

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT TP.HCM

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Tp.HCM

PHAN THANH VŨ

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. PHẠM HUY TUÂN
Người hướng dẫn khoa học 2: TS. TRƯƠNG VĂN MẾN

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN CƠ CẤU ĐÀN HỒI ỔN ĐỊNH MÔ-MEN
CHO CÁC ỨNG DỤNG TRONG CƠ SINH HỌC**

Phản biện 1:
Phản biện 2:
Phản biện 3:

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí
Mã số chuyên ngành: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở họp tại
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM
vào ngày tháng năm 2026

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2026

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

I. Các công trình công bố của luận án

[1] **T.-V. Phan**, V. M. Truong, H.-T. Pham, V.-K. Nguyen, and A. Bukayeva, "Robust design and optimization of a large-stroke compliant constant-torque mechanism under fabrication uncertainties," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 215, p. 106179, 2025/11/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2025.106179>. (SCIE, Q1, IF 5.3)

[2] **T.-V. Phan**, V. M. Truong, H.-T. Pham, and V.-K. Nguyen, "Design of a Novel Large-Stroke Compliant Constant-Torque Mechanism Based on Chained Beam-Constraint Model," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.1115/1.4063980. (SCIE, Q1, IF 3.2)

[3]. **T.-V. Phan** and H.-T. Pham, "Design and Optimization of a Large-Stroke Compliant Constant-Torque Mechanism," *Journal of Technical Education Science*, vol. 68, pp. 93-100, 2022. <https://doi.org/10.54644/jte.68.2022.1098>

[4]. **T.-V. Phan**, H.-T. Pham, and C.-N. Truong, "Design and Analysis of a Compliant Constant-Torque Mechanism for Rehabilitation Devices," Cham, 2020: Springer International Publishing, in *Advanced Materials*, pp. 541-549 (Scopus)

II. Các công trình công bố khác có liên quan đến hướng nghiên cứu

[1]. D. C. Nguyen, **T. V. Phan**, and H. T. Pham, "Design and Analysis of a Compliant Gripper Integrated with Constant-Force and Static Balanced Mechanism for Micro Manipulation," in *2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 23-24 Nov. 2018 2018, pp. 291-295, doi: 10.1109/GTSD.2018.8595638 (IEEE)

[2]. H.-T. Pham, **T.-V. Phan**, and V.-T. Mai, "Optimization design of a carbon fibre prosthetic foot for amputee," *Acta Scientifica Orthopaedics*, vol. 3, no. 10, pp. 16-21, 2020.

[3] H.-T. Pham, V.-K. Nguyen, Q.-K. Dang, T. V. A. Duong, D.-T. Nguyen, and **T.-V. Phan**, "Design Optimization of Compliant Mechanisms for Vibration-Assisted Machining Applications Using a Hybrid Six Sigma, RSM-FEM, and NSGA-II Approach," *Journal of Machine Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 135-158, 2023 2023, doi: 10.36897/jme/166500. (Scopus, Q2)

III. Sở hữu trí tuệ

[1] Sáng chế “*Thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối tích hợp cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men*”, Cục sở hữu trí tuệ - Bộ Khoa học và công nghệ (Chấp nhận đơn, ngày 20/11/2025)

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Cơ cấu ổn định mô-men (Constant-Torque Mechanism – CTM) là cơ cấu có khả năng tạo ra một mô-men gần như không đổi trong một khoảng góc quay đầu vào nhất định. Nhờ đặc tính này, CTM trở thành một giải pháp hiệu quả cho các thiết bị cần kiểm soát mô-men mà không phụ thuộc vào hệ thống cảm biến hay điều khiển phức tạp, từ đó góp phần đơn giản hóa kết cấu và giảm chi phí thiết bị. Khi CTM được thiết kế dưới dạng cơ cấu đàn hồi, ta có cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men (CCTM – Compliant Constant-Torque Mechanism). CCTM kết hợp được cả ưu điểm của cơ cấu đàn hồi lẫn khả năng duy trì mô-men không đổi, khiến nó trở thành một hướng nghiên cứu đầy tiềm năng trong lĩnh vực cơ sinh học.

Tuy nhiên, một trong những hạn chế lớn của cơ cấu đàn hồi nói chung và CCTM nói riêng là phạm vi hoạt động bị giới hạn do phải làm việc trong vùng đàn hồi của vật liệu. Điều này làm giảm đáng kể tính ứng dụng của CCTM trong thực tế. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các thiết kế CCTM có khoảng làm việc lớn, đồng thời vẫn đảm bảo ứng suất trong giới hạn cho phép và kết cấu nhỏ gọn, là một yêu cầu cấp thiết.

Mặt khác, hầu hết các CCTM có khoảng ổn định lớn hiện nay đều được chế tạo bằng phương pháp phay CNC từ vật liệu nhựa. Quá trình gia công này có thể gây ra sai lệch hình học của các dầm đàn hồi do lực cắt tác động, từ đó ảnh hưởng đến khả năng hoạt động và hiệu suất của cơ cấu. Tuy nhiên, cho đến nay, chưa có nghiên cứu nào xem xét một cách toàn diện ảnh hưởng của yếu tố gia công đến chất lượng thực tế của CCTM trong quá trình thiết kế tối ưu. Do đó, ngoài việc tìm ra các giải pháp thiết kế nhằm mở rộng phạm vi hoạt động của CCTM, cần phải nghiên cứu thêm các yếu tố ngẫu nhiên xảy ra trong quá trình gia công để đảm bảo rằng cơ cấu sau chế tạo vẫn đạt được các yêu cầu thiết kế đề ra.

2. Mục tiêu của đề tài

Mục tiêu chung

Nghiên cứu thiết kế và tối ưu hóa cơ cấu CCTM có khoảng ổn định lớn và kích thước nhỏ gọn, phù hợp để ứng dụng trong các thiết bị cơ sinh học. Giải pháp thiết kế phải đảm bảo cơ cấu duy trì được đặc tính làm việc mong muốn ngay cả khi xuất hiện các sai số ngẫu nhiên phát sinh trong quá trình gia công, thông qua tiếp cận tối ưu hóa dựa trên phân tích độ tin cậy.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu nghiên cứu trên, luận án này thực hiện các nhiệm vụ nghiên cứu sau đây:

- Thu thập, hệ thống hóa các nghiên cứu liên quan.
- Đề xuất các thiết kế mới cho CCTM.
- Xây dựng mô hình tính toán dựa trên phương pháp CBCM.
- Phân tích độ tin cậy cho CCTM dựa theo phương pháp FORM
- Tích hợp mô hình tính toán CBCM và phân tích độ tin cậy FORM vào giải thuật tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA-II
- Thiết kế tối ưu hóa CCTM theo độ tin cậy
- Chế tạo CCTM và tiến hành thử nghiệm đo mô-men, chuyển vị.
- Thiết kế tích hợp CCTM vào ít nhất một ứng dụng cơ sinh học.

4. Phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu

- Các cấu trúc cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men có chuyển vị lớn và nguồn biến dạng chính là uốn thanh/dầm.
- Ưu tiên các cấu trúc có khả năng tích hợp vào thiết bị cơ sinh học (hình dạng và kích thước nhỏ gọn, phạm vi góc chuyển đổi phù hợp).

Phương pháp và công cụ

- Phân tích tĩnh và tĩnh động học dựa trên CBCM để mô tả chuyển vị lớn
- Phân tích độ tin cậy sử dụng phương pháp FORM
- Tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng NSGA-II tích hợp ràng buộc độ tin cậy.
- Thiết kế, mô phỏng và chế tạo mẫu thử nghiệm để xác nhận mô hình.

Vật liệu và điều kiện làm việc

Giả thiết và giới hạn

Loại trừ

5. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

Luận án kế thừa các nghiên cứu hiện có để chọn lọc, hình thành ý tưởng và tiến hành thiết kế, tối ưu hóa theo mục tiêu đề ra. Quá trình thực hiện được tiến hành từ từ qua các bước: Ban đầu sẽ là thiết kế tối ưu một CCTM mới, sau đó phát triển lên thành CCTM với khoảng làm việc lớn và cuối cùng là một CCTM với khoảng làm việc lớn có xét đến các sai số ngẫu nhiên xảy ra trong quá trình gia công.

- Để đạt được các mục tiêu trên thì luận án sẽ sử dụng song song hai phương pháp: phương pháp giải tích và phương pháp số để tối ưu hóa. Với phương pháp giải tích, luận án sẽ sử dụng mô hình CBCM. Phương pháp số sẽ dựa trên phân tích phần tử hữu hạn nhờ vào phần mềm ABAQUS kết hợp với tối ưu hóa bằng giải thuật di truyền NSGA-II với sự trợ giúp của MATLAB. Cuối cùng sẽ tiến hành thực nghiệm để kiểm chứng lại kết quả mô phỏng.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

Ý nghĩa khoa học

- Luận án đã đề xuất được các thiết kế CCTM mới có khoảng làm việc lớn và nhỏ gọn hơn so với các nghiên cứu trước đây.

- Phân tích tĩnh động học bằng phương pháp CBCM cho CCTM được đề xuất và tích hợp vào giải thuật di truyền đa mục tiêu NSGA-II.

- Kết hợp phương pháp phân tích độ tin cậy FORM, mô hình hóa theo CBCM và tối ưu hóa theo giải thuật di truyền NSGA-II để tạo thành bài toán thiết kế tối ưu hóa đa mục tiêu theo độ tin cậy cho CCTM. Mô hình tối ưu hóa này giúp thu được CCTM có xét đến các yếu tố ngẫu nhiên xảy ra trong quá trình gia công, đảm bảo cho CCTM sau khi gia công đạt các mục tiêu thiết kế.

- Phương pháp phân tích đánh giá sai số về hình dáng và kích thước sau khi gia công cho các dầm mỏng có dạng cong bất kỳ đã được đề xuất. Phương pháp này giúp đánh giá được độ chính xác gia công của các cơ cấu đàn hồi với những dạng hình học phức tạp vốn không thể kiểm tra bằng các dụng cụ đo lường cơ khí thông thường.

Ý nghĩa thực tiễn

- Luận án đã đề xuất ứng dụng CCTM trong cơ sinh học: Thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối tích hợp CCTM giúp người suy giảm chức năng khớp gối thực hiện các hoạt động đi lại hàng ngày dễ dàng hơn.

- Kết quả của nghiên cứu này sẽ là một tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu tiếp theo trong lĩnh vực cơ cấu đàn hồi nói chung và cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men nói riêng.

7. Cấu trúc của luận án

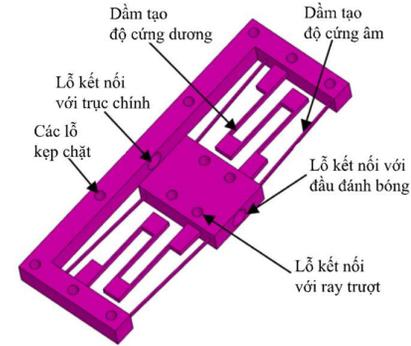
Luận án bao gồm phần Mở đầu và 6 Chương.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

1.1 Cơ cấu đàn hồi

1.1.1 Khái niệm chung

Cơ cấu đàn hồi hay còn gọi là cơ cấu mềm cho phép truyền hay biến đổi chuyển động, lực và mô-men nhờ vào sự biến dạng của các phần tử đàn hồi.



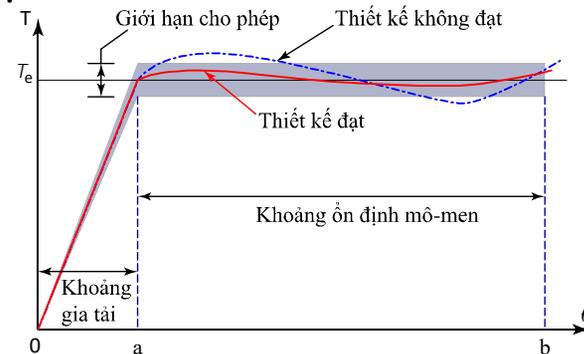
Hình 1.1 Cơ cấu ổn định lực dạng cơ cấu đàn hồi dùng ổn định lực cho robot đánh bóng [2]

1.1.2 Ứng dụng của cơ cấu đàn hồi

Dựa vào các đặc tính của mình, cơ cấu đàn hồi ngày càng được quan tâm ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực. Ngoài ra, xét theo chức năng thì cơ cấu đàn hồi còn có các dạng ổn định lực (CFM), ổn định mô-men (CTM) và các cơ cấu ổn định hai vị trí (BM), hoặc ổn định nhiều vị trí.

1.2 Cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men

1.2.1 Giới thiệu



Hình 1.4 Đồ thị mô-men xoắn – góc quay của cơ cấu ổn định mô-men

1.3 Đánh giá về cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men

Hướng nghiên cứu thiết kế tối ưu cơ cấu CCTM ta thấy còn tồn tại một số vấn đề sau:

- Việc tối ưu các cơ cấu CCTM sử dụng các hàm cong còn phức tạp, làm tăng số lượng biến thiết kế dẫn đến bài toán tối ưu sẽ phức tạp, chi phí tính toán lớn.
- Kích thước các cơ cấu CCTM vẫn còn lớn, khoảng làm việc ổn định mô-men còn nhỏ từ đó làm giảm khả năng ứng dụng của cơ cấu.
- Một số CCTM kết cấu phức tạp, phải lắp ráp làm mất đi tính ưu việt của cơ cấu đàn hồi là tính nguyên khối.
- Chưa có công trình nào tích hợp CBCM vào giải thuật tối ưu để khai thác hiệu quả tính toán của phương pháp này nhằm giảm chi phí tính toán cho bài toán tối ưu hóa.
- Chưa có công trình nào xem xét sự thay đổi của các yếu tố ngẫu nhiên ảnh hưởng làm thay đổi hình dáng, kích thước đã tối ưu từ đó làm cho cơ cấu có thể không đảm bảo các mục tiêu thiết kế hoặc tệ hơn là mất đi tính ổn định mô-men.

Do đó hướng nghiên cứu của đề tài sẽ đi giải quyết các vấn đề trên nhằm tìm kiếm được những cơ cấu CCTM mới, với kết cấu đơn giản hơn, nhỏ gọn, chế tạo nguyên khối, có khoảng làm việc lớn (trên 65°) nhằm tăng khả năng ứng dụng của cơ cấu. Ngoài ra, đề tài cũng sẽ thực hiện bài toán tối ưu hóa theo độ tin cậy để xem xét đến các biến ngẫu nhiên hoặc các yếu tố ngẫu nhiên nhằm đảm bảo độ tin cậy cao cho thiết kế.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Đường cong Bezier

Là đường cong tham số xấp xỉ được điều khiển bởi các điểm điều khiển.

2.2 Giải thuật di truyền GA và NSGA-II

GA dùng để giải quyết cho các bài toán tối ưu một mục tiêu, NSGA-II dùng để tối ưu hóa cho các bài toán đa mục tiêu.

2.3 Phương pháp phân tử hữu hạn

Phương pháp phân tử hữu hạn trong phần mềm ABAQUS sẽ được sử dụng để tích hợp vào phần mềm MATLAB.

2.4 Phương pháp Chained Beam-Constraint-Model (CBCM)

Trong phương pháp CBCM, dầm được chia thành N phần tử, mỗi phần tử được áp dụng mô hình BCM [85] kết hợp với các phương trình cân bằng tĩnh và ràng buộc hình học để tìm được các thông số lực hoặc chuyển vị.

2.5 Tối ưu hóa theo độ tin cậy

Việc xem xét sự thay đổi ngẫu nhiên của các biến thiết kế hoặc các thông số trong mô hình bài toán tối ưu như các ràng buộc bổ sung giúp đưa các kết quả tối ưu nhận được đảm bảo nằm sâu bên trong vùng an toàn. Bài toán này được gọi là tối ưu hóa theo độ tin cậy RBDO.

2.6 Phương pháp phân tích độ tin cậy bậc nhất FORM

Phương pháp phân tích độ tin cậy bậc nhất FORM sử dụng khoảng cách ngắn nhất từ điểm gốc tọa độ O trong không gian chuẩn hóa U đến hàm trạng thái giới hạn, xác định thông qua các điểm thiết kế nằm trên hàm trạng thái này.

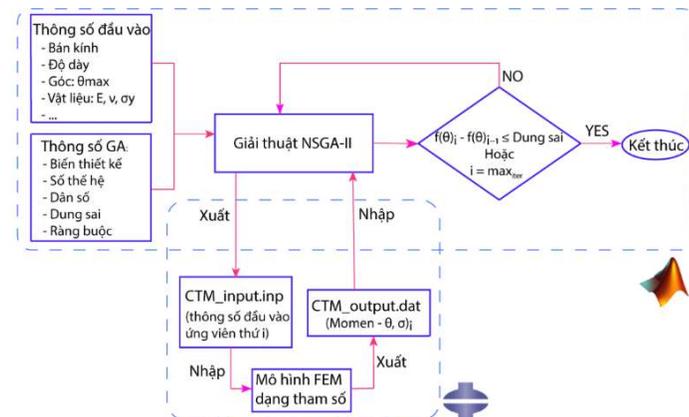
2.7 Vật liệu PEEK

Polyether ether ketone (PEEK) là một loại polyme nhiệt dẻo có tỷ số σ_y/E lớn, rất phù hợp với các cơ cấu biến dạng lớn như CCTM.

CHƯƠNG 3 THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÓA CƠ CẤU ĐÀN HỒI ỔN ĐỊNH MÔ-MEN DỰA TRÊN GIẢI THUẬT DI TRUYỀN

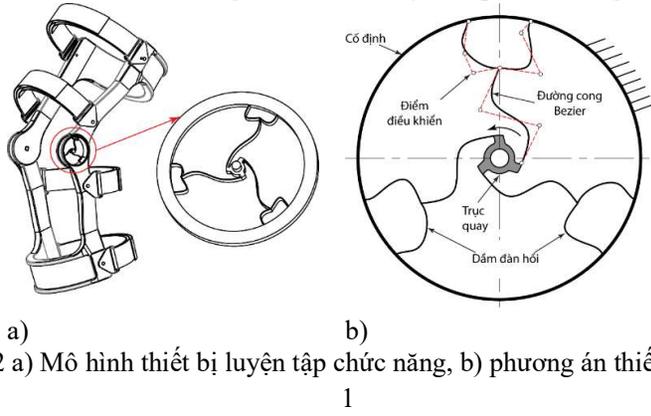
3.1 Tối ưu hóa cơ cấu bằng GA và FEM

Trong phần này, tác giả sẽ ứng dụng phương pháp này cho hai trường hợp nghiên cứu cụ thể để thiết kế tối ưu ra hai cơ cấu CCTM, gọi là CCTM-1 và CCTM-2.



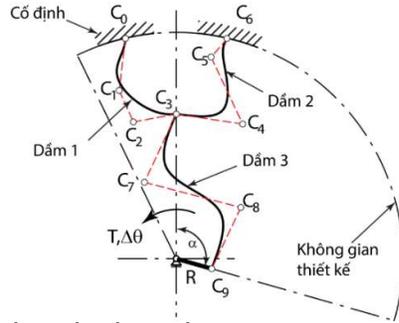
Hình 3.1 Lưu đồ thuật toán tối ưu hóa bằng giải thuật di truyền

3.1.1 Cơ cấu CCTM dùng cho thiết bị luyện tập chức năng (CCTM-1)



Hình 3.2 a) Mô hình thiết bị luyện tập chức năng, b) phương án thiết kế CCTM-1

3.1.1.1 Thiết kế CCTM-1



Hình 3.3 Sơ đồ các biến thiết kế và điều kiện biên một nhánh của CCTM-1

3.1.1.2 Tối ưu hóa CCTM-1

Bảng 3.1 Mô hình tối ưu hóa của cơ cấu CCTM-1

1. Mục tiêu:

– Cực tiểu sai số mô-men đầu ra theo phương trình (3.1)

2. Biến thiết kế:

– Điểm điều khiển: $C_i(x, y)$ ($i = 0 \div 9$)

– Bề dày trong mặt phẳng (In-plane thickness): w

3. Ràng buộc:

i. $g_1: C_i(x) < 0$ ($i = 0 \div 2; 7$); $C_i(x) > 0$ ($i = 4 \div 6; 8$)

ii. $g_2: 0.7 \leq w \leq 1.5$ (mm)

iii. Ứng suất lớn nhất trong CCTM, $g_3: \sigma_m < \sigma_y/SF$

Nhiệm vụ tối ưu là làm sao giảm sự thay đổi mô-men trong khoảng làm việc của cơ cấu bất kể sự thay đổi của góc quay đầu vào với hàm mục tiêu theo phương trình (3.1).

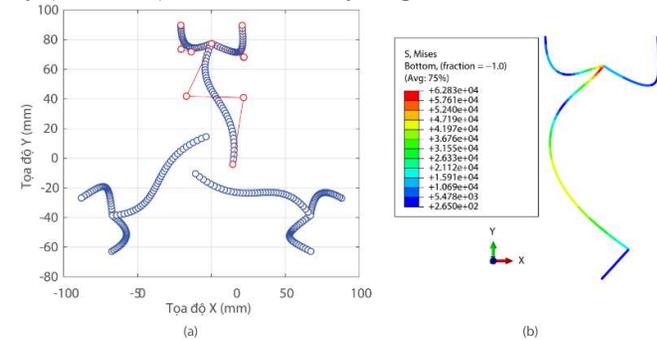
$$\text{Min}f(\theta) = \int_a^b (T - T_e)^2 d\theta \quad (3.1)$$

3.1.1.3 Kết quả CCTM-1

Bảng 3.2 Giá trị tối ưu các biến thiết kế của CCTM-1

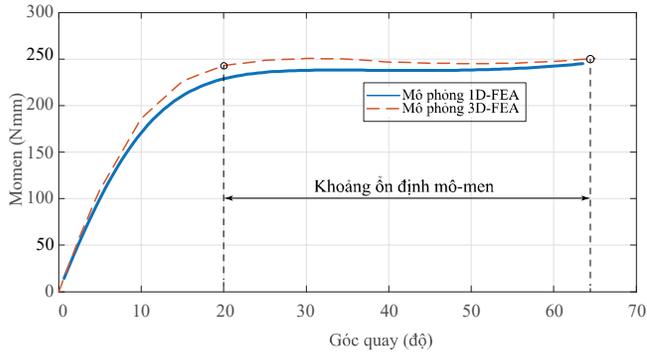
Biến thiết kế	Giá trị (mm)	Biến thiết kế	Giá trị (mm)
$C_0(x, y)$	(-20,69, 89,76)	$C_5(x, y)$	(21,99, 68,23)
$C_1(x, y)$	(-20,56, 73,49)	$C_6(x, y)$	(20,80, 89,64)
$C_2(x, y)$	(-13,68, 71,76)	$C_7(x, y)$	(-16,96, 41,85)
$C_3(x, y)$	(0,00, 77,37)	$C_8(x, y)$	(21,74, 40,95)
$C_4(x, y)$	(21,80, 68,00)	$C_9(x, y)$	(14,43, -4,10)
w	0,90		

Chiều dày (chiều cao) của cơ cấu ở đây có giá trị $t = 10$ mm.



Hình 3.4 Đường cong Bezier của cơ cấu CCTM-1 (a) và kết quả mô phỏng từ ABAQUS (b)

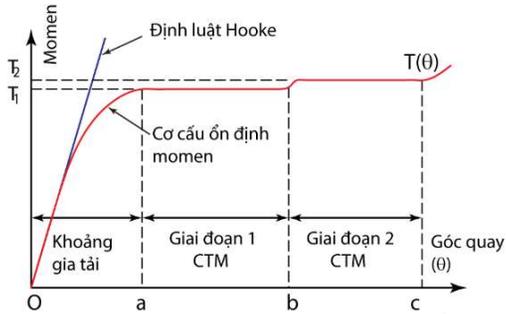
Kết quả cho thấy có sự tương thích khá tốt giữa hai mô hình 1D và 3D. Độ ổn định mô-men của cơ cấu đạt được 2/3, từ 20° đến hơn 60°, trên toàn bộ khoảng chuyển vị của góc quay đầu vào với sai số không quá 5%.



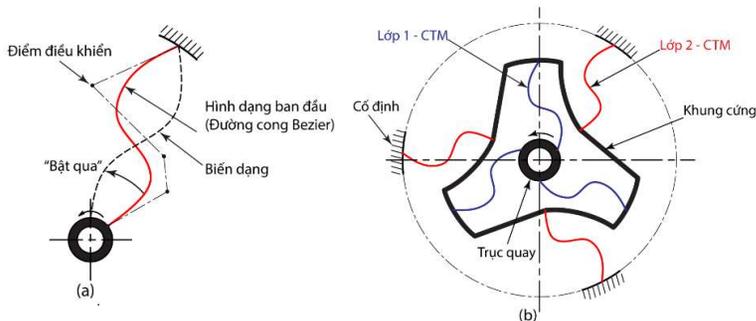
Hình 3.6 Đồ thị mối liên hệ giữa Góc quay – Mô-men của CCTM-1

3.1.2 Cơ cấu CCTM hai giai đoạn (CCTM-2)

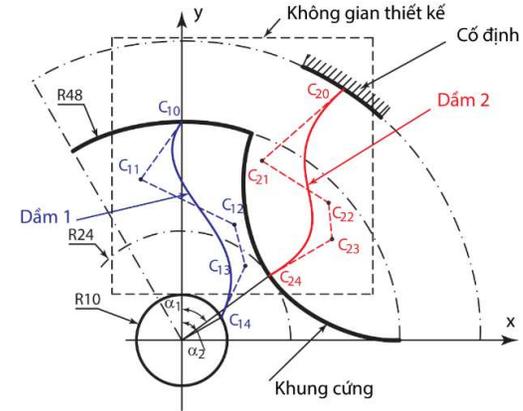
3.1.2.1 Thiết kế CCTM-2



Hình 3.7 Mối quan hệ của Mô-men – Góc quay của cơ cấu CCTM hai giai đoạn



Hình 3.8 Ý tưởng thiết kế cơ cấu CCTM hai giai đoạn



Hình 3.9 Biến thiết kế và điều kiện biên một nhánh của cơ cấu CCTM-2

3.1.2.2 Tối ưu hóa CCTM-2

$$\text{Min}[f(\theta)] = \int_a^b (T - T_1)^2 d\theta + \int_b^c (T - T_2)^2 d\theta \quad (3.2)$$

Bảng 3.3 Mô hình tối ưu hóa của cơ cấu CCTM-2

1. Mục tiêu:

- Cực tiểu sai số mô-men đầu ra theo phương trình (3.2)

2. Biến thiết kế:

- Điều kiện điều khiển: $C_{ij}(x, y)$ ($i = 1 \div 2, j = 0 \div 4$)
- Bề dày trong mặt phẳng (In-plane thickness): w
- Góc: α_1, α_2

3. Ràng buộc:

- $g_1: C_{11}(x) < 0;$
- $g_2: C_{1j}(x) < C_{2j}(x) \quad (j = 0 \div 4)$
- $g_3: 0.7 \leq w \leq 1.5 \text{ (mm)}$
- $g_4: \pi/18 \leq \alpha \leq \pi/1.5 \text{ (rad)}$
- Ứng suất lớn nhất trong CCTM, $g_5: \sigma_m < \sigma_y/SF$

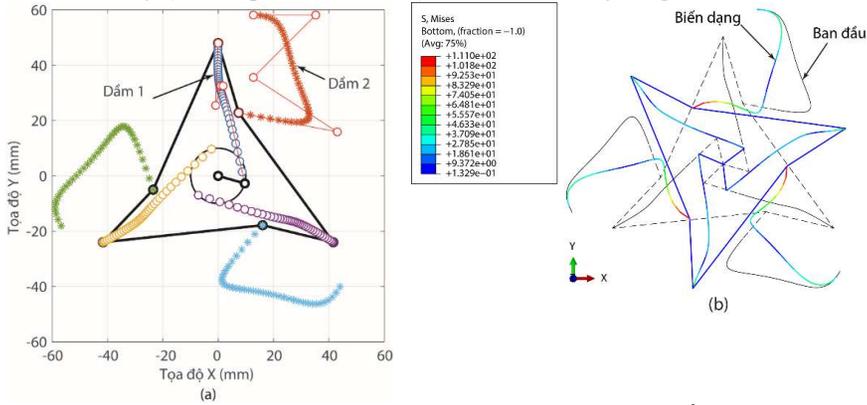
3.1.2.3 Kết quả CCTM-2

Bảng 3.4 Giá trị tối ưu các biến thiết kế của CCTM-2

Biến thiết kế	Giá trị (mm)	Biến thiết kế	Giá trị (mm)
$C_{10}(x, y)$	(0,00; 48,00)	$C_{22}(x, y)$	(12,70; 35,60)
$C_{11}(x, y)$	(-0,90; 25,47)	$C_{23}(x, y)$	(43,03; 15,90)
$C_{12}(x, y)$	(1,00; 32,53)	$C_{24}(x, y)$	(7,42; 22,83)

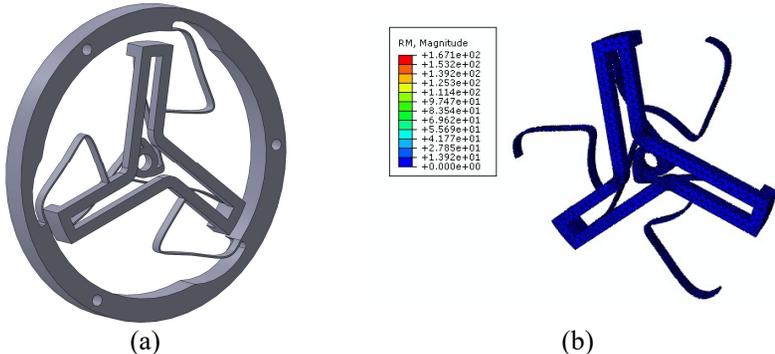
$$\begin{aligned}
 C_{13}(x, y) & (1,79; 32,53) & \alpha_1 & 105,88^\circ \\
 C_{14}(x, y) & (9,62; -2,74) & \alpha_2 & 18,00^\circ \\
 C_{20}(x, y) & (12,70; 58,13) & w & 0,80 \\
 C_{21}(x, y) & (35,23; 58,13) & &
 \end{aligned}$$

Chiều dày (out-of-plane thickness) của cơ cấu ở đây có giá trị $t = 5$ mm.

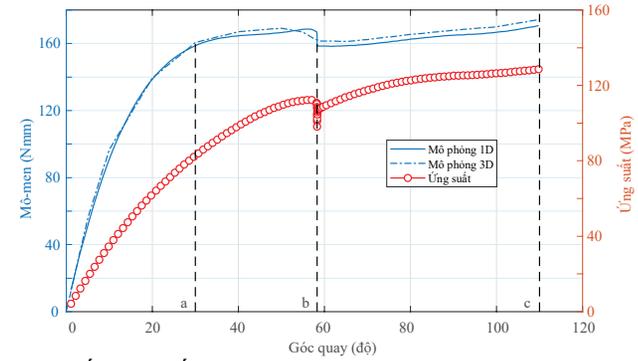


Hình 3.10 Biến dạng đường cong Bezier của CCTM-2 (a) và kết quả mô phỏng 1D từ ABAQUS (b)

Khoảng ổn định mô-men bị chia tách ra làm hai giai đoạn tại vị trí góc quay 58° . Sai số của giá trị mô-men đầu ra của cơ cấu trong toàn bộ khoảng làm việc từ 30° đến 110° lần lượt là 3,8% và 4,3% cho mô hình 1D và 3D.



Hình 3.51 Mô hình 3D của cơ cấu CCTM-2 (a) và kết quả mô phỏng 3D (b)



Hình 3.62 Kết quả mối liên hệ giữa góc quay - mô-men của CCTM-2

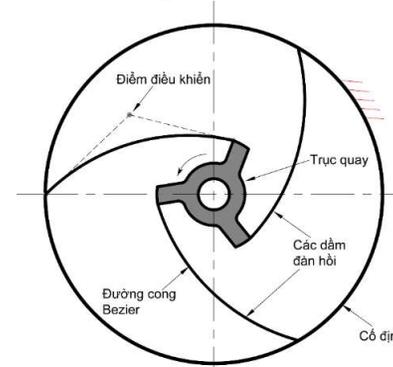
Bảng 3.5 Sai số giá trị mô-men đầu ra

Mô hình	Giá trị trung bình (tại 40°)	Nhỏ nhất (tại 30°)	Lớn nhất (tại 110°)	Sai số lớn nhất (%)
1D	164,5	158,6	170,8	3,8
3D	167,1	160,5	174,3	4,3

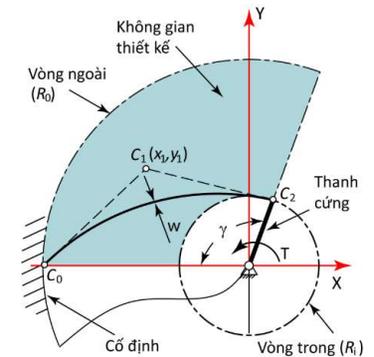
3.2 Tối ưu hóa cơ cấu bằng NSGA-II và CBCM

3.2.1 Thiết kế và tối ưu hóa (CCTM-3)

3.2.1.1 Ý tưởng thiết kế



Hình 3.73 Ý tưởng thiết kế cơ cấu CCTM khoảng ổn định lớn.



Hình 3.14 Biến thiết kế của đường cong Bezier

3.2.1.2 Phân tích mô hình với CBCM

Khi đặt vào một góc quay đầu vào, mô-men phản lực nhận được được biểu thị như sau:

$$T = F_o R_i \cos(\theta - \varphi_{20}) - P_o R_i \sin(\theta - \varphi_{20}) + M_o \quad (3.16)$$

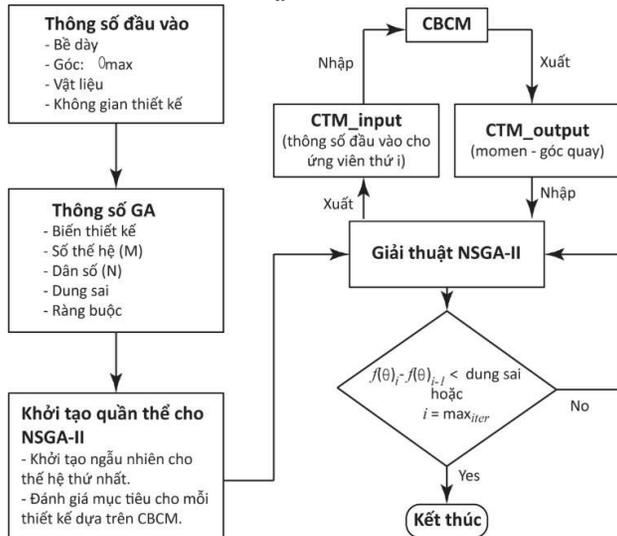
3.2.1.3 Tối ưu hóa

Hai hàm mục tiêu phải được thỏa mãn trong bài toán tối ưu hóa: 1) cực đại hóa hành trình S trong phạm vi mô-men xoắn không đổi, như biểu thức (3.22); 2) giảm thiểu độ lệch giữa mô-men đầu ra và mô-men mong muốn theo biểu thức (3.23).

$$\text{Maximize}(S) \quad (3.22)$$

với $S = b - a$

$$\text{Minimize } f(\theta) = \int_a^b (T - T_e)^2 d\theta \quad (3.23)$$



Hình 3.87 Lưu đồ qui trình tối ưu hóa NSGA-II dựa trên CBCM

Bảng 3.6 Mô hình tối ưu hóa của cơ cấu CCTM hành trình lớn

1. Hàm mục tiêu:

- Cực đại khoảng ổn định mô-men theo phương trình (3.22)
- Cực tiểu sai số mô-men đầu ra theo phương trình (3.23)

2. Biến thiết kế:

- Điểm điều khiển: $C_1(x, y)$
- Bề dày trong mặt phẳng (In-plane thickness): w
- Bán kính: R_o, R_i
- Góc: γ

3. Ràng buộc:

- $g_1: 10 \leq R_i < R_o \leq 50$ (mm)
- $g_2: R_i^2 \leq x_1^2 + y_1^2 \leq R_o^2$
- $g_3: \frac{\pi}{6} \leq \gamma \leq \frac{2\pi}{3}$ (rad)
- $g_4: 0,5 \leq w \leq 1,0$ (mm)
- $g_5: b - a > 65$ (độ)
- $g_6: 190 < T_e < 210$ (Nmm)
- $g_7: \text{Ứng suất lớn nhất trong CCTM, } g_7: \sigma_m < \sigma_y/SF$

PEEK được chọn làm vật liệu cho cơ cấu, có mô đun đàn hồi (E) là 3,58 GPa và hệ số Poisson (ν_p) là 0,3.

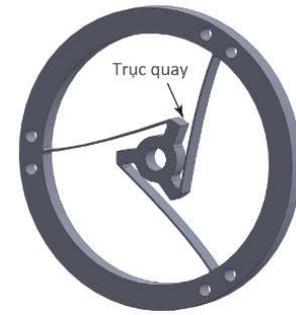
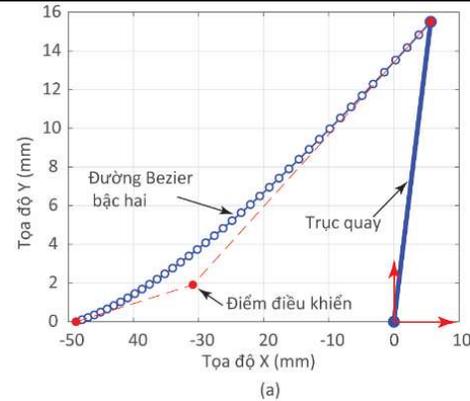
3.2.2 Kết quả và thảo luận

3.2.2.1 Kết quả tối ưu hóa

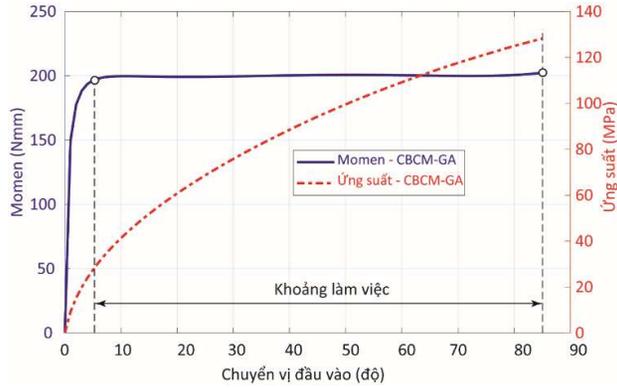
CCTM đề xuất của đề tài đã đạt được khoảng ổn định mô-men rất tốt và rất dài với 80° , trong khoảng từ 5° đến 85° .

Bảng 3.7 Giá trị tối ưu các biến thiết kế của CCTM hành trình lớn

Biến thiết kế	Giá trị	Đơn vị	Biến thiết kế	Giá trị	Đơn vị
$C_1(x, y)$	(-30,9; 1,9)	mm	w	0,66	mm
R_i	16,4	mm	γ	110	độ
R_o	48,8	mm			

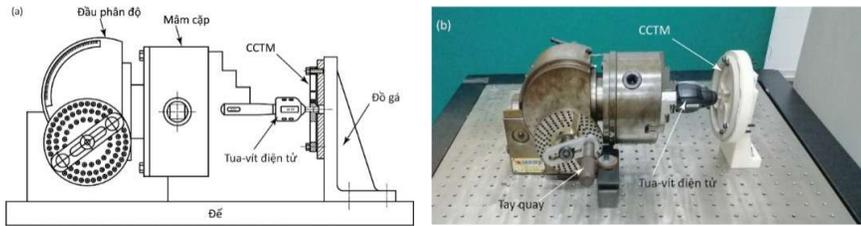


Hình 3.99 Đường cong Bezier tối ưu (a) và mô hình 3D của CCTM (b)



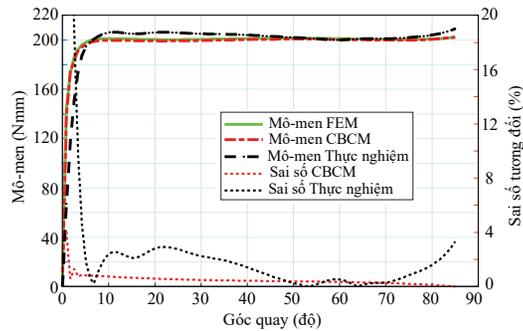
Hình 3.20 Kết quả từ quá trình tối ưu hóa NSGA-II dựa trên CBCM

3.2.2.2 Kiểm chứng kết quả với FEM và thực nghiệm



Hình 3.23 Thiết lập thí nghiệm: (a) thiết kế, (b) thực tế

Độ lệch của mô-men đầu ra trong phạm vi hoạt động lần lượt là 1,5%, 0,7% và 3,7% đối với CBCM, mô phỏng FEM và mô hình thực tế, như được liệt kê trong Bảng 3.8. Ngoài ra, với phạm vi gia tải tương đối nhỏ là 5°, tỷ lệ của khoảng mô-men xoắn không đổi đạt 94,1%.



Hình 3.26 Các kết quả từ CBCM, FEM và thực nghiệm

Bảng 3.8 Sai số giá trị mô-men đầu ra

Mô hình	Giá trị trung bình	Nhỏ nhất (tại 5°)	Lớn nhất (tại 85°)	Sai lệch lớn nhất (%)
CBCM	199,35	196,4	202,3	1,5
FEM	198,3	196,9	199,7	0,7
Thực nghiệm	201,5	194,0	209,0	3,7

Giá trị S^* của hành trình làm việc so với kích thước tổng thể của cơ cấu [24, 107] được dùng làm tiêu chí đánh giá độ nhỏ gọn của cơ cấu:

$$S^* = \frac{S}{D_o} \quad (3.24)$$

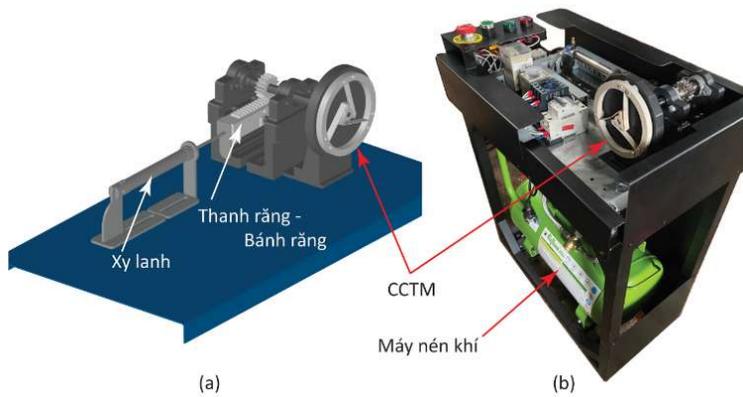
với S là hành trình của cơ cấu, $D_o = 2R_o$, và R_o được thể hiện trên Hình 3.14.

Như thể hiện trong Bảng 3.9, CCTM-3 của đề tài đạt được giá trị lớn nhất với hành trình S và giá trị S^* lớn nhất. Điều này cho thấy rằng thiết kế được đề xuất hoàn thành mục tiêu phạm vi ổn định mô-men lớn hơn trong khi vẫn đảm bảo cấu trúc nhỏ gọn.

Bảng 3.9 So sánh cơ cấu CCTM-3 và các CCTM đã công bố

Công trình	S (độ)	D_o (mm)	S^* (mm/độ)
Bilancia [74]	40	100	0,40
Qiu [71]	26	60	0,43
Prakashah [32]	40	80	0,50
Hou [8]	50	90	0,56
Gandhi [33]	60	80	0,75
CCTM-3 [7]	80	97,6	0,82

3.2.3 Khảo sát môi sơ bộ của cơ cấu CCTM

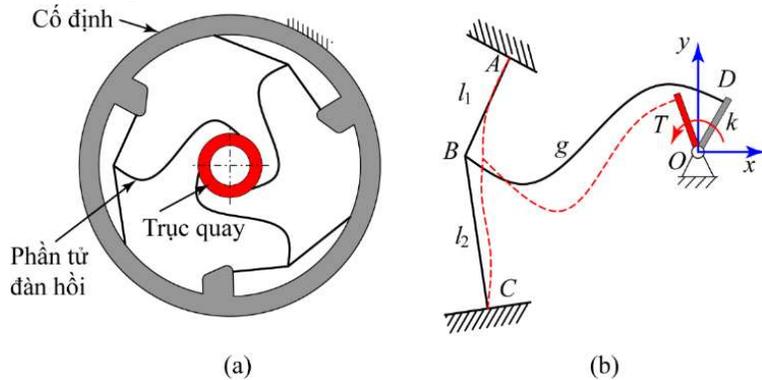


Hình 3.27 Máy thử nghiệm môi cho cơ cấu CCTM: (a) mô hình thiết kế trên CAD; (b) thiết bị thực tế

CHƯƠNG 4 THIẾT KẾ VÀ TỐI ƯU HÓA CƠ CẤU ĐÀN HỒI ỔN ĐỊNH MÔ-MEN DỰA TRÊN ĐỘ TIN CẬY

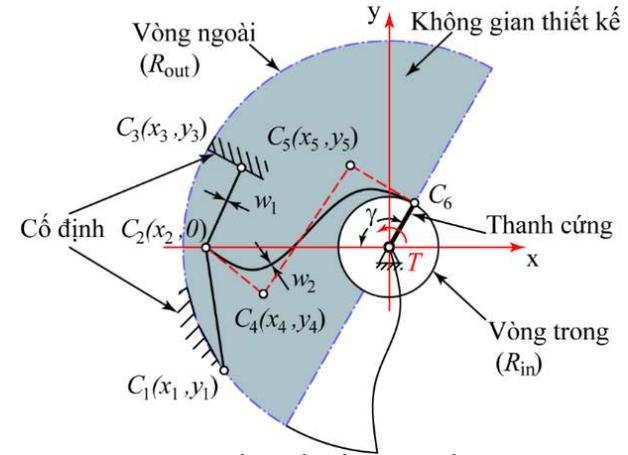
4.1 Thiết kế và tối ưu hóa (CCTM-4)

4.1.1 Ý tưởng thiết kế



Hình 4.1 Ý tưởng thiết kế CCTM-4 với (a) cơ cấu hoàn chỉnh và (b) một nhánh

4.1.2 Phân tích mô hình với CBCM



Hình 4.2 Các biến thiết kế của cơ cấu CCTM-4

Ta xác định được mô-men phản lực nhận được khi tác động một góc quay đầu vào, tính theo biểu thức sau:

$$T = F_o R_{in} \cos(\theta - \alpha_1 - \alpha_2 - \varphi_{19}) - P_o R_i \sin(\theta - \alpha_1 - \alpha_2 - \varphi_{19}) + M_o \quad (4.20)$$

4.1.3 Tối ưu hóa cơ cấu theo độ tin cậy

Hai hàm mục tiêu trong bài toán tối ưu hóa này vẫn tương tự như CCTM-3.

$$\text{Maximize}(S) \quad (4.34)$$

với $S = b - a$

$$\text{Minimize} f(\theta) = \int_a^b (T - T_e)^2 d\theta \quad (4.35)$$

Ngoài hai hàm mục tiêu và các hàm ràng buộc như tối ưu hóa thông thường đã giới thiệu ở trên, bài toán tối ưu hóa này còn có thêm các hàm trạng thái giới hạn (*) dùng cho bước phân tích độ tin cậy.

Bảng 4.1 Mô hình tối ưu hóa CCTM-4 theo độ tin cậy

1. Hàm mục tiêu:

- Cực đại khoảng ổn định mô-men theo phương trình (4.34)
- Cực tiểu sai số mô-men đầu ra theo phương trình (4.35)

2. Hàm trạng thái giới hạn (*):

$$\{G(DVs) - D_0 \leq 0\} \geq \Phi(\beta) \quad (4.36)$$

Với $DVs = \{x_2, y_2, x_4, y_4, x_5, y_5, w_1, w_2\}$

Độ tin cậy $R \geq 99\%$

3. Biến thiết kế:

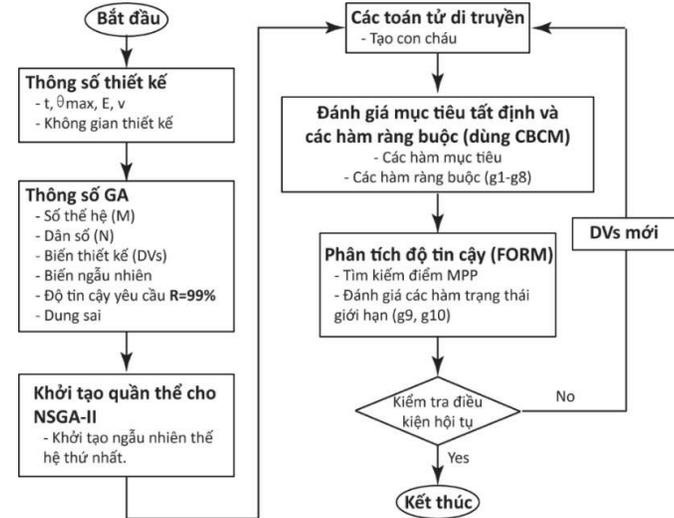
- Tọa độ các điểm điều khiển: $x_1, y_1, x_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, y_5$
- Bề dày trong mặt phẳng (In-plane thickness): w_1, w_2
- Bán kính: R_{in}
- Góc: γ

4. Ràng buộc:

- $g_1: 8 \leq R_{in} \leq 12$ (mm)
- $g_2: R_i^2 \leq x_i^2 + y_i^2 \leq R_{out}^2$ ($R_{out} \leq 50$ và $i = 1, 2, \dots, 5$)
- $g_3: x_2 < x_4 < x_5$
- $g_4: y_1 < 0 < y_3$
- $g_5: \frac{\pi}{4} \leq \gamma \leq \frac{3\pi}{4}$ (rad)
- $g_6: 0,5 \leq w_i \leq 1,0$ (mm) ($i = 1, 2$)
- $g_7: 230 < T_e < 260$ (Nmm)
- viii. Ứng suất lớn nhất trong CCTM, $g_8: \sigma_m < \sigma_y/SF$
- ix. Khoảng làm việc ổn định mô-men (độ): (*)
 $g_9: S - 70 \leq 0$
- x. Sai số của mô-men đầu ra: (*)
 $g_{10}: |T - T_e| - 0,03 \cdot T_e \leq 0$

Các biến ngẫu nhiên trong bài toán tối ưu hóa theo độ tin cậy này sẽ bao gồm các tọa độ $x_2, y_2, x_4, y_4, x_5, y_5$ và hai giá trị bề rộng dầm w_1, w_2 . Độ lệch tiêu chuẩn (STD) là 0,05 (mm).

Phương pháp FORM được chọn để tính toán độ tin cậy trong bước tối ưu này. PEEK được chọn làm vật liệu cho cơ cấu với mô đun đàn hồi (E) là 3,58 GPa và hệ số Poisson (ν_p) là 0,3. Độ dày của cơ cấu được chọn 10,0 mm.



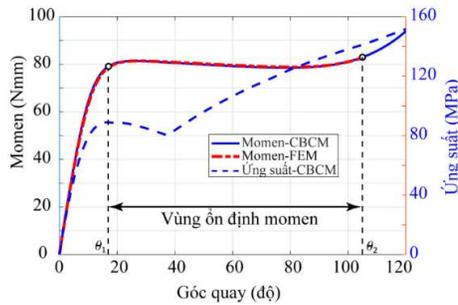
Hình 4.8 Lưu đồ giải thuật tối ưu hóa theo độ tin cậy bằng NSGA-II

4.2 Kết quả tối ưu hóa

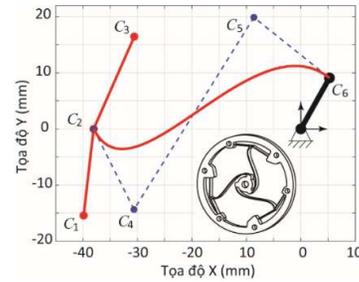
Kết quả của quá trình tối ưu hóa theo độ tin cậy được trình bày trong Bảng 4.2 với giá trị chỉ số độ tin cậy $\beta = 3,0281$ tương đương với độ tin cậy 99,88%. Cơ cấu có khoảng ổn định mô-men lớn với 88° , từ 17° đến 105° , với sai số là 2,8% so với mô-men mong muốn. Do đó, cơ cấu đạt yêu cầu về sai số mô-men đầu ra là 3%.

Bảng 4.2 Giá trị tối ưu các biến thiết kế của CCTM-4

Biến thiết kế	Giá trị	Đơn vị	Biến thiết kế	Giá trị	Đơn vị
(x_1, y_1)	(-39,88; -15,42)	mm	w_1	0,53	mm
x_2	-38,05	mm	w_2	0,60	mm
(x_3, y_3)	(-30,58; 16,45)	mm	R_{in}	10,50	mm
(x_4, y_4)	(-30,64; -14,36)	mm	γ	120	độ
(x_5, y_5)	(-8,63; 19,88)	mm			



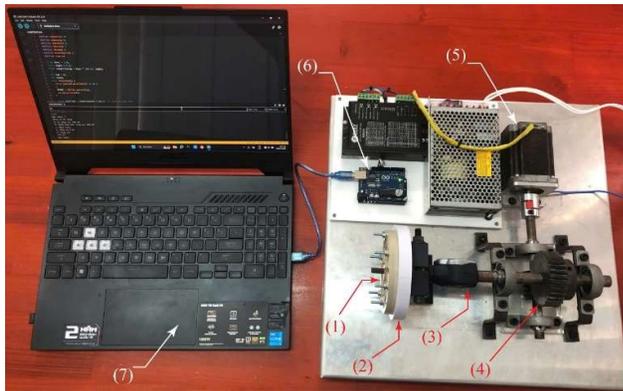
Hình 4.9 Kết quả mô-men, ứng suất thu được từ tối ưu hóa theo độ tin cậy



Hình 4.11 Kết quả tối ưu một nhánh và mô hình 3D của cơ cấu

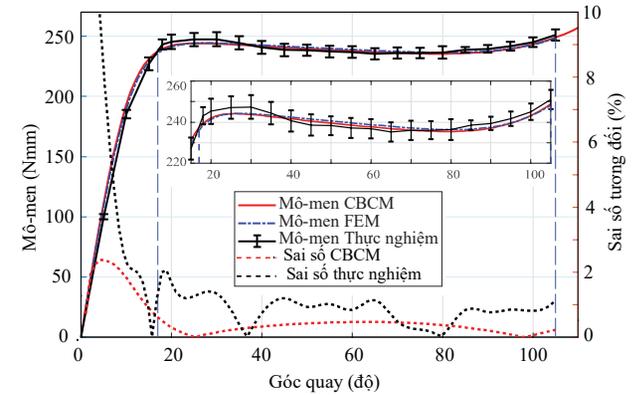
4.3 Kiểm chứng kết quả với FEM và thực nghiệm

Để tiến hành thực nghiệm đo mô-men, một cơ cấu CCTM bằng vật liệu PEEK được gia công bằng phương pháp phay CNC. Cơ cấu thực tế sẽ được scan 3D để so sánh với mô hình thiết kế. Kết quả cho thấy các giá trị bề rộng trung bình của các dầm đều đạt yêu cầu. Xét tổng thể thì STD về vị trí của cả ba đường cong đều nằm trong STD cho phép 0,05.

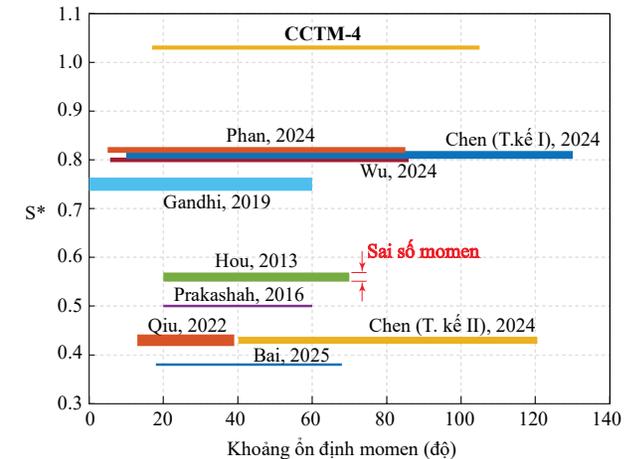


Hình 4.14 Thiết lập thí nghiệm đo mô-men

Sai số lớn nhất của mô-men thực tế là 1,67% xảy ra tại vị trí góc quay 20° . Giá trị trung bình của mô-men thực nghiệm trong khoảng từ 17° đến 105° là $240,4 \text{ Nmm}$. Sai số lớn nhất 2,9% của giá trị trung bình so với giá trị mong muốn xảy ra tại vị trí góc quay 30° với giá trị mô-men tại đây là $247,39 \text{ Nmm}$. Với sai số nhỏ hơn 3% thì cơ cấu thực tế nằm trong sai số cho phép và đảm bảo yêu cầu đặt ra.



Hình 4.16 So sánh mô-men giữa CBCM, FEM và thực nghiệm
Qua Hình 4.18, có thể thấy thiết kế đã hoàn thành được mục tiêu thiết kế.



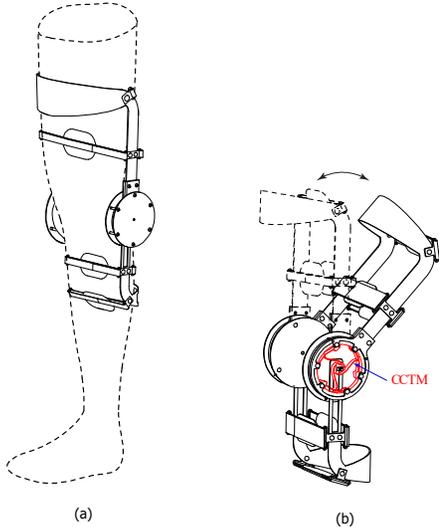
Hình 4.18 So sánh cơ cấu CCTM-4 với các CCTM đã công bố

CHƯƠNG 5 ỨNG DỤNG CƠ CẤU ĐÀN HỒI ỔN ĐỊNH MÔ-MEN VÀO THỰC TẾ

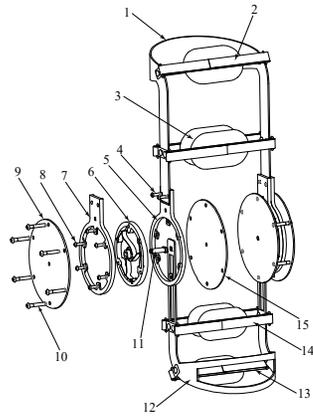
5.1 Tiêu chuẩn về ứng dụng các thiết bị trong cơ sinh học

Việc thiết kế và ứng dụng các cơ cấu đàn hồi trong lĩnh vực cơ sinh học đòi hỏi tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn kỹ thuật nhằm đảm bảo an toàn sinh học, độ tin cậy cơ học và tính an toàn khi thiết bị tương tác với con người.

5.2 Thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối



Hình 5.1 Thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối tích hợp cơ cấu CCTM đang được mang trên chân người (a) và cách thức thiết bị hoạt động (b)



Hình 5.2 Cấu tạo thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối tích hợp CCTM

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

6.1 Kết luận

Luận án đã đóng góp một số điểm mới có ý nghĩa cả về mặt phương pháp luận và ứng dụng thực tiễn trong thiết kế cơ cấu đàn hồi ổn định mô-men.

Thứ nhất, luận án đã phát triển ba quy trình tổng hợp cơ cấu CCTM được thực hiện hoàn toàn tự động trên phần mềm MATLAB. Thông qua các quy trình này, bốn thiết kế CCTM mới đã được tổng hợp với các chỉ tiêu về sai số của mô-men đầu ra, khoảng ổn định mô-men và kích thước nhỏ gọn được cải thiện đáng kể khi so sánh với các công trình nghiên cứu khác về CCTM.

- **Quy trình thứ nhất** sử dụng thuật toán di truyền GA kết hợp với phương pháp phần tử hữu hạn FEM trên phần mềm ABAQUS để tổng hợp hai CCTM mới. Trong đó, CCTM-2 đạt được phạm vi hoạt động lên đến 110° , với khoảng ổn định mô-men từ 30° đến 110° . Đặc biệt, CCTM-2 giới thiệu phương pháp thiết kế mới bằng cách xếp chồng các dầm đàn hồi theo lớp và

cho biến dạng tuần tự, giúp mở rộng hành trình làm việc mà vẫn đảm bảo không vượt quá giới hạn đàn hồi của vật liệu.

- **Quy trình thứ hai** xây dựng mô hình toán học của CCTM dựa trên phương pháp CBCM để tính toán chuyển vị, mô-men và ứng suất, sau đó tích hợp vào thuật toán di truyền đa mục tiêu NSGA-II. Cách tiếp cận này giúp cải thiện đáng kể hiệu suất tối ưu hóa, giảm thời gian tính toán, đồng thời cho ra thiết kế CCTM-3 với kết cấu nhỏ gọn nhưng vẫn đạt hành trình ổn định mô-men lên đến 80° . Đáng chú ý, tỷ lệ ổn định mô-men của CCTM-3 đạt 94,1% trên toàn bộ phạm vi hoạt động, với mô-men ổn định xấp xỉ 200 Nmm. Sai số mô-men đầu ra chỉ khoảng 1,5% đối với mô hình lý thuyết và mô phỏng, và 3,7% khi so sánh với mô hình thực nghiệm.
- **Quy trình thứ ba** tích hợp phương pháp CBCM, phân tích độ tin cậy FORM và thuật toán di truyền NSGA-II để tối ưu hóa CCTM theo độ tin cậy. Với quy trình này, các yếu tố ngẫu nhiên ảnh hưởng đến hành dạng, kích thước của các dầm đàn hồi do sai số trong quá trình gia công gây ra được xét đến nhằm đảm bảo cơ cấu nhận được sau gia công luôn đảm bảo các mục tiêu thiết kế. Kết quả thu được là CCTM-4 với kích thước cực kỳ nhỏ gọn nhờ áp dụng bản lề linh hoạt tại một đầu dầm cong, thay thế liên kết ngàm truyền thống, giúp giảm ứng suất tập trung và kích thước cơ cấu. CCTM-4 đạt khoảng ổn định mô-men lên đến 88° , với sai số mô-men đầu ra dưới 3% so với giá trị mong muốn ở độ tin cậy 99,88%. Điều này khẳng định tính đúng đắn và tiềm năng của phương pháp tối ưu hóa theo độ tin cậy trong thiết kế CCTM.

Thứ hai, thông qua các quy trình tổng hợp CCTM, luận án thể hiện đóng góp mới trong việc ứng dụng phương pháp CBCM, một công cụ mạnh mẽ có độ chính xác cao trong việc phân tích biến dạng lớn của các dầm đàn hồi có hình dạng đường cong bất kỳ. Đồng thời tích hợp CBCM vào giải thuật tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA-II. Nhờ khả năng rút ngắn đáng kể thời gian tính toán so với các phương pháp phần tử hữu hạn truyền thống, CBCM đã giúp tăng hiệu quả của các giải thuật tối ưu, cho phép xác định nhanh chóng và chính xác các thiết kế tối ưu của cơ cấu.

Thứ ba, luận án đã ứng dụng thành công phương pháp phân tích độ tin cậy FORM vào giải thuật tối ưu hóa đa mục tiêu NSGA-II dựa trên phân tích biến dạng theo CBCM tạo thành bài toán tối ưu hóa theo độ tin cậy. Phương pháp này giúp tìm ra các thiết kế tối ưu có độ tin cậy cao, đảm bảo cơ cấu khi được chế tạo vẫn đảm bảo các mục tiêu thiết kế dù có các sai số ngẫu nhiên xảy ra trong quá

trình gia công. Quy trình tối ưu hóa theo độ tin cậy này sẽ mở ra hướng nghiên cứu mới cho các cơ cấu đàn hồi nói chung và cơ cấu CCTM nói riêng.

Thứ tư, luận án đã xây dựng các nền tảng thực nghiệm phục vụ cho việc đánh giá và hoàn thiện cơ cấu CCTM trong các nghiên cứu tiếp theo. Cụ thể, một hệ thống thử nghiệm tải lặp đã được thiết kế và chế tạo nhằm khảo sát bước đầu ứng xử làm việc của cơ cấu dưới tác động của chu kỳ tải, đồng thời một phương pháp đánh giá sai số gia công về hình dạng và kích thước của các dầm cong bất kỳ đã được đề xuất, góp phần nâng cao độ chính xác khi chế tạo các cơ cấu đàn hồi có hình học phức tạp.

Thứ năm, về mặt ứng dụng, luận án đã đề xuất một thiết bị hỗ trợ chức năng khớp gối tích hợp CCTM, nhằm cải thiện khả năng vận động của người suy giảm chức năng khớp gối. Mặc dù vẫn đang dừng lại ở ý tưởng nhưng qua các phân tích cho thấy CCTM có lợi thế hơn so với lò xo truyền thống, giúp người dùng dễ dàng hơn trong các hoạt động hàng ngày như đi lại hay leo cầu thang. Do đó, ý tưởng này đã được đăng ký bảo hộ độc quyền sáng chế và đang được NCS tiếp tục phát triển.

6.2 Hướng phát triển

- Nghiên cứu tiếp tục thu nhỏ kích thước CCTM nhằm tăng khả năng ứng dụng thực tế, đồng thời tìm kiếm các vật liệu hoặc phương pháp cải thiện giá trị mô-men, hướng tới các thiết bị hỗ trợ chức năng khớp có yêu cầu mô-men lớn như khớp gối.
- Nghiên cứu về phương pháp gia công CCTM sao đạt độ chính xác cao hơn, kinh tế hơn.
- Phát triển các nghiên cứu chuyên sâu về độ bền mỏi của CCTM, đồng thời đề xuất các phương pháp giảm ứng suất và tăng tuổi thọ làm việc của cơ cấu, đặc biệt trong điều kiện tải trọng lặp đi lặp lại như CCTM.