

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

**ĐẶNG MINH PHỤNG**

**PHÁT TRIỂN VÀ TỐI ƯU HÓA CÁC BỘ ĐỊNH VỊ SỬ DỤNG CƠ CẤU  
MỀM CHO HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ KIỂM TRA ĐỘ CỨNG VẬT LIỆU**

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Cơ Khí

Mã số chuyên ngành: 62520103

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

TP. HỒ CHÍ MINH, NĂM 2022

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Tp. HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Đào Thanh Phong

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Lê Hiếu Giang

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

STT.	Tạp chí ISI
1	<b>Minh Phung Dang, Hieu Giang Le,</b> Nguyen Thanh Duy Tran, Ngoc Le Chau, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Optimal design and analysis for a new 1-DOF compliant stage based on additive manufacturing method for testing medical specimens, Symmetry, Volume 14, Issue 6, 06/2022. (SCIE – Q2)
2	<b>Minh Phung Dang, Hieu Giang Le,</b> Minh Nhut Van, Ngoc Le Chau, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Modeling and optimization for a new compliant 02-DOF stage for locating bio-materials sample by an efficient approach of kinetostatic analysis-based method and neural network algorithm, Computational Intelligence and Neuroscience, Volume 2022, Article ID 6709464. (SCIE – Q1)
3	<b>Minh Phung Dang, Hieu Giang Le,</b> Ngoc Le Chau, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Optimization for a flexure hinge using an effective hybrid approach of fuzzy logic and moth-flame optimization algorithm, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2021, Article ID 6622655, 18 pages, Feb-2021. (SCIE – Q2)
4	<b>Minh Phung Dang, Hieu Giang Le,</b> Ngoc N. Trung Le, Ngoc Le Chau, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Multiresponse Optimization for a Novel Compliant Z-Stage by a Hybridization of Response Surface Method and Whale Optimization Algorithm, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2021, Article ID 9974230, 18 pages, ISSN 1024-123X, April 2021. (SCIE – Q2)
5	<b>Minh Phung Dang, Hieu Giang Le,</b> Ngoc Le Chau, <b>Thanh-Phong Dao</b> , A Multi-Objective Optimization Design for a New Linear Compliant Mechanism, Journal of Optimization and Engineering, 10.1007/s11081-019-09469-8, 2020. (SCIE – Q2)
6	<b>Minh Phung Dang, Thanh-Phong Dao,</b> Ngoc Le Chau, <b>Hieu Giang Le</b> , Effective Hybrid Algorithm of Taguchi Method, FEM, RSM, and Teaching Learning-Based Optimization for Multiobjective Optimization Design of a Compliant Rotary Positioning Stage for Nanoindentation Tester, Mathematical Problems in Engineering, 1563-5147, 2018. (SCIE – Q2).
7	Ngoc Le Chau, <b>Hieu Giang Le, Thanh-Phong Dao, Minh Phung Dang,</b> and Van Anh Dang, Efficient Hybrid Method of FEA-Based RSM and PSO Algorithm for Multi-Objective Optimization Design for a Compliant

STT.	Tạp chí ISI
	Rotary Joint for Upper Limb Assistive Device, Mathematical Problems in Engineering, 2587373, 2019. (SCIE – Q2).
8	Ngoc Le Chau, <b>Minh Phung Dang</b> , Chander Prakash, Dharam Buddhi, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Structural optimization of a rotary joint by hybrid method of FEM, neural-fuzzy and water cycle-moth flame algorithm for robotics and automation manufacturing, Robotics and Autonomous Systems (2022): 104199. (SCIE – Q1).
9	<b>Minh Phung Dang</b> , <b>Hieu Giang Le</b> , Thu Thi Dang Phan, Ngoc Le Chau, and <b>Thanh-Phong Dao</b> , Design and Optimization for a New XYZ Micropositioner with Embedded Displacement Sensor for Biomaterial Sample Probing Application." Sensors 22, no. 21 (2022): 8204. (SCIE – Q1).
STT.	Tạp chí Scopus
10	Duc Nam Nguyen, <b>Minh Phung Dang</b> , Shyh-Chour Huang, <b>Thanh-Phong Dao</b> , Computational optimization of a steel A-36 monolithic mechanism by bonobo algorithm and intelligent model for precision machining application, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) (2022): 1-11. (Scopus, ESCI – Q2)
11	Nguyen, Duc Nam, <b>Minh Phung Dang</b> , Tan Thang Nguyen, and <b>Thanh-Phong Dao</b> , Intelligent computation modeling and analysis of a gripper for advanced manufacturing application, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) (2022): 1-11. (Scopus, ESCI – Q2)
12	Duc Nam Nguyen, <b>Minh Phung Dang</b> , Saurav Dixit, <b>Thanh-Phong Dao</b> , A design approach of bonding head guiding platform for die to wafer hybrid bonding application using compliant mechanism, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) (2022): 1-12. (Scopus, ESCI – Q2)
STT.	Tạp chí quốc tế khác
13	<b>Minh Phung Dang</b> , <b>Thanh-Phong Dao</b> , <b>Hieu Giang Le</b> , Ngoc Thoai Tran, Development and analysis for a New Compliant XY Micropositioning Stage applied for Nanoindentation Tester System, Applied Mechanics and Materials, 1662-7482, Vol. 894, pp 60-71, 2019.
STT.	Hội nghị trong nước/quốc tế

STT.	Tạp chí ISI
14	<b>Minh Phung Dang, Thanh-Phong Dao, Hieu Giang Le</b> , Optimal Design of a New Compliant XY Micropositioning Stage for Nanoindentation Tester Using Efficient Approach of Taguchi Method, Response Surface Method and NSGA-II, 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), IEEE, 2018.
15	Nhat Linh Ho, <b>Thanh-Phong Dao, Minh Phung Dang, Hieu Giang Le</b> , Tan Thang Nguyen, Manh Tuan Bui, Design and Analysis of a Displacement Sensor-Integrated Compliant Micro-gripper Based on Parallel Structure, The first International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development, Da Nang, Vietnam, 978-604-95-0502-7.
16	<b>Minh Phung Dang</b> , Nhat Linh Ho, Ngoc Le Chau, <b>Thanh Phong Dao, Hieu Giang Le</b> , A hybrid mechanism based on beetle-liked structure and multi-lever amplification for a compliant micropositioning platform, The Xth National Mechanics Conference, Ha Noi, Vietnam, 978-604-913-719-8, 2017.

## TÓM TẮT

Luận án này phát triển và tối ưu hóa khớp mềm, bàn định vị một bậc tự do (DOF), bàn định vị XY và bàn định vị xoay ứng dụng trong thiết bị kiểm tra cơ tính vật liệu ở mức nanomet (Nanoindentation device). Giai đoạn đầu, khớp mềm được đánh giá và tối ưu bằng phương pháp Taguchi (TM), đáp ứng bề mặt (response surface methodology-RSM), giải thuật mờ (fuzzy logic), và giải thuật tối ưu con bướm đêm (Moth-Flame optimizer). Kết quả đạt được góc lệch tâm quay là  $10.94 \cdot 10^{-5}$  mm, hệ số an toàn là 2.99 và biến dạng góc là  $52.006 \cdot 10^{-3}$  rad. Khớp elíp được chọn để tích hợp vào các bàn định vị.

Giai đoạn hai, ba thiết kế mới của bàn định vị 1-DOF được phát triển cho dẫn hướng đầu đâm (indenter). Giải thuật mờ thích nghi (ANFIS) được kết hợp với giải thuật tối ưu dạy học (teaching learning-based optimization - TLBO) để tìm thiết kế tối ưu cho bàn định vị thứ nhất. Phương pháp Taguchi được tích hợp với RSM, phương pháp tính trọng số và thuật toán đàn cá heo (Whale algorithm) để xử lý bộ định vị thứ hai. Phương pháp giả cứng (pseudo-rigid-body model-PRNM) and Lagrange kết hợp với giải thuật con đom đóm (Firefly algorithm) nhằm tối ưu tần số cộng hưởng của bàn định vị thứ 3. Kết quả đạt được của bàn định vị thứ nhất gồm hệ số an toàn là 1.5141 và chuyển vị là 2.4065 mm. Bàn định vị thứ hai có chuyển vị 436.04  $\mu\text{m}$  và hệ số an toàn 2.224. Bàn định vị thứ 3 có tần số riêng là 176.957 Hz.

Cuối cùng, hai bàn định vị 2-DOF và bàn định vị xoay được phát triển cho định vị mẫu vật liệu. Sự kết hợp của TM, RSM và giải thuật di truyền đa mục tiêu (nondominated sorting genetic algorithm II-NSGA-II) được đề xuất cho bàn định vị XY thứ nhất. Thuật toán dựa trên trí tuệ nhân tạo (neural network algorithm – NNA) được xây dựng cho bàn định vị XY thứ hai. Bên cạnh đó, giải thuật kết hợp TM, RSM, tính trọng số và TLBO được phát triển cho bàn định vị xoay. Kết quả đạt được của bàn XY thứ nhất gồm chuyển vị là 3.862 mm and tần số riêng là 45.983 Hz. Bàn XY thứ hai có tần số riêng là 112.0995 Hz. Bàn định vị xoay có hệ số an toàn là 1.558 và chuyển vị là 2.096 mm.

# CHƯƠNG 1 MỞ ĐẦU

## 1.1 Bối cảnh và động cơ nghiên cứu

Thiết bị kiểm tra cơ tính vật liệu (nanoindentation) là phương pháp kiểm tra tính chất vật liệu mẫu có kích cỡ nhỏ. Đây là kỹ thuật chuẩn để kiểm tra tấm mỏng hoặc vật liệu kích cỡ nhỏ [1]. Bởi dùng cơ cấu mềm (compliant mechanism) [2,3], Huang et al. đã phát triển bàn định vị mẫu có hành trình là 12  $\mu\text{m}$  and bàn dẫn đầu đâm là 40  $\mu\text{m}$  [4]. Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ dừng ở bàn 1-DOF. Một thiết bị đo hoàn chỉnh nên bao gồm bàn dẫn đầu đâm và bàn định vị mẫu. Bên cạnh đó, các bàn định vị trước có tần số riêng nhỏ làm giảm tốc độ của thiết bị. Do kích thước của bàn định trong nghiên cứu trước còn khá lớn, nên chúng khó gắn vào trong thiết bị kiểm tra vừa quan sát được quá trình (in-situ

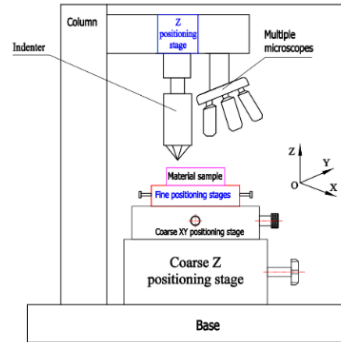


Fig. 1.5. Mô hình thiết bị nanoindentation được đề xuất

nanoindentation) trong máy TEM hoặc SEM. Do vậy, một thiết kế mới có tần số riêng cao là được yêu cầu. Qua hai thập kỷ, đã có một thiết bị quan sát in-situ để kiểm tra tính chất cơ điện của mẫu [5]. Tuy nhiên, chưa tìm thấy một nghiên cứu hoàn chỉnh các bộ định vị cho thiết bị nanoindentation, đặc biệt thiết bị kiểm tra cơ tính vật liệu y sinh là chưa có. Nghiên cứu trước đây vẫn có hạn chế ở hành trình nhỏ, có sai số chuyển động theo cao và tần số riêng nhỏ. Để phát triển một thiết bị mới, luận án này đề xuất “*Phát triển và tối ưu hóa các bộ định vị sử dụng cơ cấu mềm cho hệ thống định vị kiểm tra độ cứng vật liệu*”.

## 1.2 Thiết bị kiểm tra độ cứng đề xuất

Mục đích của luận án này là phát triển các bàn định vị cho thiết bị kiểm tra độ cứng nanoindentation. Các đối tượng nghiên cứu bao gồm: (i) Khớp mềm, (ii) 01-bàn định vị 1-DOF cho dẫn hướng đầu đâm, (iii) bàn định vị 2-DOF và xoay cho định vị mẫu.

### **1.3 Mục tiêu của luận án**

Mục tiêu của luận án bao gồm:

- Phân tích, đánh giá và lựa chọn tối ưu một khớp mềm có nhiều tính năng tốt cho bàn dẫn đầu đằm và bàn định vị mẫu.
- Phát triển bàn định vị 1-DOF, 2-DOF và bàn xoay.
- Thiết lập mô hình toán phân tích tĩnh học và động lực học cho các bàn định vị.
- Mô phỏng ứng xử của các bàn định vị dùng phương pháp số.
- Phát triển các giải thuật tối ưu mới nhằm cải thiện chất lượng khớp và bàn định vị.
- Thực nghiệm và so sánh với các kết quả lý thuyết.

### **1.4 Phạm vi của luận án**

Phạm vi nghiên cứu của luận án bao gồm:

- Phát triển một phương pháp tính toán mới nhằm đạt được một khớp mềm có nhiều ưu điểm tốt.
- Phát triển các bàn định vị 1-DOF, 2-DOF, bàn xoay bị động.
- Phát triển các bộ khuếch đại hành trình mới.
- Phát triển các giải thuật tối ưu mới nhằm cải thiện chức năng làm việc của khớp và các bàn định vị cho thiết bị kiểm tra độ cứng.

### **1.5 Phương pháp nghiên cứu**

Phương pháp nghiên cứu của luận án bao gồm:

- Sử dụng lý thuyết cơ sở của cơ cấu mềm.
- Sử dụng phương pháp giả cứng PRBM, phương pháp tĩnh động học và Lagrang để thiết lập các phương trình tĩnh học, động lực học và tĩnh động học của các bàn định vị.
- Phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng cho mô phỏng ứng xử khớp và bàn định vị.
- Các giải thuật tối ưu mới được phát triển để cải thiện thực hiện khớp và bàn định vị.



## **1.6 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án**

### **1.6.1 Ý nghĩa khoa học**

Ý nghĩa khoa học của luận án bao gồm:

- Phát triển được một phương pháp tính toán mới nhằm tìm được một khớp mềm tối ưu.
- Phát triển được kết cấu mới cho bộ khuếch đại và các bàn định vị.
- Phát triển được các phương pháp giả cứng PRBM, phương pháp tĩnh động học và Lagrang để thiết lập các phương trình tĩnh học, động lực học và tĩnh động học của các bàn định vị.
- Phát triển được các giải thuật tối ưu mới hiệu quả trong kỹ thuật.
- Cung cấp cơ sở kiến thức cho kỹ thuật và tối ưu thiết kế.

### **1.6.2 Ý nghĩa thực tiễn**

Ý nghĩa thực tiễn của luận án bao gồm:

- Các bộ định vị mở ra hướng ứng dụng phát triển thiết bị kiểm tra cơ tính vật liệu nanoindentation.
- Giá thành của các bộ định vị giảm và có nhiều ưu điểm như không khớp động học, không ma sát và giảm lắp ráp..

## **1.7 Đóng góp mới của luận án**

Đóng góp mới của luận án bao gồm:

- (i) Phát triển được một phương pháp lai giữa TM, fuzzy logic, response surface method, and Moth flame optimization để chọn được khớp elíp.
- (ii) Ba bàn định vị 1-DOF cho dẫn đầu đũa được phát triển.
  - Bàn 1-DOF thứ nhất được cải tiến bởi kết hợp ANFIS và TLBO.
  - Bàn 1-DOF thứ hai có bộ khuếch đại mới lai giữa cơ cấu đòn bẩy và cơ cấu song song. Phương pháp tính trọng số được kết hợp Whale optimization algorithm để tìm thiết kế tốt nhất.
  - Bàn 1-DOF thứ ba được phát triển mới và phân tích bởi PRBM and Lagrange. Thiết kế tốt nhất được tìm thấy bởi Firefly algorithm.
- (iii) Ba bàn định vị cho mẫu được phát triển .

- Bàn định vị 2-DOF được thiết kế mới theo kiểu zigzag. Phương pháp TM, RSM, NSGA-II được kết hợp hiệu quả trong tìm thông số tốt nhất .
- Bàn định vị 2-DOF thứ hai được thiết kế kết hợp cơ cấu đòn bẩy và song song. Phương pháp phân tích tinh động học kết hợp Lagrange nhằm xây dựng phương trình động lực học. Giải thuật NNA được dùng để tìm thiết kế tốt nhất.
- Bàn định vị xoay được phát triển mới theo kiểu con bọ. Phương pháp TM, RSM, trọng số và TLBO algorithm được phát triển để cải tiến thực hiện.

## **1.8 Cấu trúc cầu luận án**

Chương 1 trình bày bối cảnh và động cơ nghiên cứu. Chương 2 trình bày tổng quan và cơ sở lý thuyết. Chương 3 phát triển khớp mềm. Chương 4 phát triển bàn 1-DOF cho dẫn đầu đâm. Chương 5 phát triển bàn 2-DOF cho định vị mẫu. Chương 6 kết luận và hướng phát triển đề tài.

## **CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN VÀ LÝ THUYẾT CƠ SỞ**

### **2.1 Cơ cấu mềm**

#### **2.1.1 Cơ cấu mềm và ứng dụng**

#### **2.1.2 Khớp mềm**

Các loại khớp mềm phổ biến như khớp tròn (circular hinge) [6], khớp bo góc (corner-rounded flexure hinge) [7], khớp hình V (V shape flexure hinges) [8], Khớp elíp (elliptical flexure hinge) [9], khớp bậc cao (parabolic flexure hinge, hyperbolic flexure hinge) [10]. Mỗi khớp có ưu điểm riêng phụ thuộc ứng dụng.

#### **2.1.3 Bộ truyền động**

### **2.2 Nghiên cứu trước đây về bàn định vị**

Bàn định vị mềm [11] được chia theo dạng chuỗi, song song và kiểu kết hợp cả hai. Bàn định vị nhiều bậc tự do đã được phát triển cho ứng dụng micro [12].

### **2.2.1 Thiết kế chuỗi**

### **2.2.2 Thiết kế song song**

### **2.2.3 Thiết kế kết hợp chuỗi và song song**

Thiết kế chuỗi kết hợp song song được ứng dụng nhiều cho bàn nhiều bậc tự do [13,14]. Bởi có ưu điểm kết cấu đơn giản, ổn định cao, sai số nhỏ, thực hiện động học cao, thiết kế này thường được chọn. Tang và cộng sự [15] đã đề xuất bàn XYZ dựa trên thiết kế này.

## **2.3 Cơ cấu khuếch đại**

Các bộ khuếch đại phổ biến: Đòn bẩy [16–18], Scott-Russell [19–22], cơ cấu 04 thanh [23,24], cơ cấu đôi rocker và song song [25], cơ cấu cầu [26,27], hình thoi [28] cơ cấu mềm phân bố đều [29].

## **2.4 Phân tích thiết bị kiểm tra độ cứng**

Thiết bị kiểm tra độ cứng nanoindentation [30] được ứng dụng kiểm tra độ cứng vật liệu. Nghiên cứu trước đây đã phát triển nhưng có chuyển vị nhỏ [2,4,31].

## **2.5 Phương pháp mô hình hóa cơ cấu mềm**

Nhiều phương pháp giải tích [32] đã đề xuất như PRBM [33,34], ma trận [35], lý thuyết thanh đàn hồi [36], mô hình động học [37], Ryu's [38], mô hình ràng buộc thanh [39]. Chi tiết hơn về phương pháp giải tích [32].

- 2.5.1 Phương pháp giả cứng**
- 2.5.2 Phương pháp Lagrange**
- 2.5.3 Phương pháp xấp xỉ**
- 2.5.3.1 Phương pháp đáp ứng bề mặt**
- 2.5.3.2 Phương pháp mờ thích nghi**
- 2.6 Phương pháp thống kê**
- 2.6.1 Phân tích phương sai (ANOVA)**
- 2.6.2 Phương pháp Wilcoxon Friedman**
- 2.7 Optimization methodologies**
- 2.7.1 Các thuật toán không dựa trên di truyền**

Các thuật toán không dựa trên di truyền bao gồm các thuật toán dựa trên xây dựng toán học (gradient descent và phương pháp Newton) và phương pháp thống kê (đáp ứng bề mặt và phân tích xám).

### **2.7.1 Thuật toán di truyền**

Có nhiều thuật toán dựa trên di truyền đã được phát triển bao gồm PSO cho thiết kế bộ định vị [40], thuật toán GA [41], thuật toán DE [42] và thuật toán PSO cho dự đoán lỗi cấu trúc [43]. Để tăng hiệu quả và giảm thời gian tính toán, trong luận án này, các phương pháp tiếp cận tích hợp bao gồm phương pháp Taguchi, phương pháp đáp ứng bề mặt, logic mờ, kỹ thuật tính toán trọng số, ANFIS, thuật toán dựa trên quá trình dạy và học TLBO [44], thuật toán con bóm đêm [45], thuật toán con cá heo WOA [46], thuật toán ngọn lửa MFO [47], thuật toán dựa trên trí tuệ nhân tạo NNA [48] được đề xuất để tối ưu hoá thông số thiết kế chính của bộ định vị.

## **2.8 Kết luận**

Chương này cung cấp các phương pháp giải tích và các thuật toán tối ưu của cơ sở lý liên quan đến nội dung luận án.

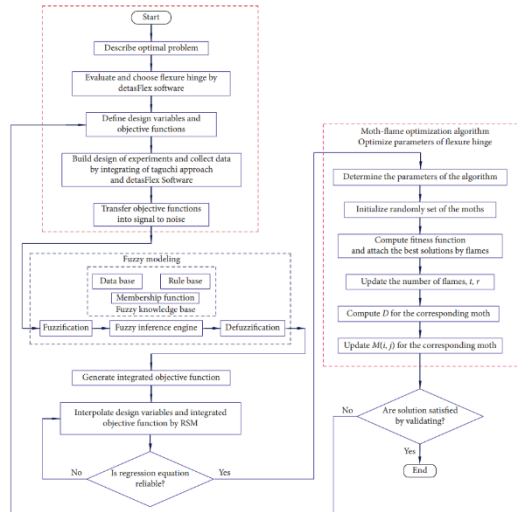
# CHƯƠNG 3 PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ VÀ LỰA CHỌN KHỚP MỀM CHO CÁC BỘ ĐỊNH VỊ MỀM

## 3.1 Cơ sở và động lực nghiên cứu

## 3.2 Các yêu cầu kỹ thuật của khớp mềm cho thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu

## 3.3 Phương pháp tối ưu hoá đề xuất

The hình 3.1, lưu đồ minh họa một cách tiếp cận tối ưu hóa hiệu quả mới được tích hợp bằng phương pháp Taguchi, suy luận logic mờ, phương pháp đáp ứng bề mặt và thuật toán MFO [49].



Hình 3.1. Lưu đồ giải thuật cho phương pháp tối ưu hóa tích hợp được đề xuất

## 3.4 Kết quả và thảo luận

### 3.4.1 Assessment and collection for flexure joint

Như trong Bảng. 3.2, khớp elip được lựa chọn là khớp mềm phù hợp để tích hợp vào các bộ định vị trong hệ thống định vị của thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu đề xuất.

Bảng 3.1 Thông số kỹ thuật của bốn khớp mềm

Các khớp mềm	Thông số hình học (mm)	Góc xoay đầu vào	Độ lệch tâm trục xoay ( $v$ ) (mm)	Hệ số an toàn ( $SF$ )	Độ lệch góc xoay lớn nhất ( $\varphi$ ) (rad)
Khớp cầu phải	$H=10, h=0.5, L_1=10, L_2=10, l=9.987, w=5$	$(1^\circ)$	$7.2113e-05$	2.11	0.037
Khớp lá	$H= 10, h= 0.5, L_1= 10, L_2= 10, l=10, w= 5$	$(1^\circ)$	$0.00022379$	0.1	0.176
Khớp elip	$H=10, h= 0.5, L_1= 10, L_2=10, l=10, w= 5, r_x= 5, r_y= 2.5$	$(1^\circ)$	$9.7633e-05$	2.95	0.052

Khớp hàm mũ 1 (n= 2)	$H=10, h= 0.5, L_l= 10,$ $L_2=10, l=10, w= 5$	$(1^0)$	5.486e-05	1.55	0.027
----------------------------	--	---------	-----------	------	-------

### 3.4.2 Tối ưu hoá thiết kế khớp mềm

Ba thông số hình học của khớp mềm elip bao gồm bề dày khớp ( $h$ ), bán kính trục x ( $r_x$ ) và bán kính trục y ( $r_y$ ) được chọn làm biến số thiết kế [50]. Do đó, Để cải thiện các đặc tính quan trọng đầu ra của khớp mềm elip, các yếu tố hình học chính của khớp mềm nên được tối ưu hóa.

#### 3.4.2.1 Các biến thiết kế

Các yêu cầu giới hạn đối với các biến thiết kế được hình thành dựa trên kiến thức chuyên môn, khả năng gia công và kinh nghiệm của kỹ sư thiết kế cơ khí, được nêu ra bởi phương trình:

$$0.4 \text{ mm} \leq h \leq 0.6 \text{ mm}; 4 \text{ mm} \leq r_x \leq 6 \text{ mm}; 2 \text{ mm} \leq r_y \leq 3 \text{ mm} \quad (3.15)$$

trong đó  $h$ ,  $r_x$ , and  $r_y$  lần lượt là độ dày của khớp mềm elip, bán kính trục x và bán kính trục y.

#### 3.4.2.2 Các hàm mục tiêu

Trong chương này, ba mục tiêu chất lượng của khớp elip được xem xét như: (i) Độ lệch tâm trục quay nhỏ, được yêu cầu để đảm bảo độ chính xác của vị trí. (ii) Hệ số an toàn cao, được kỳ vọng sẽ đảm bảo độ bền của bản lề uốn. (iii) Độ lệch góc xoay, mong muốn càng lớn càng tốt để tăng khả năng vận hành của hành trình làm việc của khớp. Do đó, bài toán tối ưu hóa được minh họa như sau:

$$\text{Tìm } \mathbf{x} = [h, r_x, r_y]^T$$

$$\text{Min } y_1(\mathbf{x}), \quad (3.16)$$

$$\text{Max } y_2(\mathbf{x}), \quad (3.17)$$

$$\text{Max } y_3(\mathbf{x}). \quad (3.18)$$

Bài toán tối ưu cho hàm mục tiêu tích hợp được xác định là:

$$\text{Max } Z(\mathbf{x}). \quad (3.19)$$

### 3.4.2.3 Ràng buộc

Khớp elip hoạt động dưới một giới hạn đàn hồi của vật liệu được đề xuất, được thể hiện bằng phương trình sau:

$$g(x) = \sigma \leq \frac{\sigma_y}{S_F}, \quad (3.20)$$

trong đó  $\sigma_y$  là giới hạn bền cho phép của vật liệu AL7075 và  $S_F$  là hệ số an toàn. Độ lệch tâm trục xoay mong muốn nhỏ hơn 0,00012.

$$y_1(x) \leq 0.00012, \quad (3.21)$$

Hệ số an toàn được yêu cầu cao hơn 2.

$$y_2(x) \geq 2, \quad (3.22)$$

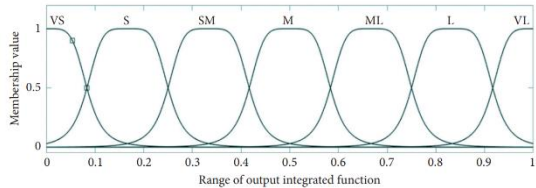
Độ lệch góc xoay được mong muốn lớn hơn 0,05 rad.

$$y_3(x) \geq 0.05, \quad (3.23)$$

### 3.4.3 Cơ sở thiết kế thí nghiệm và tính toán tỷ lệ S/N

#### 3.4.4 Thành lập mô hình mờ

Hình 3.5. Hàm thuộc cho hàm đầu ra tích hợp đầu ra.



#### 3.4.5 Thiết lập phương trình hồi quy

#### 3.4.6 Thực thi tối ưu hóa

Các biến thiết kế tối ưu được tìm ra là  $h=0.6$  mm,  $r_x=6$  mm,  $r_y=3$  mm, và  $Z=2.7614$  tương ứng với  $y_1=0.00010944$  mm,  $y_2=2.99349$  và  $y_3=0.0520058$  rad.

#### 3.4.7 Xác nhận

Sai số giữa kết quả tối ưu và kết quả xác nhận khoảng 5%.

#### 3.4.8 So sánh với các phương pháp khác nhau

Kết quả đạt được chỉ ra rằng phương pháp tích hợp tốt hơn thuật toán ASO [50].

### 3.5 Kết luận

Chương này đề xuất một phương pháp tối ưu hóa tích hợp hiệu quả cho khớp mềm elip.

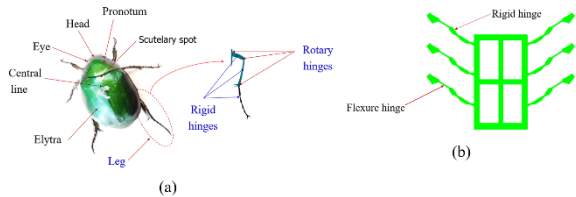
# CHƯƠNG 4 PHÁT TRIỂN CÁC BỘ ĐỊNH VỊ MỀM 01 BẬC TỰ DO DẪN HƯỚNG CHO ĐẦU ĐÂM VẬT LIỆU

## 4.1 Động lực nghiên cứu

## 4.2 Phát triển và tối ưu hóa bộ định vị 01 bậc tự do lấy cảm hứng từ con bọ cánh cứng

### 4.2.1 Thiết kế khái niệm

#### 4.2.1.1 Bộ định vị mềm



Hình. 4.1. Cấu trúc của bộ định vị dựa trên biên dạng cơ bọ cánh cứng: (a) Các thành phần của bộ định vị cứng, (b) Bộ định vị mềm.

Lấy cảm hứng từ ứng xử cơ sinh học của con bọ cánh cứng, một bộ định vị 01 bậc tự do mềm mới đã được thiết kế để đạt được mức dịch chuyển đầu ra tốt cũng như giảm chuyển động theo, được chỉ ra trong hình 4.1. (a) and (b). Biên dạng hình học này có thể được sử dụng cho việc tạo ra một cấu trúc để tạo ra chuyển động tuyến tính. Do đó mô hình 05 đoạn của bộ định vị đề xuất được tạo ra, như được minh họa trong hình 4.1.

#### 4.2.1.2 Cơ cấu khuếch đại chuyển vị

#### 4.2.1.3 Cơ cấu bộ định vị dựa trên biên dạng chân con bọ tích hợp cơ cấu khuếch đại

Bộ khuếch đại được sử dụng để tăng cường độ dịch chuyển của bộ định vị.

## 4.2.2 Ứng dụng cơ bản của thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu

### 4.2.3. Phân tích sai số chuyển động theo và đặc tính ban đầu của bộ định vị

### 4.2.4. Phương pháp tối ưu hóa được đề xuất

#### 4.2.4.1. Tuyên bố về vấn đề tối ưu hóa

Bộ định vị 01 bậc phải đáp ứng các đặc tính chất lượng như sau: (a) Chuyển động theo nhỏ để tăng độ chính xác điều khiển vị trí; (b) Dịch chuyển đầu ra lớn để mở rộng hành trình làm việc; (c) Hệ số an toàn cao để đảm bảo độ bền của kết cấu



#### 4.2.4.2. Các biến thiết kế

Véc tơ của các biến thiết kế được mô tả như  $\mathbf{X} = [t, h, b, k]^T$ . Các điều kiện giới hạn cho các biến thiết kế được thiết lập dựa trên kiến thức chuyên môn và kinh nghiệm của kỹ sư thiết kế, được thể hiện bằng:

$$\begin{aligned} 48 \text{ mm} \leq b \leq 53 \text{ mm}; & \quad 19 \text{ mm} \leq h \leq 22.5 \text{ mm}, \\ 0.9 \text{ mm} \leq t \leq 1.1 \text{ mm}; & \quad 0.67 \text{ mm} \leq k \leq 0.74 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.4)$$

#### 4.2.4.3. Các hàm mục tiêu

Cuối cùng, vấn đề tối ưu hóa được trình bày như sau:

Các biến thiết kế được xem xét như  $\mathbf{X} = [t, h, b, k]^T$ .

$$\text{Max } y_1(x) \quad (4.5)$$

$$\text{Max } y_2(x) \quad (4.6)$$

Hàm mục tiêu tích hợp được xác định như sau:

$$y(x) = -w_1 \times y_1(x) - w_2 \times y_2(x), \quad (4.7)$$

trong đó  $w_1$  và  $w_2$  lần lượt là hệ số trọng số của hai đáp ứng chất lượng.

#### 4.2.4.4. Ràng buộc

Hệ số an toàn được mong đợi lớn hơn 1,5:

$$y_1(x) \geq 1.5. \quad (4.9)$$

Chuyển vị đầu ra được mong muốn là hơn 2,3 mm:

$$y_2(x) \geq 2.3 \text{ mm}. \quad (4.10)$$

#### 4.2.4.5. Phương pháp kết hợp đề xuất

Hình 4.7 chỉ ra lưu đồ giải thuật tối ưu hóa đa mục tiêu cho bộ định vị 01 bậc tự do [51].

#### 4.2.5. Kết quả và thảo luận

##### 4.2.5.1. Gathering of numeric data

##### 4.2.5.2. Tính toán trọng số

Chương này áp dụng một phương pháp hiệu quả để xác định các trọng số  $w_1 = 0.4416$  và  $w_2 = 0.5584$ .

##### 4.2.5.3. Thành lập mô hình ANFIS

Cấu trúc tối ưu ANFIS được tìm thấy ở số lượng MF đầu vào là 4, trapmf, phương pháp học lai và các MF đầu ra tuyến tính.

##### 4.2.5.4. Kết quả tối ưu

Kết quả tối ưu tìm được ứng với  $t = 0.9$  mm,  $h = 19$  mm,  $b = 53$  mm,  $k = 0.67$  mm,  $y_1 = 1.514097$  và  $y_2 = 2.406501242$  mm.

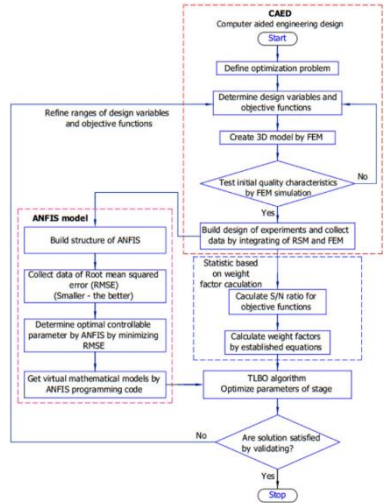
##### 4.2.5.5. Phân tích độ nhạy

##### 4.2.5.6. Thí nghiệm và xác nhận

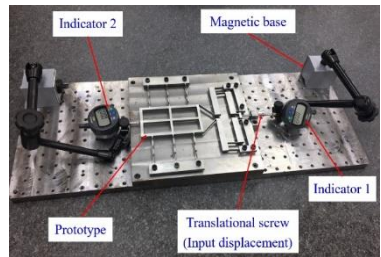
Hình 4.18 mô tả kết nối đầu vào - đầu ra của FEA và kết quả thực nghiệm. Chuyển vị đầu ra theo phương y đạt được là 2,427 mm và hệ số an toàn tối thiểu là 1,526. Sai số giữa kết quả dự đoán và kết quả tối ưu là nhỏ.

##### 4.2.6. Kết quả đạt được

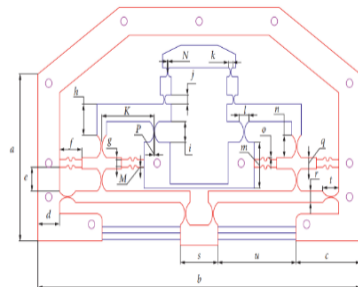
Sai số giữa kết quả tối ưu và xác nhận FEA đối với hệ số an toàn và độ dịch



Hình. 4.7 Lưu đồ giải thuật tối ưu hóa cho bộ định vị 01 bậc tự do



Hình 4.18. Mô hình thiết lập thí nghiệm



Hình 4.21. Các thông số chính bộ định vị 01 bậc tự do

chuyển đầu ra lần lượt là 0,786% và 0,824%. Sai số giữa kết quả thí nghiệm và kết quả dự báo là khoảng 7,581%.

### 4.3. Phát triển bàn định vị Z dùng kiểu chuỗi-song song

#### 4.3.1. Thiết kế

Bàn 1-DOF mô tả trong hình 4.21.

#### 4.3.2. Phương pháp nghiên cứu

##### 4.3.2.1. Bài toán tối ưu

Bài toán tối ưu theo sau.

Biến thiết kế:  $X=[M,N,P,K]$

Cực đại  $F_1(X)$ :

$$F_1(M, N, P, K), \quad (4.20)$$

Cực đại  $F_2(X)$ :

$$F_2(M, N, P, K), \quad (4.21)$$

Ràng buộc:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_y}{n}, \quad (4.22)$$

$$\begin{cases} 0.55\text{mm} \leq M \leq 0.65 \text{ mm}; 0.6 \text{ mm} \leq N \leq 0.9 \text{ mm} \\ 0.9 \text{ mm} \leq P \leq 1.1 \text{ mm}; 49 \text{ mm} \leq K \leq 53 \text{ mm} \end{cases}, \quad (4.23)$$

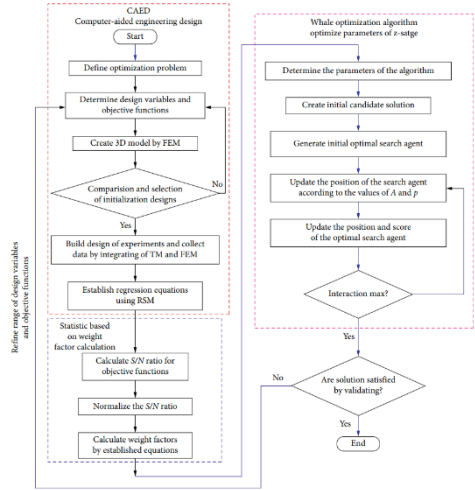
##### 4.3.2.2. Phương pháp nghiên cứu lai

Phương pháp lai gồm TM, the RSM, trọng số and WOA [52], Hình 4.22 mô tả lưu đồ phương pháp [53].

#### 4.3.3. Kết quả và thảo luận

##### 4.3.3.1. Đánh giá ban đầu và sai số chuyển động theo

##### 4.3.3.2. Thí nghiệm và mô hình toán học



Hình. 4.22. Phương pháp nghiên cứu

### 4.3.3.3 Phân tích nhạy

### 4.3.3.4 Tính trọng số

Trọng số cho hàm mục tiêu:  $F_1= 0.5150$  và  $F_2= 0.485$ , respectively.

### 4.3.3.5 Kết quả tối ưu và kiểm chứng

Kết quả đạt:  $F_1= 2.3824568$  và  $F_2= 454.551127 \mu\text{m}$ .

### 4.3.3.6 Phân tích động học

### 4.3.3.7 Phân tích thống kê

Cuckoo search algorithm (CSA) [54] được so sánh với phương pháp đề xuất dùng kiểm định phi thông số Wilcoxon và Friedman. Kết quả tìm thấy phương pháp đề xuất tốt hơn CSA.

### 4.3.3.8 Kiểm chứng

Bảng 4.35 Bàn Z tốt hơn nghiên cứu trước.

Bảng 4.35 So sánh bàn Z với nghiên cứu trước

Nghiên cứu	Kích thước	Chuyển vị
Hu Huang et al. [2]	103mm×74mm×60mm	11.44 $\mu\text{m}$
Hu Huang et al. [4]	200mm×135mm×200mm	40 $\mu\text{m}$
Bàn Z đề xuất	30mm×162 mm×16mm	454 $\mu\text{m}$

### 4.3.4. Kết quả

## 4.4. Mô hình động lực học dùng PRBM and Lagrange

### 4.4.1. Thiết kế

Bàn 1-DOF thứ ba bao gồm: (i) Chuyển vị lớn hơn 420  $\mu\text{m}$ ; (ii) chuyển động theo nhỏ hơn 0.04; (iii) hệ số an toàn lớn hơn 1.8; (iv) tần số riêng thứ nhất lớn hơn 20 Hz (hình. 4.29).

### 4.4.2. Phương pháp nghiên cứu

Hình 4.30 là lưu đồ phương pháp dùng Firefly algorithm [47] để cực đại tần số.

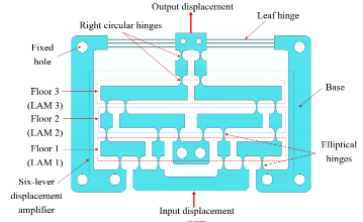
#### 4.4.2.1 Thuật toán Firefly

#### 4.4.2.2. Mô hình động lực học dùng PRBM method và Lagrange

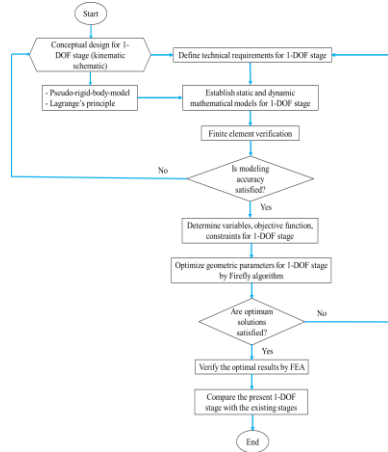
Hình 4.29 and 4.32 chỉ ra chuyển vị đầu vào LAM #1, LAM #2 và chuyển vị đầu ra  $d_{in}$ ,  $d_{outC}$  and  $d_{outJ}$  và  $d_{out}$ . The output displacement of LAM #1 and LAM #2 là chuyển vị đầu vào của LAM #3. Phương trình động lực học (4.37-4.62). Tần số riêng thứ nhất:

$$f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\bar{K}}{\bar{M}} \right)^{0.5} \tag{4.62}$$

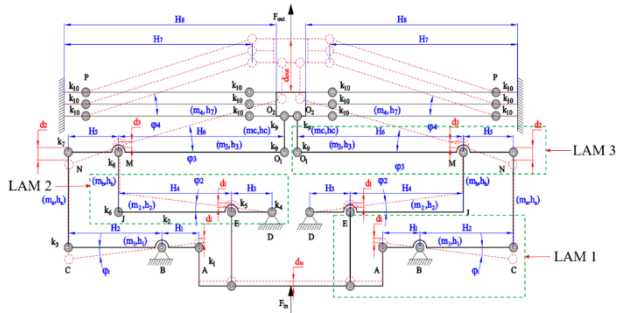
which has the unit of Hertz.



Hình. 4.29. Thông số chính



Hình 4.30. Phương pháp



### 4.4.3. Kiểm chứng mô hình toán

Sai số lý thuyết và mô phỏng tần số riêng thứ nhất là 7.59%.

### 4.4.4. Tối ưu thông số

Bài toán tối ưu:

$$\text{Biên thiết kế: } \mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]$$

$$\text{Cực đại } f(\mathbf{x}) \tag{4.63}$$

Ràng buộc:

$$f(\mathbf{x}) > 200 \text{ Hz} \tag{4.64}$$

Biên thiết kế (unit: mm):

$$\begin{cases} 0.65 \leq x_1 \leq 0.75; 0.5 \leq x_2 \leq 0.7 \\ 0.5 \leq x_3 \leq 0.65; 0.5 \leq x_4 \leq 0.6 \end{cases} \tag{4.65}$$

Tần số đạt 226.8458 Hz.

### 4.4.5. Kiểm chứng FEA

Phương pháp đề xuất so với (DE) [54] và NNA [55]. Bảng 4.41 tìm thấy tần số của bàn đề xuất tốt hơn các nghiên cứu trước.

Bảng 4.41 So sánh bàn đề xuất với nghiên cứu trước

Nghiên cứu	Kích thước	Tần số (Hz)
Xu [56]	100 mm × 100 mm x 10 mm	91.97
Li and Tian [57]	NA	192.00
Chau et al. [58]	120 mm x 50 mm x 10 mm	79.517
Thiết kế đề xuất	171 mm x 108 mm x 10 mm	250.01

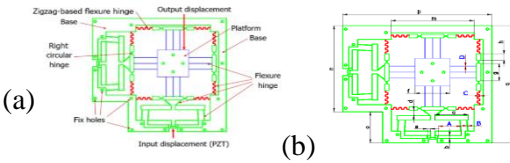
### 4.4.6. Kết quả

## 4.5. Kết luận

Chương này đã phát triển bàn 1-DOF cho đầu đâm indenter.

# CHƯƠNG 5 PHÁT TRIỂN BÀN ĐỊNH VỊ CHO ĐỊNH VỊ MẪU VẬT LIỆU

## 5.1 Động cơ nghiên cứu



Hình 5.3. Mô hình: (a) bàn XY, (b) thiết kế

## 5.2 Phát triển và tối ưu bàn định vị XY

### 5.2.1. Thiết kế

Hình 5.3 (a, b) minh họa bàn định vị XY.

#### 5.2.1.1. Cơ cấu khuếch đại lại

#### 5.2.1.2. Bàn định vị XY

#### 5.2.2. Thành lập bài toán tối ưu

Bài toán tối ưu thiết kế bàn XY như sau.

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

Cực đại  $F_1(A, B, C, D)$ ,

Cực đại  $F_2(A, B, C, D)$ ,

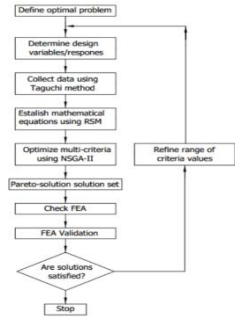
Ràng buộc:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_y}{SF}, \tag{5.5}$$

$$\begin{cases} 51 \text{ mm} \leq A \leq 54 \text{ mm}; 0.9 \text{ mm} \leq B \leq 1.1 \text{ mm} \\ 0.5 \text{ mm} \leq C \leq 0.7 \text{ mm}; 0.5 \text{ mm} \leq D \leq 0.7 \text{ mm} \end{cases} \tag{5.6}$$

### 5.2.3. Phương pháp nghiên cứu

Hình 5.4. mô tả lưu đồ phương pháp nghiên cứu [59].



Hình. 5.4. Lưu đồ phương pháp nghiên cứu [59].

## 5.2.4. Kết quả và thảo luận

### 5.2.4.1 Thí nghiệm và mô hình hóa ứng xử

### 5.2.4.2 Tối ưu thông số dùng TM, RSM and NSGA-II

Kết quả tối ưu:  $A = 54 \text{ mm}$ ,  $B = 0.962 \text{ mm}$ ,  $C = 0.574 \text{ mm}$  and  $D = 0.562 \text{ mm}$ .

### 5.2.5. Kiểm chứng kết quả

Sai số chuyển vị là 2.19% và sai số tần số riêng là 0.05%.

### 5.2.6. Comparison with previous study

Bảng 5.11, chỉ ra chuyển vị lớn hơn các nghiên cứu trước [60,61].

Nghiên cứu	Tỉ lệ khuếch đại
[60]	15.51
[61]	16.4
Nghiên cứu này	20.78

### 5.2.7. Kết quả đạt được

## 5.3. Phát triển và tối ưu bàn định vị 2-DOF

### 5.3.1. Thiết kế

Bàn 2-DOF chỉ trong hình 5.6.

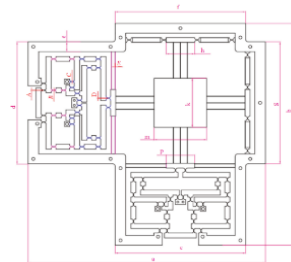
#### 5.3.1.1. Cơ cấu 1-DOF

#### 5.3.1.2. Cơ cấu 2-DOF

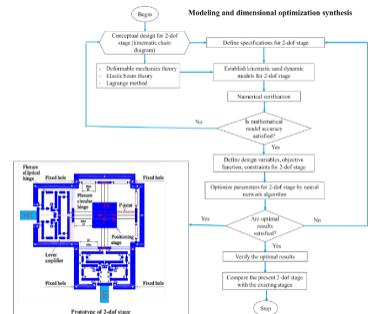
### 5.3.2. Phương pháp nghiên cứu

Hình 5.7 mô tả lưu đồ nghiên cứu.

#### 5.3.2.1 Mô hình và tối ưu thông số thiết kế



Hình 5.6. Bàn 2-DOF



Hình 5.7. Phương pháp nghiên cứu



Phương pháp nghiên cứu mô tả trong hình 5.7.

### 5.3.2.2. Giải thuật Neural network algoirhtm [48]

### 5.3.3. Kết quả và thảo luận

#### 5.3.3.1 Mô hình tĩnh động lực học

Hình 5.9-5.10 mô tả cơ cấu khuếch đại (MDLD), gồm 03 cơ cấu đòn bẩy #1,2 and 3 (LAM1, LAM2 and LAM3). Một nửa cơ cấu được phân tích vì đối xứng nhau. Sơ đồ lực mô tả trong hình 5.14 – 5.17.

chi tiết thiết lập phương trình động lực học [62]. Để tính tần số riêng trong công thức (5.164).

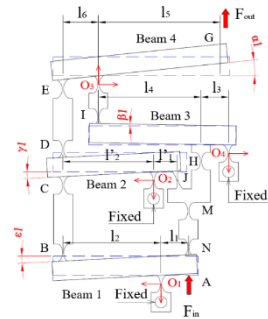


Fig. 5.13 Diagram of the half

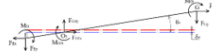


Fig. 5.14. Forced diagram of 4th beam

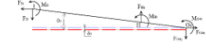


Figure 5.15. Forced diagram of 3rd beam



Fig. 5.16. Forced diagram of 2nd beam

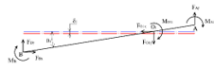


Fig. 5.17. Forced diagram of 1st beam

Fig. 5.9. Hybrid magnification structure

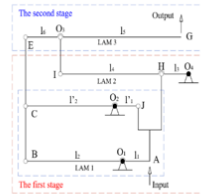
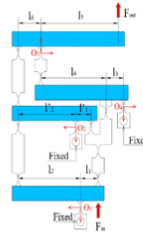


Fig. 5.10. Diagram of the adjusted displacement lever amplifier

$$f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{M} \right)^{0.5} \quad (5.164)$$

$K$  và  $M$  là độ cứng và khối lượng tương của kết cấu.

### 5.3.3.2. Đánh giá và kiểm chứng mô hình toán học

Sai số giữa lý thuyết và mô phỏng là 5.42%.

### 5.3.4. Tối ưu cấu trúc

#### 5.3.4.1 Mô tả bài toán tối ưu

Biến thiết kế:  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$

$$\text{Cực đại } f(\mathbf{x}) \quad (5.165)$$

Ràng buộc:

$$f(\mathbf{x}) > 100 \text{ Hz} \quad (5.166)$$

Biên của biến thiết kế (unit: mm):

$$\begin{cases} 0.7 \leq x_1 \leq 0.9; 0.6 \leq x_2 \leq 0.8; \\ 0.6 \leq x_3 \leq 0.75; 0.6 \leq x_4 \leq 0.7; 0.6 \leq x_5 \leq 0.7; \end{cases} \quad (5.167)$$

#### 5.3.4.2. Kết quả tối ưu

Tần số riêng thứ nhất là 112.0995 Hz.

#### 5.3.4.3. Kiểm chứng và so sánh

Bảng 5.18 chỉ ra tần số đạt được tốt hơn nghiên cứu trước.

Bảng 5.18 So sánh bàn 2-DOF với nghiên cứu trước

Bàn 2-DOF	Kích thước	Tần số (Hz)
Zhu et al. [63]	Không có	59.3
Wu and Xu [64]	Không có	80
Nghiên cứu hiện tại	451mm x 451mm x 16mm	<b>112.1</b>

## 5.4. Phát triển bàn định vị xoay

### 5.4.1. Thiết kế

#### 5.4.1.1 Sơ đồ động học

#### 5.4.1.2 Bộ khuếch đại lai

#### 5.4.1.3. Bàn định vị xoay

Bàn xoay CRP được đề xuất trong hình 5.28-5.29.

### 5.4.2. Phương pháp nghiên cứu

TM, FEM, RSM và TLBO [65] được đề xuất như trong hình 5.30.

### 5.4.3. Kết quả và thảo luận

#### 5.4.3.1 Suu tập dữ liệu

#### 5.4.3.2 Phân tích độ nhạy

#### 5.4.3.3. Kết quả và phân tích thống kê

Phương pháp đề xuất hiệu quả hơn AEDE [66].

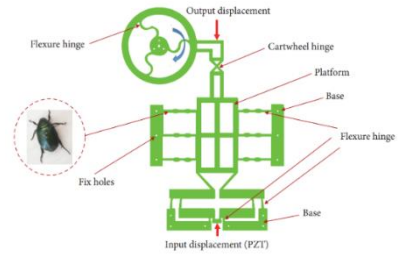
### 5.4.4. Kiểm chứng

Kết quả đạt được gần với kết quả dự đoán.

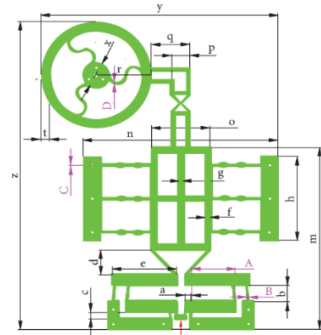
### 5.4.5. Kết quả đạt được

## 5.5. Kết luận

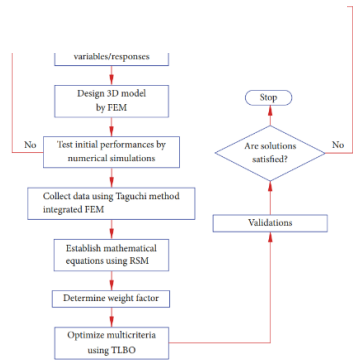
Chương này đã thiết kế bàn 2-DOF và xoay cho định vị mẫu.



Hình. 5.28. Sơ đồ thiết kế dựa trên con bọ



Hình. 5.29. Thông số thiết kế



Hình. 5.30. Phương pháp tối ưu

## CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### 6.1 Kết luận

Trong luận án này, tác giả đã phát triển khớp mềm, bàn định vị 1-DOF, bàn 2-DOF và bàn xoay cho ứng dụng thiết bị kiểm tra độ cứng vật liệu. Giai đoạn 1, kết quả tìm thấy sai số tâm xoay của khớp elíp là  $10.94 \cdot 10^{-5}$  mm, hệ số an toàn là 2.99 và góc xoay là  $52.006 \cdot 10^{-3}$  rad. Giai đoạn 2, bàn 01-DOF thứ nhất được thiết kế bởi kết hợp kiểu song song với con bọ. Kết quả đạt hệ số an toàn là 1.5141 và chuyển vị là 2.4065 mm. Bàn 01-DOF thứ hai được xây dựng trên hai cơ cấu đòn bẩy và song song. Kết quả tìm thấy chuyển vị theo Z là 436.04  $\mu$ m và hệ số an toàn là 2.224. Bàn 01-DOF được triển dùng cơ cấu đòn bẩy 6 cần và song song. Kết quả tìm được tần số riêng thứ nhất là 176.957 Hz. Giai đoạn cuối, bàn định vị 2-DOF và xoay được phát triển. bàn 2-DOF thứ nhất được xây dựng dùng lò xo zigzag và cơ cấu đòn bẩy song song. Kết quả tìm thấy chuyển vị là 3.862 mm và tần số riêng thứ nhất là 45.983 Hz. bàn 02-DOF thứ hai được thiết kế dùng cơ cấu 8 đòn bẩy. Kết quả tìm được tần số riêng thứ nhất là 112.0995 Hz. Bàn định vị xoay được thiết kế dùng động học của con bọ. Kết quả tìm thấy hệ số an toàn là 1.558 và chuyển vị là 2.096 mm.

### 6.2 Hướng phát triển

Các hướng phát triển tiếp theo của luận án bao g: (i) Phát triển các bàn định vị mới. (ii) Phát triển các bàn định vị cho thiết bị chính xác. (iii) Phát triển các phương pháp tối ưu mới. (iv) Chế tạo và kiểm chứng kết quả lý thuyết. (v) Ứng dụng thực tiễn cho kiểm tra độ cứng vật liệu dạng in-situ.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ebenstein, D. M., & Pruitt, L. A. (2006). Nanoindentation of biological materials. *Nano today*, 1(3), 26-33.
- [2] Huang, H., Zhao, H., Mi, J., Yang, J., Wan, S., Xu, L., & Ma, Z. (2012). A novel and compact nanoindentation device for in situ nanoindentation tests inside the scanning electron microscope. *AIP Advances*, 2(1), 012104.
- [3] Huang, H., Shi, C., Zhao, H., & Zhang, L. (2013). Influence of friction on the residual morphology, the penetration load and the residual stress distribution of a Zr-based bulk metallic glass. *AIP Advances*, 3(4), 042116.
- [4] Huang, H., Zhao, H., Mi, J., Yang, J., Wan, S., Yang, Z., ... & Geng, C. (2011). Experimental research on a modular miniaturization nanoindentation device. *Review of Scientific Instruments*, 82(9), 095101.
- [5] Jiang, C., Lu, H., Zhang, H., Shen, Y., & Lu, Y. (2017). Recent advances on in situ SEM mechanical and electrical characterization of low-dimensional nanomaterials. *Scanning*, 2017.
- [6] Yong, Y. K., Lu, T. F., & Handley, D. C. (2008). Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations. *Precision engineering*, 32(2), 63-70.
- [7] Lobontiu, N., & Paine, J. S. (2002). Design of circular cross-section corner-filletted flexure hinges for three-dimensional compliant mechanisms. *J. Mech. Des.*, 124(3), 479-484.
- [8] Tian, Y., Shirinzadeh, B., & Zhang, D. (2010). Closed-form compliance equations of filleted V-shaped flexure hinges for compliant mechanism design. *Precision Engineering*, 34(3), 408-418.
- [9] Tseytlin, Y. M. (2002). Notch flexure hinges: an effective theory. *Review of Scientific Instruments*, 73(9), 3363-3368.
- [10] Lobontiu, N., Paine, J. S., Garcia, E., & Goldfarb, M. (2002). Design of symmetric conic-section flexure hinges based on closed-form compliance equations. *Mechanism and machine theory*, 37(5), 477-498.
- [11] Ling, M., Howell, L. L., Cao, J., & Chen, G. (2020). Kinetostatic and dynamic modeling of flexure-based compliant mechanisms: a survey. *Applied Mechanics Reviews*, 72(3).
- [12] Wu, Z., & Xu, Q. (2018, February). Survey on recent designs of compliant micro-/nano-positioning stages. In *Actuators* (Vol. 7, No. 1, p. 5). MDPI.
- [13] Oba, Y., Yamada, Y., Igarashi, K., Katsura, S., & Kakinuma, Y. (2016). Replication of skilled polishing technique with serial-parallel mechanism polishing machine. *Precision Engineering*, 45, 292-300.
- [14] Law, M., Ihlenfeldt, S., Wabner, M., Altintas, Y., & Neugebauer, R. (2013). Position-dependent dynamics and stability of serial-parallel kinematic

machines. *CIRP Annals*, 62(1), 375-378.

- [15] Tang, C., Zhang, M., & Cao, G. (2017). Design and testing of a novel flexure-based 3-degree-of-freedom elliptical micro/nano-positioning motion stage. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(10), 1687814017725248.
- [16] Hu, X. Y., Jia, J. H., & Tu, S. T. (2012). Displacement amplifier design for an extensometer in high temperature deformation monitoring. *Procedia Engineering*, 29, 1872-1876.
- [17] Nikoobin, A., & Niaki, M. H. (2012). Deriving and analyzing the effective parameters in microgrippers performance. *Scientia Iranica*, 19(6), 1554-1563.
- [18] Wang, F., Liang, C., Tian, Y., Zhao, X., & Zhang, D. (2016). Design and control of a compliant microgripper with a large amplification ratio for high-speed micro manipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(3), 1262-1271.
- [19] Chang, S. H., & Du, B. C. (1998). A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range. *Review of Scientific Instruments*, 69(4), 1785-1791.
- [20] Tang, H., Li, Y., & Xiao, X. (2013, May). Development and assessment of a novel hydraulic displacement amplifier for piezo-actuated large stroke precision positioning. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1409-1414). IEEE.
- [21] Xu, Q. (2013, December). Structure design of a new compliant gripper based on Scott-Russell mechanism. In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1623-1628). IEEE.
- [22] Ai, W., & Xu, Q. (2014). New structural design of a compliant gripper based on the Scott-Russell mechanism. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11(12), 192.
- [23] Lobontiu, N., & Garcia, E. (2003). Analytical model of displacement amplification and stiffness optimization for a class of flexure-based compliant mechanisms. *Computers & structures*, 81(32), 2797-2810.
- [24] Ni, Y., Deng, Z., Wu, X., Li, J., Huang, W., & Li, L. (2013, December). Quasi-static and modal analysis of bridge-type compliant mechanism with flexure hinges. In *2013 Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing* (pp. 102-106). IEEE.
- [25] Yang, Y. L., Wei, Y. D., Lou, J. Q., Tian, G., Zhao, X. W., & Fu, L. (2015). A new piezo-driven microgripper based on the double-rocker mechanism. *Smart Materials and Structures*, 24(7), 075031.
- [26] Xu, Q., & Li, Y. (2011). Analytical modeling, optimization and testing of a compound bridge-type compliant displacement amplifier. *Mechanism and machine theory*, 46(2), 183-200.

- [27] Liu, P., & Yan, P. (2016). A new model analysis approach for bridge-type amplifiers supporting nano-stage design. *Mechanism and Machine Theory*, 99, 176-188.
- [28] Ling, M., Cao, J., Zeng, M., Lin, J., & Inman, D. J. (2016). Enhanced mathematical modeling of the displacement amplification ratio for piezoelectric compliant mechanisms. *Smart Materials and Structures*, 25(7), 075022.
- [29] Guo, F., Sun, Z., Zhang, S., Cao, R., & Li, H. (2022). Optimal design and reliability analysis of a compliant stroke amplification mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 171, 104748.
- [30] Broitman, E. (2017). Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview. *Tribology Letters*, 65(1), 1-18.
- [31] Rabe, R., Breguet, J. M., Schwaller, P., Stauss, S., Haug, F. J., Patscheider, J., & Michler, J. (2004). Observation of fracture and plastic deformation during indentation and scratching inside the scanning electron microscope. *Thin Solid Films*, 469, 206-213.
- [32] Ling, M., Howell, L. L., Cao, J., & Chen, G. (2020). Kinetostatic and dynamic modeling of flexure-based compliant mechanisms: a survey. *Applied Mechanics Reviews*, 72(3).
- [33] Nguyen, V. K., Pham, H. T., Pham, H. H., & Dang, Q. K. (2021). Optimization design of a compliant linear guide for high-precision feed drive mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 165, 104442.
- [34] Yu, Y. Q., Howell, L. L., Lusk, C., Yue, Y., & He, M. G. (2005). Dynamic modeling of compliant mechanisms based on the pseudo-rigid-body model.
- [35] Koseki, Y., Tanikawa, T., Koyachi, N., & Arai, T. (2002). Kinematic analysis of a translational 3-dof micro-parallel mechanism using the matrix method. *Advanced Robotics*, 16(3), 251-264.
- [36] Ling, M., Cao, J., Jiang, Z., & Lin, J. (2016). Theoretical modeling of attenuated displacement amplification for multistage compliant mechanism and its application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 249, 15-22.
- [37] Ling, M., Cao, J., & Pehrson, N. (2019). Kinetostatic and dynamic analyses of planar compliant mechanisms via a two-port dynamic stiffness model. *Precision Engineering*, 57, 149-161.
- [38] Ryu, J. W., Gweon, D. G., & Moon, K. S. (1997). Optimal design of a flexure hinge based XYφ wafer stage. *Precision engineering*, 21(1), 18-28.
- [39] Awtar, S., & Sen, S. (2010). A generalized constraint model for two-dimensional beam flexures: nonlinear load-displacement formulation.
- [40] Li, Y., & Xu, Q. (2009). Design and optimization of an XYZ parallel micromanipulator with flexure hinges. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 55(4), 377-402.
- [41] Golpira, H., & Bevrani, H. (2011). Application of GA optimization for

automatic generation control design in an interconnected power system. *Energy Conversion and Management*, 52(5), 2247-2255.

- [42] Kaur, M., & Singh, D. (2021). Multi-modality medical image fusion technique using multi-objective differential evolution based deep neural networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(2), 2483-2493.
- [43] Chatterjee, S., Sarkar, S., Hore, S., Dey, N., Ashour, A. S., & Balas, V. E. (2017). Particle swarm optimization trained neural network for structural failure prediction of multistoried RC buildings. *Neural Computing and Applications*, 28(8), 2005-2016.
- [44] Rao, R. V., Savsani, V. J., & Vakharia, D. P. (2012). Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems. *Information sciences*, 183(1), 1-15.
- [45] Mirjalili, S. (2015). Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-based systems*, 89, 228-249.
- [46] Aljarah, I., Faris, H., & Mirjalili, S. (2018). Optimizing connection weights in neural networks using the whale optimization algorithm. *Soft Computing*, 22(1), 1-15.
- [47] Yang, X. S., & He, X. (2013). Firefly algorithm: recent advances and applications. arXiv preprint arXiv:1308.3898.
- [48] Sadollah, A., Sayyaadi, H., & Yadav, A. (2018). A dynamic metaheuristic optimization model inspired by biological nervous systems: Neural network algorithm. *Applied Soft Computing*, 71, 747-782.
- [49] Dang, M. P., Le, H. G., Chau, N. L., & Dao, T. P. (2021). Optimization for a flexure hinge using an effective hybrid approach of fuzzy logic and moth-flame optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- [50] Yu, J., Xie, Y., Li, Z., & Hao, G. (2015). Design and experimental testing of an improved large-range decoupled XY compliant parallel micromanipulator. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), 044503.
- [51] Dang, M. P., Le, H. G., Le Chau, N., & Dao, T. P. (2020). A multi-objective optimization design for a new linear compliant mechanism. *Optimization and Engineering*, 21(2), 673-705.
- [52] Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*, 95, 51-67.
- [53] Dang, M. P., Le, H. G., Tran, N. T. D., Chau, N. L., & Dao, T. P. (2022). Optimal Design and Analysis for a New 1-DOF Compliant Stage Based on Additive Manufacturing Method for Testing Medical Specimens. *Symmetry*, 14(6), 1234.
- [54] Yildiz, A. R. (2013). Hybrid Taguchi-differential evolution algorithm for optimization of multi-pass turning operations. *Applied Soft*



Computing, 13(3), 1433-1439.

- [55] Dinh, V. B., Chau, N. L., Le, N. T., & Dao, T. P. (2021). Topology-based geometry optimization for a new compliant mechanism using improved adaptive neuro-fuzzy inference system and neural network algorithm. *Engineering with Computers*, 1-30.
- [56] Xu, Q. (2013). Design, testing and precision control of a novel long-stroke flexure micropositioning system. *Mechanism and machine Theory*, 70, 209-224.
- [57] Xiaochen, L., & Yanling, T. (2013, August). The design and new controller of a 1-DOF precision positioning platform. In *2013 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale* (pp. 190-194). IEEE.
- [58] Le Chau, N., Tran, N. T., & Dao, T. P. (2021). An optimal design method for compliant mechanisms. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- [59] Dang, M. P., Dao, T. P., & Le, H. G. (2018, November). Optimal Design of a New Compliant XY Micro positioning Stage for Nanoindentation Tester Using Efficient Approach of Taguchi Method, Response Surface Method and NSGA-II. In *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)* (pp. 1-6). IEEE.
- [60] Lu, K., Zhang, J., Chen, W., Jiang, J., & Chen, W. (2014, June). A monolithic microgripper with high efficiency and high accuracy for optical fiber assembly. In *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (pp. 1942-1947). IEEE.
- [61] Yang, Y. L., Wei, Y. D., Lou, J. Q., Xie, F. R., & Fu, L. (2015). Development and precision position/force control of a new flexure-based microgripper. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(1), 015005.
- [62] Dang, M. P., Le, H. G., Van, M. N., Chau, N. L., & Dao, T. P. (2022). Modeling and Optimization for a New Compliant 2-dof Stage for Locating Biomaterial Samples by an Efficient Approach of a Kinetostatic Analysis-Based Method and Neural Network Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022.
- [63] Zhu, W. L., Zhu, Z., Shi, Y., Wang, X., Guan, K., & Ju, B. F. (2016). Design, modeling, analysis and testing of a novel piezo-actuated XY compliant mechanism for large workspace nano-positioning. *Smart Materials and Structures*, 25(11), 115033.
- [64] Lee, C., Stepanick, C. K., Lee, S. K., & Tarbuton, J. A. (2016). Cross-coupling effect of large range XY nanopositioning stage fabricated by stereolithography process. *Precision Engineering*, 46, 81-87.
- [65] Dang, M. P., Dao, T. P., Chau, N. L., & Le, H. G. (2019). Effective hybrid algorithm of Taguchi method, FEM, RSM, and teaching learning-based

optimization for multiobjective optimization design of a compliant rotary positioning stage for nanoindentation tester. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019.

[66] Dao, T. P., Ho, N. L., Nguyen, T. T., Le, H. G., Thang, P. T., Pham, H. T., ... & Nguyen, T. T. (2017). Analysis and optimization of a micro-displacement sensor for compliant microgripper. *Microsystem Technologies*, 23(12), 5375-5395.