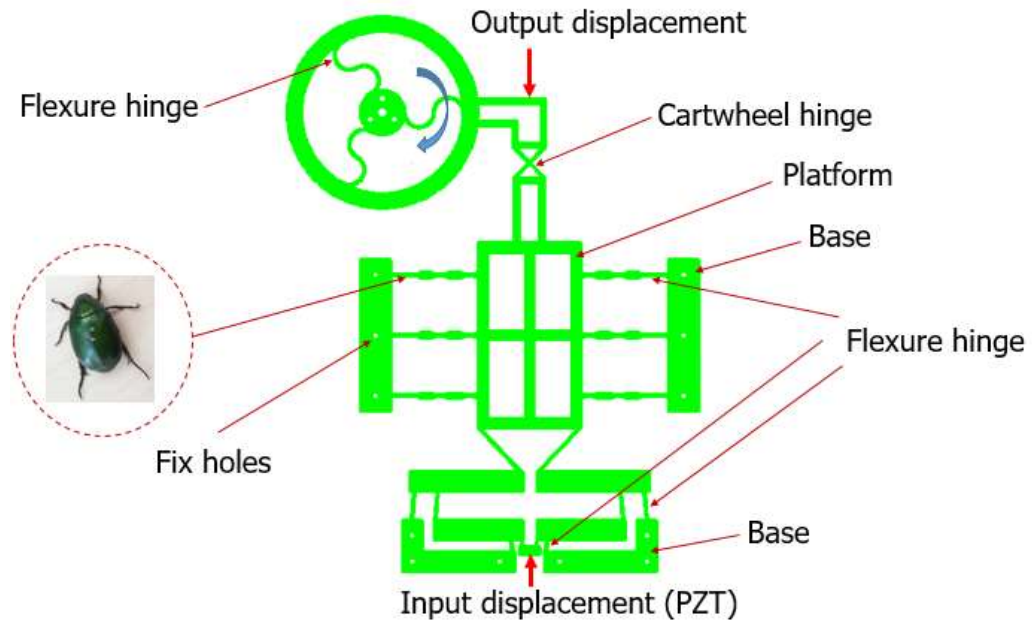
Thông số kỹ thuật của bộ định vị quay được giả sử rằng độ dịch chuyển đầu vào là 0,19 mm. CRPS đã được đề xuất, như trong Hình 3.6. Nó được thiết kế dựa trên biên dạng chân con bọ để có được sự linh hoạt tốt. Nó bao gồm các yếu tố như sau: (i) mười sáu lỗ cố định đã được sử dụng để định vị bộ định vị trên bàn chống rung động, (ii) động cơ áp điện (PZT) (định vị tại vị trí dịch chuyển đầu vào) được sử dụng để tạo ra sự dịch chuyển đầu vào cho bộ định vị bằng cách kết nối trực tiếp với cấu trúc dựa trên biên dạng con bọ cánh cứng và cụm xoay

Tổng kích thước của mô hình là khoảng $280 \text{ mm} \times 376 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$. Bộ định vị quay được đề xuất được thiết kế để tạo ra sự dịch chuyển tuyến tính, và một góc quay lớn định hướng ứng dụng cho thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu. Các tham số hình học của bộ định vị xoay được đề xuất được đưa ra trong Hình 3.7 và Bảng 4. Trong số các tham

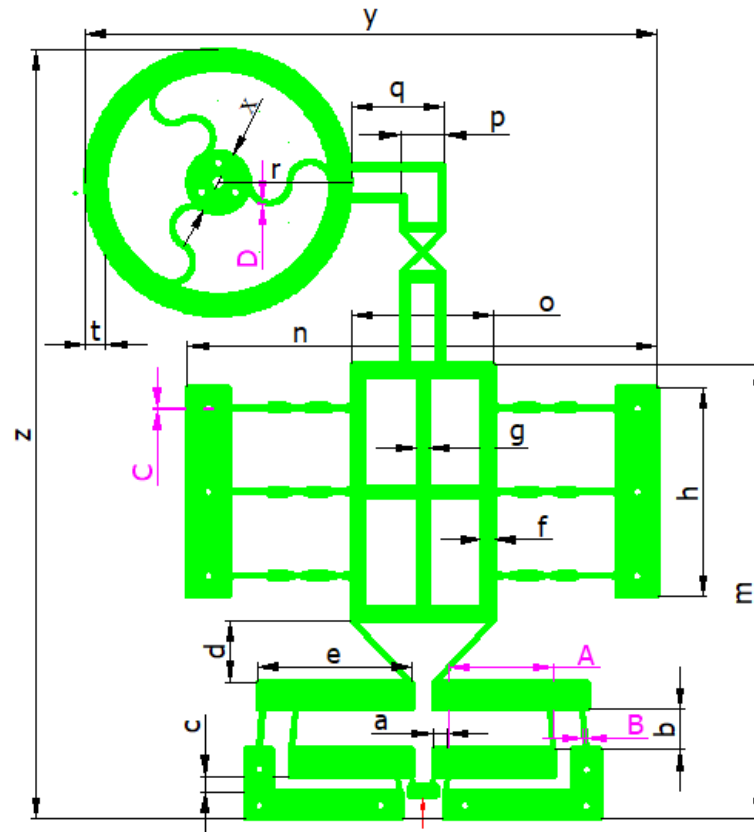
số hình học, các yếu tố A, B, C và D được chọn làm biến thiết kế vì chúng có ảnh hưởng lớn đến các đáp ứng. Trong khi đó, những thông số khác được chọn là hằng số.



Hình 3.5. Hệ thống định hướng hướng dụng cho kiểm tra độ cứng vật liệu



Hình 3.6. Mô hình bộ định vị xoay lấy cảm hứng từ bộ cánh cứng



Hình 3.7. Các thông số thiết kế cho bộ định vị xoay mềm

Bảng 4. Các thông số hình học của bộ định vị xoay (đơn vị: mm)

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
<i>a</i>	6.84	<i>m</i>	222	<i>x</i>	30
<i>b</i>	20	<i>n</i>	230	<i>y</i>	280
<i>c</i>	8	<i>o</i>	70	<i>z</i>	376
<i>d</i>	30	<i>p</i>	30	<i>A</i>	$51 \leq A \leq 53$
<i>e</i>	76	<i>q</i>	70	<i>B</i>	$1 \leq B \leq 1.2$
<i>f</i>	6	<i>r</i>	65	<i>C</i>	$0.5 \leq C \leq 0.7$
<i>g</i>	5	<i>t</i>	10	<i>D</i>	$0.5 \leq D \leq 0.7$
<i>h</i>	102				

CHƯƠNG 4: PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU

4.1. Xây dựng bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu

Trong nghiên cứu này, CRPS cần đạt các đáp ứng như: (i): Hệ số an toàn (F_1) phải càng lớn càng tốt để tăng tuổi bền mỏi cũng như tránh phá hủy của vật liệu, (ii) chuyển vị theo trục y (F_2) phải lớn để mở rộng hành trình làm việc. Vấn đề tối ưu hóa cho giai đoạn quay có thể được tóm tắt như sau:

Tìm các biến thiết kế: $\mathbf{X}=[A,B,C,D]$

Cực đại hóa hệ số an toàn (F_1):

$$F_1(A, B, C, D) \geq 1.5, \quad (3)$$

Cực đại hóa chuyển vị (F_2):

$$F_2(A, B, C, D) \geq 1.55 \text{ mm}, \quad (4)$$

Theo các ràng buộc:

$$51 \text{ mm} \leq A \leq 53 \text{ mm}, 1 \text{ mm} \leq B \leq 1.2 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm} \leq C \leq 0.7 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm} \leq D \leq 0.7 \text{ mm}, \quad (5)$$

trong đó F_1 và F_2 là mục tiêu tối ưu. A, B, C, D là chiều dài của cần đầu tiên, độ dày của khớp mềm (bộ khuếch đại đòn bẩy), độ dày của khớp mềm (cơ cấu chân bộ cánh cứng), độ dày của khớp mềm (cơ cấu xoay), tương ứng.

4.2. Phương pháp tối ưu tích hợp

Để tối ưu hóa các đặc tính tĩnh của CRPS, phương pháp kết hợp của TM, FEM, RSM và TLBO đã được phát triển để tối ưu hóa đa mục tiêu đồng thời. Lưu đồ của phương pháp đề xuất được minh họa trong Hình 4.1. Quá trình tối ưu hóa được mô tả là:

Giai đoạn 1: Thiết kế kỹ thuật hỗ trợ máy tính

Cùng với sự hỗ trợ hiệu quả từ một máy tính hiệu năng cao, hàng ngàn phân tích tính toán mỗi giây có thể được thực hiện tốt. Để tối ưu hóa CRPS, CAED đã được thực hiện theo các bước sau:

Bước 1: Xác định vấn đề tối ưu

CRPS được thiết kế để phục vụ bộ định vị định hướng ứng dụng cho hệ thống kiểm tra độ cứng vật liệu. Một động cơ áp điện PZT đã được sử dụng để đưa ra chuyển động đầu vào cho CRPS nhưng hành trình làm việc của PZT thì hạn chế. Do đó, mục đích của nghiên cứu này là để tối ưu hóa các thông số hình học của bộ định vị. Mục tiêu chất lượng đầu tiên là cực đại hóa hệ số an toàn và mục tiêu thứ hai là tối đa hóa sự chuyển vị đầu ra. Vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu cho CRPS đã được tiến hành để cải thiện các đặc tính của đáp ứng đầu ra.

Bước 2: Kết cấu cơ khí

Một vài mô hình phát thảo được thiết kế dựa trên biên dạng chân con bọ để tạo ra một cấu trúc mềm tốt và để mô tả các hoạt động ban đầu của bộ định vị. Một mô hình cuối cùng đã được chọn.

Bước 3: Biến thiết kế biến và đáp ứng chất lượng

Chiều dài của cần đầu tiên A, độ dày của khớp mềm B, độ dày của khớp mềm C, độ dày của khớp mềm D được xác định là các biến thiết kế để đạt được các mục tiêu chất lượng tốt nhất. Lý do là những thông số này ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính của CRPS. Các biến này có thể được xem như Hình 3.7. Để đáp ứng các yêu cầu cần chuyển vị lớn đầu ra, một hành trình làm việc lớn và hệ số an toàn cao có thể đạt được bằng cách thực hiện tối ưu hóa đa mục tiêu đồng thời.

Bước 4: Xây dựng mô hình 3D-FEM

Mô hình 3D-FEM được thiết kế để phục vụ cho phân tích tính toán và các đặc tính chất lượng đã được truy xuất.

Bước 5: Đánh giá các đặc tính chất lượng ban đầu

Từ mô hình 3D-FEM đã được phân tích. Nếu các thông số kỹ thuật của giai đoạn không được thỏa mãn theo yêu cầu của nhà thiết kế, quy trình sẽ được trả về Bước 2. Nếu không, nó sẽ chuyển sang giai đoạn 2.

Giai đoạn 2: Phương pháp đáp ứng và mô hình hồi quy

Để tiến hành quá trình tối ưu, một thí nghiệm số đã được tạo ra và dữ liệu số đã được thu thập. Sau đó, các mô hình hồi quy đã được thiết lập để liên kết các biến thiết kế và đáp ứng chất lượng.

Bước 6: Thiết kế thí nghiệm

Đầu tiên, TM được sử dụng để xác định một ma trận trực giao để thiết lập số lượng thí nghiệm bằng số vì nó cho phép một số lượng nhỏ các thí nghiệm. Ngoài ra, phân tích phương sai (ANOVA) đã được sử dụng để tìm ra sự đóng góp đáng kể của các biến thiết kế.

Bước 7: Tạo ra bộ dữ liệu

Các thí nghiệm số đã được thực hiện dựa trên sự tích hợp lại giữa FEM và RSM. Sử dụng mô hình 3D-FEM được thiết kế trong Bước 4. Sau đó, kết quả của cả hai đáp ứng chất lượng đã được truy xuất

Bước 8: Thiết lập mô hình hồi quy

Thứ hai, RSM được áp dụng để thiết lập mối quan hệ đa biến tuyến tính và phi tuyến giữa các biến thiết kế và các đáp ứng đầu ra. Bởi vì các mối quan hệ này gần như không tuyến tính, một dạng bậc hai đầy đủ là mô hình phù hợp cho CMRS như sau:

$$F_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (6)$$

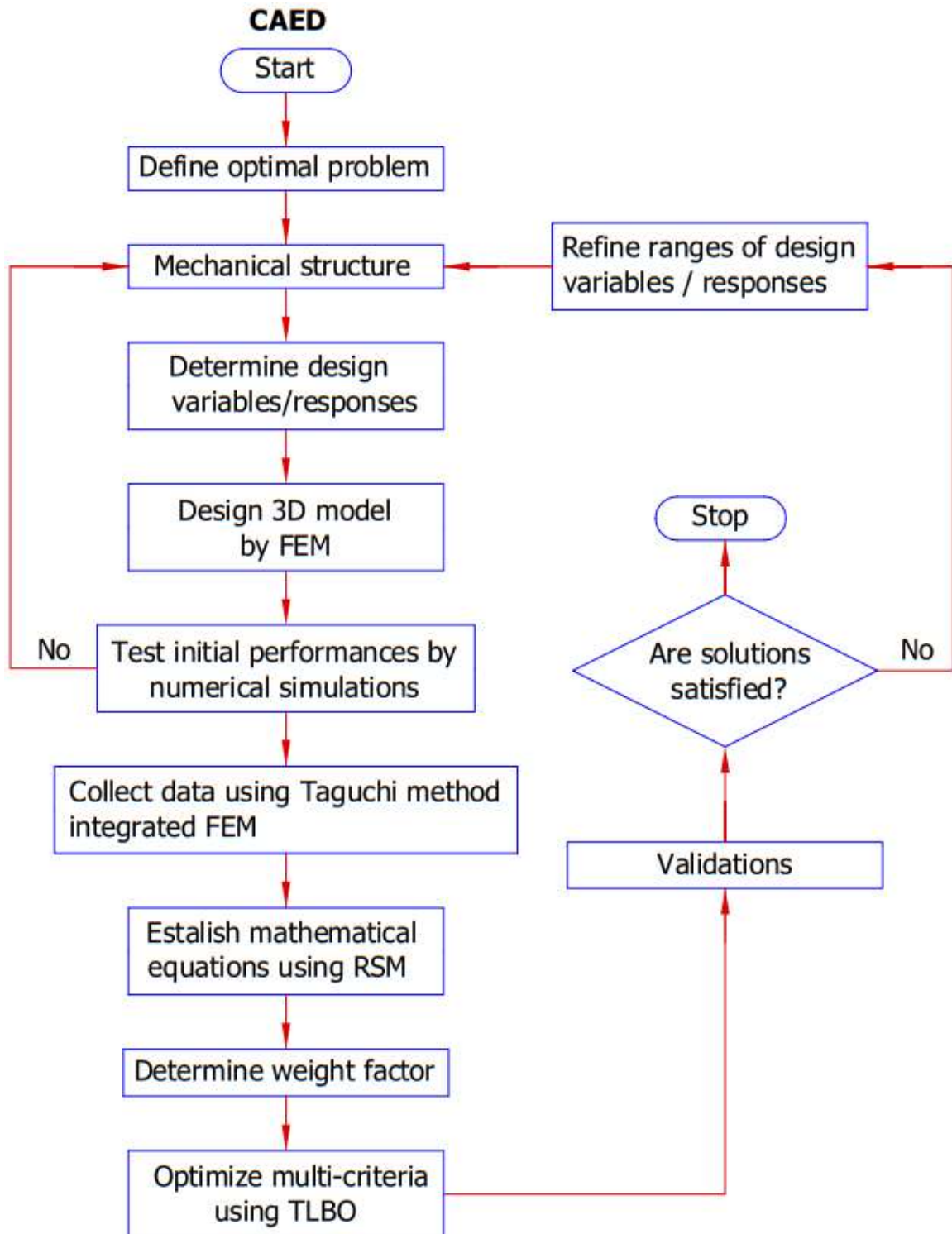
trong đó β_i ($i=0, 1, 2, \dots, n$) là các hệ số hồi quy không xác định, β_{ij} ($i < j$) là các hệ số tương tác x_1, x_2, \dots, x_n các tập hợp n dự đoán có liên quan đến đáp ứng F thứ j , ε là một sai số ngẫu nhiên.

Các hàm mục tiêu này được sử dụng cho thuật toán TLBO.

Giai đoạn 3: Tối ưu hóa bằng TLBO

Dựa trên các hàm mục tiêu đã được xác định trong Bước 8, quy trình tối ưu hóa được thực hiện bằng thuật toán TLBO. TLBO đã được sử dụng rộng rãi [25-27] nhưng nó đã không được áp dụng cho bộ định vị đề xuất. Nguyên lý hoạt động của thuật toán này bắt chước khả năng dạy-học của người dạy và người học trong một lớp học. Kết quả học tập mong đợi của TLBO là kết quả điểm của học sinh phụ thuộc vào khả năng của giáo viên. Nó dự báo rằng một sinh viên chất lượng cao là do được đào tạo tốt bởi một giáo viên tốt. Hơn nữa, bên cạnh việc học từ giáo viên, học sinh có thể học các kiến thức khác từ các bạn cùng lớp khác nhau để cải thiện điểm số của họ. Các khóa học được coi là biến thiết kế và kết quả học tập của sinh viên tương tự như giá trị phù hợp của quá

trình tối ưu hóa. Thuật toán bao gồm hai giai đoạn: (i) giai đoạn giáo viên trong đó các ứng viên được phân phối ngẫu nhiên trong không gian tìm kiếm và giải pháp tốt nhất được xác định và (ii) giai đoạn người học trong đó các giải pháp cố gắng có được kiến thức mới từ việc tương tác với các sinh viên khác.



Hình 4.1. Lưu đồ của phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu tích hợp

Giai đoạn 4: Xác định trọng số

Trong bài báo này, một hệ số an toàn cao và sự dịch chuyển lớn đã được mong đợi. Do đó, tỷ lệ tín hiệu/nhiều (S/N) cho cả hai đáp ứng được tính như sau:

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{1}{f_i^2} \right), \quad (7)$$

trong đó f_i biểu thị đáp ứng chất lượng thứ i ; e số thí nghiệm; q số lần lặp lại thí nghiệm thứ i .

Như đã biết, một sự dịch chuyển lớn bị xung đột với hệ số an toàn cao. Để tạo sự cân bằng, phương pháp thử-sai được chọn nhưng tốn kém. Một cách khác là chuyển đổi nhiều mục tiêu thành một mục tiêu bằng cách nhân từng mục tiêu với một trọng số tương ứng. Theo truyền thống, WF được xác định dựa trên mức độ ưu tiên của từng đáp ứng và nhu cầu của khách hàng. Thay đổi giá trị trọng lượng có thể dẫn đến kết quả tối ưu khác nhau trong khi đáp ứng rất nhạy cảm với các thông số thiết kế. Do đó, WF nên được tính toán chính xác. Do đó, hệ số an toàn và chuyển vị đầu ra tối ưu có thể được lấy chính xác. Trong nghiên cứu này, dựa trên các phương trình toán học đã được thiết lập tốt, WF được chỉ định cho hệ số an toàn và chuyển vị đầu ra tương ứng. Do đó, WF có thể được điều khiển dễ dàng khi nhu cầu của khách hàng thay đổi.

Trong nghiên cứu này, hàm mục tiêu tổng trọng số được biểu thị bằng:

$$f = w_1 f_1 + w_2 f_2, \quad (8)$$

trong đó, f_1, f_2, f là hàm hệ số an toàn, chuyển vị và hàm mục tiêu tổng trọng số tương ứng. w_1 và w_2 được biểu thị các giá trị trọng số tương ứng của f_1 và f_2 . Trong đó, $0 \leq w_i \leq 1$ và $\sum_{i=1}^2 w_i = 1$. Tổng trọng số được giả định là sự kết hợp của các mục tiêu. Mỗi mục tiêu tối ưu hóa có thể được xác định bằng một giải pháp tối ưu duy nhất.

Có một số phương pháp để xác định giá trị w_1 và w_2 như dựa trên kinh nghiệm của người thiết kế, phương pháp gán trực tiếp, phương pháp thông tin tối thiểu và xác định ngẫu nhiên. Tuy nhiên, độ chính xác của các phương pháp này không cao và rất phức tạp. Do đó, chúng tôi đã làm theo các phương pháp của Dao et al. [34] để tính WF cho đáp ứng dựa trên các mô hình toán học trước khi tối ưu hóa để có được kết quả chính xác hơn. Sơ đồ đề xuất sử dụng độ nhạy chuẩn hóa của từng tham số cho các mục tiêu khác nhau.

Ưu điểm của phương pháp này là dễ dàng tính toán các giá trị trọng số và nó cho phép điều chỉnh chính xác giá trị trọng số để giải pháp tối ưu được xác nhận cho các mục tiêu thiết kế. Nguyên tắc tính toán của phương pháp đề xuất này được mô tả như sau:

Dựa trên TM, mức tối ưu của các tham số thiết kế tương ứng với giá trị tỷ lệ S/N cao nhất. Ngoài ra, theo bảng đáp ứng của tỷ lệ S/N trung bình, giải pháp tối ưu hóa được xác định. Độ lệch trung bình giữa tỷ lệ S/N tối thiểu và tỷ lệ S/N tối đa của mỗi cấp được tính toán, như được hiển thị trong bảng đáp ứng. Độ lệch này được coi là phạm vi trung bình (tối đa) cho mỗi cấp độ của từng tham số. Nếu độ lệch cao hơn, mức hiệu ứng của từng cấp độ của từng tham số trên từng mục tiêu trở nên lớn hơn.

Trong các khía cạnh khác, nếu phạm vi trung bình (tối đa) cho mức của một tham số bằng 0, nó có thể tóm tắt tham số đó không liên quan đến đáp ứng. Ngoài ra, nếu mục tiêu không thay đổi khi mức độ của tham số bị thay đổi, điều này cho thấy rằng không có mối tương quan giữa tham số và đáp ứng. Nó có thể tóm tắt rằng cả tỷ lệ WF và S/N đều có những ảnh hưởng quan trọng đáng kể đến các đáp ứng. Trong khi đó, khi tỷ lệ WF hoặc S/N thay đổi, giải pháp tối ưu cũng thay đổi.

Vì vậy, mức đóng góp của từng tham số trên mỗi đáp ứng có thể được xem xét theo phạm vi trung bình (max-min) của tỷ lệ S/N . Phạm vi trung bình có thể được kiểm tra dưới dạng giá trị số lượng của mức đóng góp cho từng mục tiêu. Sau đó, tỷ lệ giá trị số lượng của mỗi đáp ứng được xác định là một tiêu chí để tính toán WF. Do đơn vị của hệ số an toàn và độ dịch chuyển đầu ra (mm) là khác nhau, nên tỷ lệ S/N trung bình của từng cấp độ của mỗi phản ứng phải được chuẩn hóa như z_i ($0 \leq z_i \leq 1$) thông qua bên dưới để loại bỏ ảnh hưởng của việc sử dụng các đơn vị khác nhau và giảm sự khác biệt. Mục đích của chuẩn hóa là hiệu chỉnh các giá trị được đo trên các thang đo khác nhau thành thang đo chung. Các giá trị chuẩn hóa của tỷ lệ S/N trung bình thay đổi giữa 0 và 1.

Phương trình cao hơn tốt hơn được sử dụng cho cả hai mục tiêu, giá trị trung bình bình thường của tỷ lệ S/N được chuẩn hóa như sau:

$$z_i = \frac{\eta_i - \min \eta_i}{\max \eta_i - \min \eta_i}, \quad (9)$$

trong đó z_i là giá trị S/N trung bình được chuẩn hóa cho đáp ứng thứ i ($i = 1, 2, \dots, n$), n là số lượng đáp ứng, η_i minh họa giá trị S/N tính từ TM. $\max \eta_i$ và $\min \eta_i$ là giá trị lớn nhất và nhỏ nhất tương ứng.

Phạm vi trung bình (max-min) của tỷ lệ S/N trung bình chuẩn hóa cho từng cấp độ của từng tham số được tính như sau:

$$r_{ij} = \max \{z_{i,j,1}, z_{i,j,2}, \dots, z_{i,j,r}\} - \min \{z_{i,j,1}, z_{i,j,2}, \dots, z_{i,j,r}\}, \quad (10)$$

trong đó r_{ij} là phạm vi trung bình (max-min) của tỷ lệ S/N trung bình được chuẩn hóa cho từng mức của mỗi tham số thiết kế, q là số lượng tham số thiết kế, $r=1,2,..l$, l là số mức thí nghiệm của từng mục tiêu. $z_{i,j,r}$ là giá trị trung bình chuẩn hóa của S/N cho phân hồi thứ i của tham số thứ j tại thí nghiệm thứ k .

Trọng số (WF) được tính theo phương trình sau:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^q r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^q r_{ij}}, \quad (11)$$

trong đó w_i là trọng số của mục tiêu thứ i và $w_i \geq 0$.

Tổng trọng số cho tổng các mục tiêu phải bằng 1:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (12)$$

Giai đoạn 5: Phân tích thống kê cho thuật toán kết hợp được đề xuất

Để đánh giá ứng xử của thuật toán kết hợp được đề xuất, kiểm tra thống kê thứ hạng Wilcoxon, là một phân tích thống kê phi tham số, đã được áp dụng. Để hiểu rõ chi tiết về kỹ thuật này, độc giả có thể tham khảo [31-32]. Một so sánh các thuật toán tiến hóa là nhằm mục đích khám phá sự khác biệt đáng kể giữa chúng với thuật toán kết hợp.

CHƯƠNG 5: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Thu thập dữ liệu

Mỗi yếu tố được chia thành ba mức tùy thuộc vào kiến thức chuyên ngành và kinh nghiệm thiết kế, như được minh họa trong Bảng 5. Ma trận trực giao L_9 (3^4) của TM được sử dụng để xây dựng số lượng thí nghiệm. Hệ số an toàn (F_1) và chuyển vị (F_2) đã được thu thập, như trong Bảng 6.

Bảng 5. Các tham số quá trình và mức độ (đơn vị: mm)

Yếu tố	Khoảng	Mức 1	Mức 2	Mức 3
A	51-53	51	52	53
B	1-1.2	1	1.1	1.2
C	0.5-0.7	0.5	0.6	0.7
D	0.5-0.7	0.5	0.6	0.7

Sau đó, ANOVA được áp dụng để xác định sự đóng góp đáng kể của từng tham số trên các đáp ứng. Dựa trên dữ liệu trong Bảng 6, phần mềm MINITAB 18 đã được sử dụng để phân tích dữ liệu thí nghiệm số.

Bảng 6. Kết quả thí nghiệm số và các đáp ứng

TT.	A	B	C	D	Hệ số an toàn	Chuyển vị (mm)
1	51	1	0.5	0.5	1.5800	2.1726
2	51	1.1	0.6	0.6	1.5645	1.8280
3	51	1.2	0.7	0.7	1.5348	1.6166
4	52	1	0.6	0.7	1.5587	1.7421
5	52	1.1	0.7	0.5	1.4766	1.6637
6	52	1.2	0.5	0.6	1.5866	2.0411
7	53	1	0.7	0.6	1.4634	1.5807
8	53	1.1	0.5	0.7	1.4821	1.9220
9	53	1.2	0.6	0.5	1.5091	1.9174

Các phương trình hồi quy đã đạt được như sau:

$$F_1 = -43.54 + 1.867A - 6.780B + 2.532C + 1.770D - 0.01832A * A + 3.103B * B - 2.352C * C - 1.462D * D \quad (13)$$

$$F_2 = 29.39 - 0.437A - 2.03B - 47.92C - 0.419D - 0.019A * B + 0.757AC + 5.856B * C \quad (14)$$

Bảng 7. Phân tích ANOVA cho F_1

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	P-Value
Model	8	0.017736	100.00%	0.017736	0.002217	Significant
Linear	4	0.013606	76.71%	0.013606	0.003401	Significant
A	1	0.008415	47.44%	0.008415	0.008415	Significant
B	1	0.000134	0.76%	0.000134	0.000134	Significant
C	1	0.005040	28.42%	0.005040	0.005040	Significant
D	1	0.000016	0.09%	0.000016	0.000016	Significant
Square	4	0.004130	23.29%	0.004130	0.001033	Significant
A*A	1	0.000671	3.78%	0.000671	0.000671	Significant
B*B	1	0.001926	10.86%	0.001926	0.001926	Significant
C*C	1	0.001106	6.24%	0.001106	0.001106	Significant
D*D	1	0.000427	2.41%	0.000427	0.000427	Significant
Error	0					
Total	8	0.017736	100.00%			

Bảng 8. Phân tích ANOVA cho F_2

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	P-Value
Model	7	0.320994	99.97%	0.320994	0.045856	0.036
Linear	4	0.315632	98.30%	0.120716	0.030179	0.043
A	1	0.006475	2.02%	0.000033	0.000033	0.667
B	1	0.001059	0.33%	0.004390	0.004390	0.096
C	1	0.270810	84.34%	0.076496	0.076496	0.023
D	1	0.037288	11.61%	0.001507	0.001507	0.161
2-Way Interaction	3	0.005362	1.67%	0.005362	0.001787	0.172
A*B	1	0.000355	0.11%	0.000002	0.000002	0.910
A*C	1	0.001007	0.31%	0.003340	0.003340	0.109
B*C	1	0.004000	1.25%	0.004000	0.004000	0.100
Error	1	0.000101	0.03%	0.000101	0.000101	
Total	8	0.321094	100.00%			

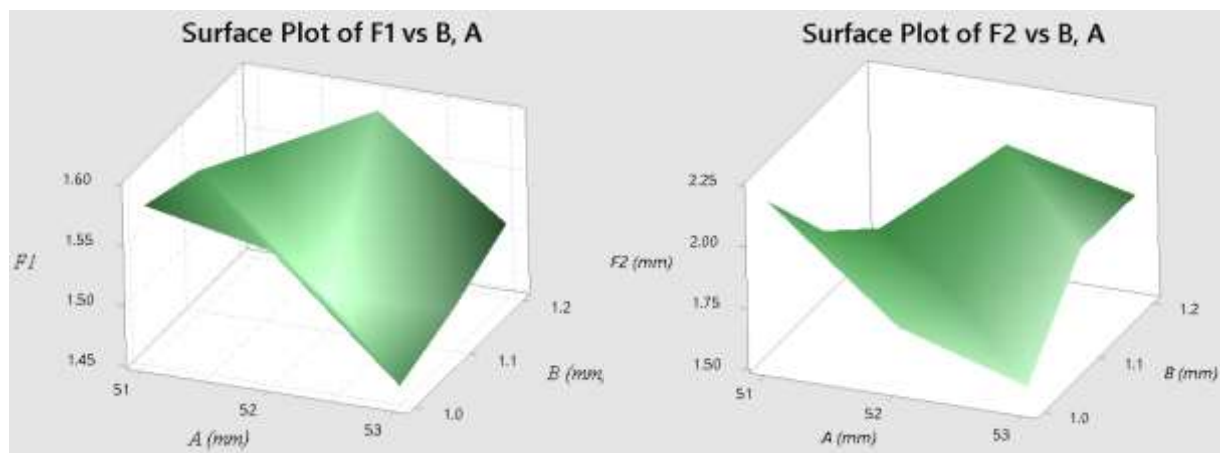
Bảng 7 và 8 cho thấy kết quả phân tích ANOVA của hệ số an toàn và chuyển vị. Phân tích này được thực hiện ở mức ý nghĩa 5% và mức tin cậy 95%. Trong Bảng 7, kết quả chỉ ra rằng tỷ lệ đóng góp vào hệ số an toàn F_1 của A và C cũng như tương tác giữa B và B có ý nghĩa hơn so với các thông số thiết kế khác với lần lượt 47,44%, 28,42% và

10,86%. Ngược lại, tỷ lệ đóng góp trên F_1 của B và D, tương tác giữa C và C, tương tác giữa A và A cũng như tương tác D và D rất nhỏ tương ứng với 0,76%, 0,09%, 6,24%, 3,78% và 2,41%. Do đó, để tăng hệ số an toàn, A và C cần được kiểm soát đáng kể.

Hơn nữa, như được đưa ra trong Bảng 7, tỷ lệ đóng góp của C lên chuyển vị F_2 cao nhất với 84,34% và tỷ lệ D lên F_2 cao thứ 2 ở mức 11,61%. Trong khi đó, các yếu tố hiệu ứng khác được liệt kê có tỷ lệ đóng góp nhỏ hơn nhiều. Tỷ lệ A và B cũng như tương tác giữa A và B, tương tác giữa A và C và tương tác giữa B và C lần lượt là 2,02%, 0,33%, 0,11%, 0,31% và 1,25%. Do đó, để tăng giá trị của F_2 , các tham số C và D cần được kiểm soát đáng kể. Ngoài ra, phần trăm đóng góp của sai số lần lượt là 0% và 0,03% cho F_1 và F_2 .

5.2. Phân tích độ nhạy

Kỹ thuật thống kê đã được sử dụng để xác định mức độ ảnh hưởng của các biến thiết kế đối với các đáp ứng đầu ra. Như đã thấy trong Hình 5.1, yếu tố A cho thấy trong phạm vi từ 51 mm đến 52 mm, thông số này ảnh hưởng giảm nhẹ cho F_1 và F_2 , nhưng trong phạm vi từ 52 mm đến 53 mm, nó đã tác động giảm mạnh cho F_1 và tăng nhẹ cho F_2 . Ngoài ra, yếu tố B chỉ ra rằng trong phạm vi từ 1 mm đến 1,1 mm, nó đã ảnh hưởng giảm đáng kể đến F_1 và gây ra sự tăng nhẹ lên F_2 , tuy nhiên, từ 1,1 mm đến 1,2 mm, đã ảnh hưởng tăng mạnh lên F_1 và tăng dần lên F_2 .

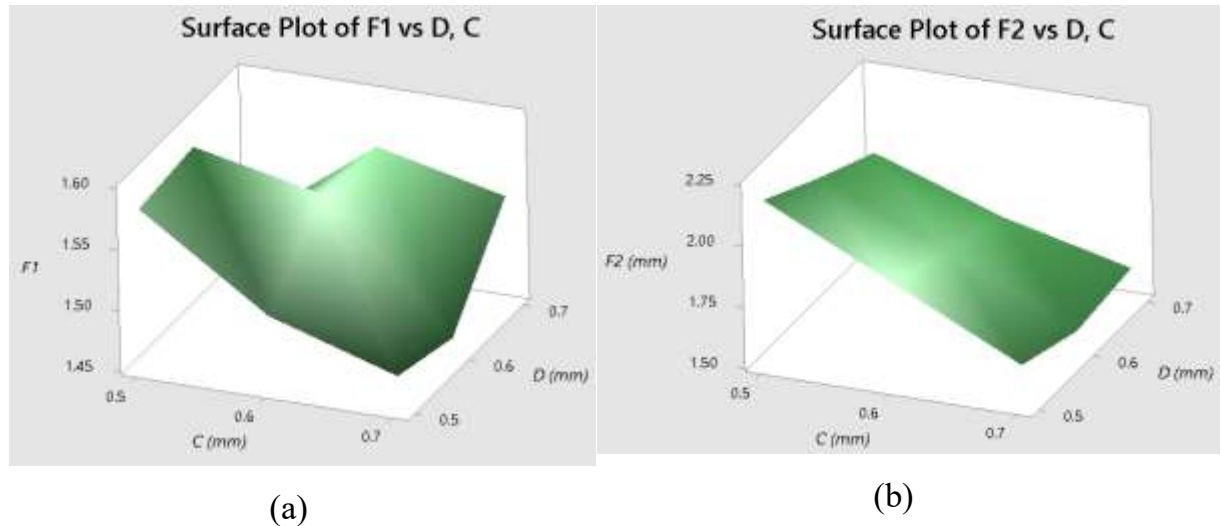


(a)

(b)

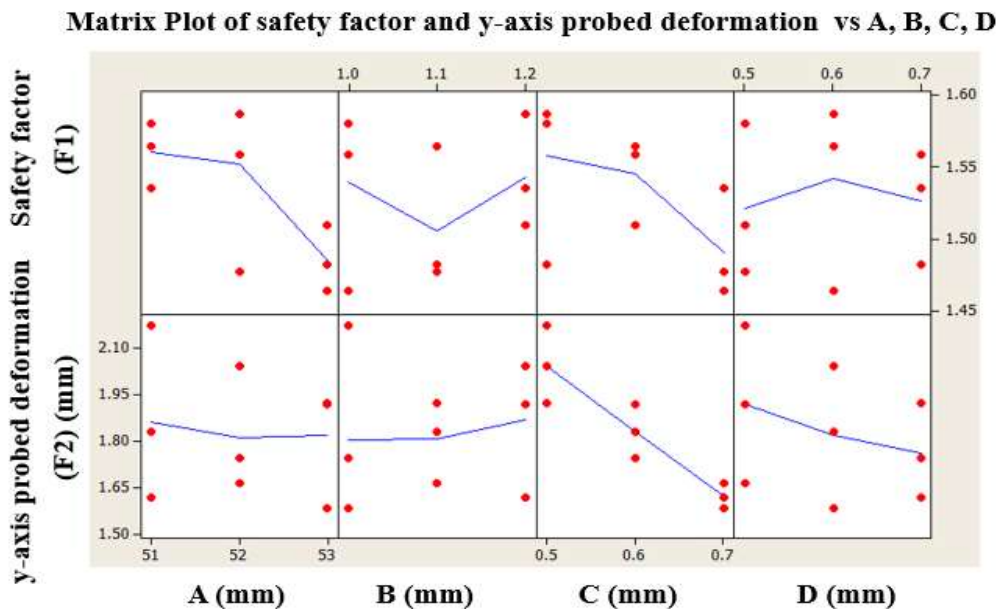
Hình 5.1. Sơ đồ ảnh hưởng của A và B đến: (a) hệ số an toàn và (b) chuyển vị đầu ra

Như được vẽ trong hình 5.2, yếu tố C chỉ ra rằng trong phạm vi từ 0,5 mm đến 0,6 mm, nó đã ảnh hưởng giảm dần xuống đối với F_1 và gây ra sự giảm mạnh đối với F_2 , nhưng, từ 0,6 mm đến 0,7 mm, có sự gia tăng mạnh cả hai đến F_1 và F_2 . Cuối cùng, yếu tố D cho thấy trong phạm vi từ 0,5 mm đến 0,6 mm, nó đã ảnh hưởng đến việc tăng dần lên F_1 và gây ra sự tăng nhẹ lên F_2 , tuy nhiên, từ 0,6 mm đến 0,7 mm, đã giảm dần cho cả F_1 và F_2 .



Hình 5.2. Sơ đồ ảnh hưởng của C và D đến: (a) hệ số an toàn và (b) chuyển vị đầu ra

Tóm tắt, ảnh hưởng tổng thể của các biến thiết kế đã được minh họa, như trong Hình 5.3. Nó chỉ ra phạm vi sự tăng và giảm trong từng yếu tố. Từ đó, các nhà thiết kế có thể kiểm soát các yếu tố để đạt được một thiết kế tốt nhất cho bộ định vị đề xuất.



Hình 5.3. Sơ đồ độ nhạy của các tham số có thể điều khiển lên các đáp ứng đầu ra

Therefore, it illustrates that the displacement had an significant grade higher than that of the safety factor for the rotary stage. This was an agreement with the author's specialized knowledge and design experiences in the compliant mechanism area.

Dựa trên các kết quả số từ Bảng 6, các giá trị tỷ lệ S/N (η_1 và η_2) được tính bằng phương trình (9), như được đưa ra trong Bảng 9. Và sau đó, các giá trị trung bình và phạm vi trung bình cho các tỷ lệ S/N được chuẩn hóa đã được tính toán cho từng cấp độ của từng tham số bằng cách sử dụng phương trình (10) và kết quả được minh họa trong Bảng 10. Sử dụng phương trình (11), trọng số của từng đáp ứng đã được tính toán. Như thể hiện trong Bảng 11 và 12, kết quả chỉ ra rằng trọng số của hệ số an toàn và chuyển vị lần lượt là 0,5995 (59,95%) và 0,4005 (40,05%). Các giá trị này được xác định chính xác dựa trên tập hợp các phương trình đã thiết lập và sau đó chúng được gán cho quá trình tối ưu hóa tiếp theo trong thuật toán TLBO. Do đó, nó minh họa rằng hệ số an toàn có một mức đáng kể cao hơn so với chuyển vị cho bộ định vị quay. Đây là một thỏa thuận phù hợp với kiến thức chuyên môn và kinh nghiệm thiết kế trong lĩnh vực cơ cấu mềm.

Bảng 9 Kết quả thí nghiệm số và tỷ lệ S/N

TT.	f_1	f_2 (mm)	η_1 của f_1 (dB)	η_2 của f_2 (dB)
1	1.5800	2.1726	3.9731	6.7396
2	1.5645	1.8280	3.8875	5.2395
3	1.5348	1.6166	3.7210	4.1721
4	1.5587	1.7421	3.8553	4.8215
5	1.4766	1.6637	3.3853	4.4215
6	1.5866	2.0411	4.0093	6.1973
7	1.4634	1.5807	3.3073	3.9770
8	1.4821	1.9220	3.4176	5.6751
9	1.5091	1.9174	3.5744	5.6543

Bảng 10 Các giá trị của tỷ lệ S/N được chuẩn hóa (z_i)

S/N ratios		Normalized S/N ratios (z_i)	
η_1 (dB)	η_2 (dB)	z_1 of η_1	z_2 of η_2
3.9731	6.7396	0.9484	1.0000
3.8875	5.2395	0.8265	0.4570
3.7210	4.1721	0.5893	0.0706
3.8553	4.8215	0.7805	0.3057
3.3853	4.4215	0.1111	0.1609

4.0093	6.1973	1.0000	0.8037
3.3073	3.9770	0.0000	0.0000
3.4176	5.6751	0.1571	0.6147
3.5744	5.6543	0.3804	0.6071

Bảng 11. Trọng số cho hệ số an toàn

Mức	Giá trị trung bình của tỷ lệ S/N được chuẩn hóa ở mỗi mức			
	A	B	C	D
Mức 1	0.7881	0.5764	0.7019	0.4800
Mức 2	0.6306	0.3649	0.6625	0.6088
Mức 3	0.1792	0.6566	0.2858	0.5090
Khoảng r_{ij}	0.6089	0.2917	0.4160	0.1288
Trọng số cho hệ số an toàn: $w_1 = 0.5995$				

Bảng 12 Trọng số cho chuyển vị đầu ra

Mức	Giá trị trung bình của tỷ lệ S/N được chuẩn hóa ở mỗi mức			
	A	B	C	D
Mức 1	0.5092	0.4352	0.8036	0.5893
Mức 2	0.4234	0.4109	0.4202	0.4202
Mức 3	0.4073	0.4938	0.2821	0.3303
Khoảng r_{ij}	0.1019	0.0830	0.5215	0.2590
Trọng số cho chuyển vị đầu ra: $w_2 = 0.4005$				

5.3. Kết quả tối ưu và phân tích thống kê

5.3.1 Kết quả tối ưu

Quá trình tối ưu hóa được triển khai bằng phần mềm MATLAB 2017. Các kết quả tối ưu được tìm thấy tại $A = 51$ mm, $B = 1$ mm, $C = 0.5$ mm, $D = 0.6674$ mm, $F_1 = 1.558$ and $F_2 = 2.096$ mm. Hiệu quả của thuật toán đề xuất được so sánh với các thuật toán tiến hóa khác, chẳng hạn như thuật toán tiến hóa vi phân thích nghi (AEDE) [9].

5.3.2 Phân tích thống kê

Để đánh giá ứng xử thống kê của thuật toán tối ưu hóa kết hợp, một phân tích thống kê đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Bài kiểm tra xếp hạng Wilcoxon đã được áp dụng để mô tả ứng xử của thuật toán được đề xuất. Các mô phỏng tính toán được tiến hành 40 lần chạy cho mỗi thuật toán. Kiểm tra Wilcoxon đã được thực hiện ở mức đáng kể 5% và khoảng tin cậy 95%. Kết quả kiểm tra Wilcoxon đã được đưa ra trong Bảng 13 và 14.

Như đã biết, một giả thuyết không được giả định rằng không có sự khác biệt đáng kể giữa các giá trị trung bình của hai thuật toán. Như được đưa ra trong Bảng 13 và 14, kết quả cho thấy giá trị p nhỏ hơn 0,05 (mức ý nghĩa 5%) là bằng chứng mạnh mẽ chống lại giả thuyết không. Nó có nghĩa là có sự khác biệt thống kê giữa thuật toán được đề xuất và thuật toán AEDE. Nó cho thấy thuật toán lai được đề xuất là tốt hơn thuật toán AEDE trong việc giải quyết thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu trong bài báo này.

Bảng 13. So sánh Wilcoxon của thuật toán được đề xuất với AIDE về hệ số an toàn

Number for tests	Estimated median	p-value	Wilcoxon statistic
40	0.0020	0.000	820

Bảng 14. So sánh Wilcoxon của thuật toán được đề xuất với AIDE cho sự dịch chuyển

Sample for tests	Estimated median	p-value	Wilcoxon statistic
40	0.00175	0.000	820

Một cách khác, kiểm tra Friedman là phương pháp không tham số, thay thế cho ANOVA một chiều bằng các biện pháp đo lặp đi lặp lại. Cách tiếp cận này sẽ xác định sự khác biệt giữa phương pháp tối ưu hóa lai được đề xuất và thuật toán AEDE ở mức đáng kể là $\alpha = 0,05$. Thử nghiệm Friedman cho hệ số an toàn và chuyển vị được tiến hành riêng rẽ. Các mô phỏng tính toán được tiến hành 40 lần chạy cho mỗi thuật toán. Kết quả cho thấy giá trị p nhỏ hơn 0,05. kết quả là giả thuyết không đã bị bác bỏ. Có thể kết luận rằng có một sự khác biệt giữa phương pháp tối ưu hóa lai được đề xuất và AEDE, như được đưa ra trong Bảng 15-16.

Bảng 15. Kiểm tra Friedman cho hệ số an toàn

Đáp ứng	Số lần kiểm tra	Trung bình	Tổng
Hệ số an toàn theo phương pháp đề xuất	40	1.5586	80.0
Hệ số an toàn của AEDE	40	1.5566	40.0
Overall	80	1.5576	
DF	Chi-Square	P-Value	
1	40.00	0.000	
Giả thuyết Null	H ₀ : Tất cả các hiệu quả xử lý đều bằng không		
Giả thuyết thay thế	H ₁ : Không phải tất cả các hiệu quả xử lý đều bằng không		

Table 16. Kiểm tra Friedman cho chuyển vị.

Đáp ứng	Số lần kiểm tra	Trung bình	Tổng
Chuyển vị theo phương pháp đề xuất	40	2.096	80.0
Chuyển vị theo AEDE	40	2.094	40.0
Tổng	80	2.095	
DF	Chi-Square	P-Value	
1	40.00	0.000	
Giả thuyết Null	H ₀ : Tất cả các hiệu quả xử lý đều bằng không		
Giả thuyết thay thế	H ₁ : Không phải tất cả các hiệu quả xử lý đều bằng không		

5.4. Xác nhận

Các thông số tối ưu ($A = 51$ mm, $B = 1$ mm, $C = 0.5$ mm, $D = 0.6674$ mm, $F_1 = 1.558$ và $F_2 = 2.096$ mm) đã được sử dụng để tạo nguyên mẫu 3D. Sau đó, xác nhận thử nghiệm FEA đã được tiến hành để đánh giá kết quả dự đoán. Quá trình được thực hiện với cùng các ràng buộc và chuyển vị đầu vào giống nhau. Tối đa biến dạng là khoảng 2.096 mm và hệ số an toàn tối thiểu là khoảng 1.558. Bảng 17 minh họa rằng sai số giữa kết quả dự đoán và xác nhận cho hệ số dịch chuyển và hệ số an toàn lần lượt là 6,82% và 0,3%. Nó có nghĩa là các giải pháp dự đoán là một phù hợp tốt với kết quả được xác nhận.

So với thiết kế ban đầu, kết quả tối ưu tốt hơn so với thiết kế ban đầu. Một sự cải thiện sau khi tối ưu hóa cho hệ số an toàn là khoảng 3,708% và cho sự dịch chuyển là khoảng 18,498%, như được đưa ra trong Bảng 18. Nó cho thấy thuật toán lai được đề xuất là một cách tiếp cận hiệu quả cho thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu của bộ định vị xoay.

Bảng 17. Sai số giữa kết quả dự đoán và kết quả xác nhận

Đáp ứng	Dự đoán	Xác nhận	Sai số (%)
F_1	1.558	1.5533	0.30
F_2 (mm)	2.096	1.9621	6.82

Bảng 18. Sự cải tiến giữa thiết kế ban đầu và thiết kế tối ưu

Đáp ứng	Thiết kế ban đầu	Thiết kế tối ưu	Cải thiện (%)
F_1	1.5023	1.558	3.708
F_2 (mm)	1.7688	2.096	18.498

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài viết này trình bày một thuật toán tối ưu hóa kết hợp hiệu quả cho bộ định vị quay xoay mềm. Bộ định vị được sử dụng để định hướng ứng dụng cho hệ thống kiểm tra độ cứng vật liệu. Nó đã được bắt chước ứng xử cơ sinh học của con bọ cánh cứng để đạt được sự dịch chuyển tuyến tính và linh hoạt hơn. Để tăng cường hành trình làm việc, các tham số hình học của CRPS đề xuất đã được tối ưu hóa thông qua thuật toán lai của TM, FEM, RSM và TLBO. Hệ số an toàn và chuyển vị được coi là hai hàm mục tiêu được hình thành từ sự tích hợp của TM, FEM và RSM.

Và sau đó, hệ số trọng số của cả hai đáp ứng đã được tính bằng cách thiết lập các bộ phương trình. Kết quả cho thấy các trọng số của hệ số an toàn và chuyển vị lần lượt là 0,5995 (59,95%) và 0,4005 (40,05%). Các giá trị trọng số này đã được gán cho thuật toán TLBO để giải quyết vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu. Phân tích độ nhạy và phân tích ANOVA được thực hiện để xác định ảnh hưởng và đóng góp đáng kể của các biến thiết kế đối với các đáp ứng chất lượng. Kết quả chỉ ra rằng các thông số tối ưu được tìm thấy tại $A = 51$ mm, $B = 1$ mm, $C = 0,5$ mm, $D = 0,6674$ mm. Hơn nữa, kết quả chỉ ra rằng hệ số an toàn tối ưu là 1,558 và chuyển vị tối ưu là khoảng 2,096 mm. Nó cho thấy rằng các kết quả dự đoán là một thỏa thuận tốt với các kết quả xác nhận. Dựa trên kiểm tra thống kê phi thông số của Wilcoxon và Friedman, thuật toán tối ưu hóa kết hợp được đề xuất là tốt hơn thuật toán AEDE. Ngoài ra, đây là một cách tiếp cận hiệu quả để giải quyết vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu cho thiết kế phức tạp.

TT	Nội Dung Đăng ký	Kết quả đạt được	Mức độ hoàn thành
1	Bài báo khoa học đăng trên tạp chí toán quốc tế thuộc danh mục ISI (SCIE)	01 Bài báo Tạp chí Mathematical Problems in Engineering https://doi.org/10.1155/2019/4191924 Minh Phung Dang, Thanh-Phong Dao, Ngoc Le Chau, Hieu Giang Le , Effective Hybrid Algorithm of Taguchi Method, FEM, RSM and Teaching Learning-Based Optimization for Multi-Objective Optimization Design of a Compliant Rotary Positioning Stage for Nanoindentation Tester, Journal of Mathematical Problems in Engineering, 2019.	Đạt

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính từ Đại học SPKT TP. HCM, Việt Nam, theo mã số T2019-06TD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Z. Hu, Kevin J. Lynne, Sai P. Markondapatnaikuni, F. Delfanian, "Material elastic-plastic property characterization by nanoindentation testing coupled with computer modeling," *Mater Sci Eng A* 2013; 587: 268–282.
- [2] J. Nohava, N.X. Randall, N. Conté, "Novel ultra nanoindentation method with extremely low thermal drift: Principle and experimental results," *J. Mater. Res.*, Vol. 24, No. 3, Mar 2009.
- [3] W O'Brien, "Long-range motion with nanometer precision," *Photonics Spectra*. pp. 80–81, 2005.
- [4] L.J. Lai, Z.N. Zhu, "Design, modeling and testing of a novel flexure-based displacement amplification mechanism," *Sensors and Actuators A: Physical*. 266 (2017) 122-129.
- [5] S Polit and J Dong, "Development of a High-Bandwidth XY Nanopositioning Stage for High-Rate Micro-/Nanomanufacturing," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 16(4), pp. 724–733, 2011.
- [6] MG Song, HW Baek, NC Park, KS Park, T Yoon, YP Park, SC Lim, "Development of small sized actuator with compliant mechanism for optical image stabilization," *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 46:2369–2372, 2010.
- [7] T.-P. Dao and S.-C. Huang, "Compliant thin-walled joint based on zygoptera nonlinear geometry," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, pp. 1293-1303, 2017.
- [8] R.-F. Fung, Y.-L. Hsu, and M.-S. Huang, "System identification of a dual-stage XY precision positioning table," *Precision Engineering*, vol. 33, pp. 71-80, 2009.
- [9] T.P. Dao, et al., "Analysis and optimization of a micro-displacement sensor for compliant microgripper," *Microsystem Technologies*. 23.12 (2017) 5375-5395.
- [10] T.P. Dao and S.C. Huang, "Design and multi-objective optimization for a broad self-amplified 2-DOF monolithic mechanism," *Sādhanā*. 42 (2017) 1527-1542.
- [11] Wu-Le Zhu, Zhiwei Zhu, Ping Guo, Bing-Feng Ju, "A novel hybrid actuation mechanism based XY nanopositioning stage with totally decoupled kinematics," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 99, 15 January 2018, 747-759.
- [12] H. Kim, D. Ahn, and D. Gweon, "Development 3-degrees of freedom flexure based positioning system," *Rev. Sci. Instrum* 83, 055114 (2012).
- [13] Q. Xu, "Design of a Large-range compliant rotary micropositioning stage with angle and torque sensing," *IEEE Sensors*. 15.4 (2015) 2419-2430.
- [14] T.-P. Dao and S.-C. Huang, "Design and multi-objective optimization for a broad self-amplified 2-DOF monolithic mechanism," *Sādhanā*, vol. 42, pp. 1527-1542, 2017.
- [15] S.-C. Huang and T.-P. Dao, "Design and computational optimization of a flexure-based XY positioning platform using FEA-based response surface methodology,"

- International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 17, pp. 1035-1048, 2016.
- [16] N. L. Chau, T. P. Dao, V. T. T. Nguyen. "Optimal Design of a Dragonfly-Inspired Compliant Joint for Camera Positioning System of Nanoindentation Tester Based on a Hybrid Integration of Jaya-ANFIS," *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 (2018).
- [17] N. L. Ho, T. P. Dao, H. G. Le, N. L. Chau. "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*, 1-16, 2018.
- [18] Le Chau, V. A. Dang, H. G. Le, and T.-P. Dao, "Robust Parameter Design and Analysis of a Leaf Compliant Joint for Micropositioning Systems," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, pp. 4811-4823, 2017.
- [19] E. Burman, D. Elfverson, P. Hansbo, M. G. Larson, and K. Larsson, "Shape optimization using the cut finite element method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 328, pp. 242-261, 2018.
- [20] A. Albanesi, F. Bre, V. Fachinotti, and C. Gebhardt, "Simultaneous ply-order, ply-number and ply-drop optimization of laminate wind turbine blades using the inverse finite element method," *Composite Structures*, vol. 184, pp. 894-903, 2018.
- [21] A. Karamanlı and T. P. Vo, "Size dependent bending analysis of two directional functionally graded microbeams via a quasi-3D theory and finite element method," *Composites Part B: Engineering*, vol. 144, pp. 171-183, 2018.
- [22] T.H. Hou, C.H. Su, W.L. Liu, "Parameters optimization of a nano-particle wet milling process using the Taguchi method, response surface method and genetic algorithm," *Powder Technology*. 173 (2007) 153-162.
- [23] T.P. Dao, S.C. Huang, P. T. Thang, "Hybrid Taguchi-cuckoo search algorithm for optimization of a compliant focus positioning platform," *Applied Soft Computing*. 57 (2017): 526-538.
- [24] S.-C. Huang and T.-P. Dao, "Multi-objective Optimal Design of a 2-DOF Flexure-Based Mechanism Using Hybrid Approach of Grey-Taguchi Coupled Response Surface Methodology and Entropy Measurement," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, pp. 5215-5231, 2016.
- [25] R.V. Rao, V. Patel, "Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning-based optimization algorithm," *Applied Mathematical Modelling*. 37 (2013) 1147-1162.
- [26] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems," *Computer-Aided Design*, vol. 43, 2011, pp. 303-315.
- [27] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, "Teaching-Learning-Based Optimization:

- An optimization method for continuous non-linear large scale problems,” *Information Sciences*, 2012, pp. 1-15.
- [28] Q. Xu, "Design and testing of a novel multi-stroke micropositioning system with variable resolutions,” *Scientific Instruments*. 85 (2014) 025002.
- [29] P. Wang, Q. Xu, "Design of a flexure-based constant-force XY precision positioning stage,” *Mechanism and Machine Theory*. 108 (2017) 1-13.
- [30] W. Hua, X. Zhang, "Input coupling analysis and optimal design of a 3-DOF compliant micro-positioning stage,” *Mechanism and Machine Theory*. 43 (2008) 400-410.
- [31] E. Cuevas, J. Gálvez, S. Hinojosa, O. Avalos, D. Zaldívar, M. Pérez-Cisneros. “A comparison of evolutionary computation techniques for IIR model identification,” *Journal of Applied Mathematics*, 2014 (2014).
- [32] S. García, D. Molina, M. Lozano, F. Herrera. “A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms’ behaviour: a case study on the CEC’2005 special session on real parameter optimization,” *Journal of Heuristics*, 15(6), 617. (2009).
- [33] M. Friedman, “A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings,” *Annals of Mathematical Statistics*, (1940) 11, 86-92.
- [34] Thanh-Phong Dao, Shyh-Chour Huang, Ngoc Le Chau, “Robust parameter design for a compliant microgripper based on hybrid Taguchi-differential evolution algorithm,” *Microsystem Technologies*, DOI 10.1007/s00542-017-3534-2.
- [35] L. L. Howell, *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, Inc. United States of America, 2001.
- [36] K. Lu et al., “Technical Briefs,” vol. 127, no. November 2005, pp. 981–989, 2016.
- [37] A. H. Slocum, R. Ma, J. F. Bean, and M. L. Culpepper, “Design of an Ankle Rehabilitation Device Using Compliant,” vol. 5, no. March 2011, pp. 1–7, 2016.
- [38] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, and A. Zucchelli, “Mechanical Structures for Robotic Hands based on the ‘ Compliant Mechanism ’ Concept,” no. 1, pp. 1–8.
- [39] D. Rodríguez-Cianca, M. Weckx, D. Torricelli, J. Gonzalez, D. Lefeber, and J. L. Pons, A Compliant 2-DoF Ankle-Foot System for a Biologically Inspired Humanoid Robot, 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) November 3-5, 2015, Seoul, Korea.
- [40] J. Wei and etc., Single-Mask Fabrication of Temperature Triggered MEMS Switch for Cooling Control in SSL System, *Euroensors 2012, Procedia Engineering* 47 (2012) 849 – 852.
- [41] K. Cai, Y. Tian, X. Liu, D. Zhang, J. Shang, B. Shirinzadeh, Development and control methodologies for 2-DOF micro/nano positioning stage with high out-of-plane payload capacity, *Journal of Robotics and Computer Integrated*

- Manufacturing 56 (2019) 95–105.
- [42] E. Garcia M. Goldfarb N. Lobontiu, J. S. N. Paine, Corner-filletted flexure hinges. Transactions of the ASME, 123:346–352, 2001.
- [43] W. L. Paros M.J., “How to design flexure hinges.pdf.” pp. 151–156, 1965.
- [44] S. T. Smith, V. G. Badami, J. S. Dale, and Y. Xu, “Elliptical flexure hinges,” vol. 68, no. October 1996, pp. 1474–1483, 1997.
- [45] N. Lobontiu and E. Garcia, “Stiffness characterization of corner-filletted flexure hinges,” vol. 75, no. 11, pp. 4896–4905, 2004.
- [46] J. S. N. Paine, “Design of Circular Cross-Section Corner-Filletted Flexure Hinges for Three-Dimensional Compliant Mechanisms,” vol. 124, no. September 2002, pp. 479–484, 2016.
- [47] J. S. N. Paine and C. F. Hinges, “Corner-Filletted Flexure Hinges,” vol. 123, no. September 2001, pp. 346–352, 2016.
- [48] [43] N. Lobontiu and E. Garcia, “Analytical model of displacement amplification and stiffness optimization for a class of flexure-based compliant mechanisms,” vol. 81, pp. 2797–2810, 2003.
- [49] G. Zong S. Bi X. Pei, J. Yu. The stiffness model of leaf-type isosceles-trapezoidal flexural pivots. Journal of Mechanical Design, 130:082303, 2008.
- [50] G. Zong S. Bi Z. Yu X. Pei, J. Yu. Analysis of rotational precision for an isosceles-trapezoidal flexural pivot. Journal of Mechanical Design, 130:052302, 2008.
- [51] P. Xu, Y. Jingjun, Z. Guanghua, and B. Shusheng, “The Stiffness Model of Leaf-Type,” vol. 130, no. August 2008, pp. 1–6, 2016.
- [52] P. Xu, Y. Jingjun, Z. Guanghua, B. Shusheng, and Y. Zhiwei, “Analysis of Rotational Precision for an Isosceles-Trapezoidal Flexural Pivot,” vol. 130, no. May 2008, pp. 1–9, 2016.
- [53] E. Garcia N. Lobontiu, Analytical model of displacement amplification and stiffness optimization for a class of flexure-based compliant mechanisms, Computers & Structures, 81:2797–2810, 2003.
- [54] J. S. N. Paine N. Lobontiu, Design of circular cross-section corner-filletted flexure hinges for three-dimensional compliant mechanisms, Journal of Mechanical Design, 124:479–484, 2002.
- [55] D.I C. Handley Y. K. Yong, T. Lu. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations, Precision Engineering, 32:63–70, 2008.
- [56] E. Garcia N. Lobontiu. Static response of plannar compliant devices with small-deformation flexure hinges. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 32:459–490, 2004.
- [57] E. Garcia N. Lobontiu. Stiffness characterization of corner-filletted flexure hinges. Review of Scientific Instruments, 75:4896–4905, 2004.

- [58] J. S. N. Paine N. Lobontiu. Design of circular cross-section corner-filletted flexure hinges for three-dimensional compliant mechanisms. *Journal of Mechanical Design*, 124:479–484, 2002.
- [59] Y. Takase N. i Noda. Generalized stress intensity factors of v-shaped notch in a round bar under torsion, tension, and bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 70:1447–1466, 2003.
- [60] D. Zhang Y. Tian, B. Shirinzadeh. Closed-form compliance equations of filleted v-shaped flexure hinges for compliant mechanism design. *Precision Engineering*, 34:92–100, 2010.
- [61] Z. Li G. Chen, J. Jia. On hybrid flexure hinges. *IEEE Networking, Sensing and Control*:700–704, 2005.
- [62] Y. M. Tseytlin. Notch flexure hinges: An effective theory. *Review of Scientific Instruments*, 73:3363–3368, 2002.
- [63] Maluf, N. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. *Meas. Sci. Technol.* 2002, 13, 229.

