

CẤU TRÚC XOẮN CHO CƠ CẤU CHUYỂN ĐỘNG MICRO DỰA TRÊN CƠ CẤU TUẦN THỦ

A TWIST STRUCTURE FOR MICRO-ACTUATOR BASED ON FLEXURE MECHANISMS

Trần Quang Phước

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Các cơ cấu chấp hành dịch chuyển micro được tạo ra bằng cách sử dụng tính chất uốn cong của các thành phần để đạt được chuyển động mong muốn. Lợi ích của cơ cấu linh hoạt bao gồm chuyển động chính xác và độ chính xác cao, cấu trúc nhẹ, không ma sát và nhỏ gọn. Nghiên cứu này sử dụng đường cong nội suy spline để cấu hình hình học khớp nối linh hoạt của cấu trúc xoắn, chuyển đổi chuyển động quay thành chuyển động tuyến tính. Mô hình được đề xuất đã được đánh giá và mô phỏng bằng cách sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn. Hơn nữa, phương pháp tiếp cận tối ưu hóa thuật toán lai Taguchi-Grey đã được kết hợp để thu được đầu ra dịch chuyển lớn và phản lực lớn. Ma trận trực giao của Taguchi được sử dụng để thiết kế ma trận thí nghiệm. Phân tích quan hệ xám được phát triển để xác định giá trị phù hợp cho đầu ra dịch chuyển và phản lực. Phương pháp entropy được sử dụng để tính trọng số tương đối của mỗi mục tiêu phản ứng và cải thiện độ chính xác đánh giá. Hơn nữa, phương pháp phân tích hồi quy được sử dụng để thiết lập quan hệ ràng buộc phi tuyến tính của mỗi biến đầu vào với bậc quan hệ xám. Kết quả cho thấy bậc quan hệ xám cao hơn với các mức kết hợp mới. Mô phỏng xác thực và thí nghiệm đã được thực hiện để đánh giá tác động của phương pháp.

Từ khóa: Cơ cấu tuần thủ; Bộ dịch chỉnh micro; Cơ cấu mềm.

ABSTRACT

Compliant micro-positioning actuators are created by utilizing the bending properties of compliant members to achieve desired motions. The advantages of flexure mechanisms include precise motion and high accuracy, lightweight structure, frictionless operation, and compact size. This research utilizes spline interpolation curves to configure the compliant joint geometry of a helical structure, converting rotational motion into linear motion. The proposed design is evaluated and simulated using the finite element method. Moreover, a Taguchi-Grey relational analysis-based optimization approach is incorporated to obtain large displacement output and high reaction force. The Taguchi orthogonal array is used to design the experimental matrix. Grey relational analysis is carried out to determine the suitable values for displacement output and reaction force. The entropy method is employed to calculate the relative weight of each response objective and improve the accuracy of evaluation. Furthermore, regression analysis is utilized to establish the nonlinear relationship of each input variable with the grey relational grade. The results reveal a higher grey relational grade with the new levels of combination. Validation simulations and experiments are conducted to evaluate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Compliant mechanism; Micro-positioning stage; Flexure mechanism.

1. GIỚI THIỆU

Cơ cấu linh hoạt được chế tạo bằng cách sử dụng tính chất uốn cong của vật liệu để tạo ra các chuyển động mong muốn [1]. Để tạo ra chuyển động với nhiều bậc tự do, các cấu trúc đồng phẳng với hai bậc tự do đã được phát triển, thể hiện độ phân giải vài nanomet [2] và hành trình đáng kể [3]. Lý thuyết về bộ khuếch đại đa cấp đã được đề xuất với khớp nối chữ Z, đạt được tỷ lệ khuếch đại gấp 13 lần [4]. Để kiểm soát tốt hơn chất lượng, năng suất và chi phí của quy trình, tối ưu hóa là một cách tiếp cận mạnh mẽ để nâng cao chất lượng sản phẩm với chi phí thấp hơn một cách thỏa đáng. Phân tích quan hệ xám [5] là một trong những phương pháp hiệu quả và hữu ích nhất để giải quyết các bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu.

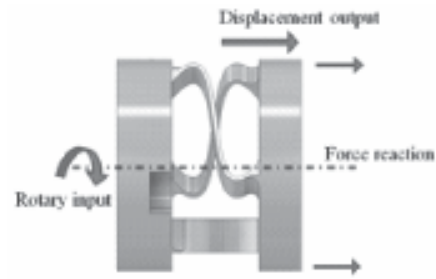
Nghiên cứu đã giới thiệu một khái niệm mới về việc sử dụng các đường cong nội suy spline để thiết kế hình dạng khớp nối linh hoạt của cấu trúc xoắn ốc hình trụ có thể trực tiếp chuyển đổi chuyển động quay thành chuyển động tuyến tính. Mô hình được đề xuất đã được phân tích và mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và chúng tôi đã sử dụng phương pháp tiếp cận tối ưu hóa lai kết hợp thuật toán Taguchi, xám (TGrey) để đạt được công suất đầu ra dịch chuyển và phản lực tối đa.

2. CƠ CẤU CHẤP HÀNH TUYẾN TÍNH

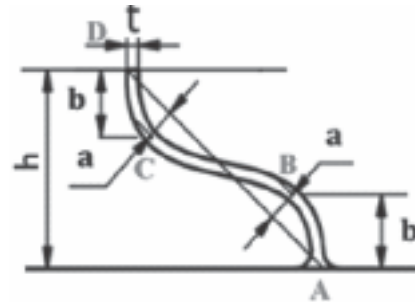
Trong nghiên cứu này, một cơ cấu chấp hành tuyến tính tuân thủ mới đã được phát triển để biến đổi trực tiếp chuyển động quay thành chuyển động tịnh tiến tuyến tính.

Một đường cong nội suy spline, như được hiển thị trong Hình 1b, đã được sử dụng để thiết kế hình dạng của cấu trúc xoắn.

cứu cũng phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học của cấu trúc, bao gồm độ dày của đường cong nội suy spline (t), chiều cao của đường cong nội suy spline (h) và vị trí của hai điểm của đường cong nội suy spline (B , C), chẳng hạn như khoảng cách (a) và khoảng cách (b), trên phản lực và dịch chuyển đầu ra.



a) Mô hình và nguyên lý làm việc



b) Thanh xoắn

Hình 1. Cấu trúc cơ cấu

3. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

*Phương pháp Taguchi: Là một công cụ mạnh mẽ trong việc thiết kế tham số, đảm bảo cấu trúc thiết kế hợp lý và hiệu quả, tiết kiệm thời gian và chi phí, đồng thời giải quyết vấn đề với số lần thử nghiệm tối thiểu. Tùy thuộc vào mục tiêu của phản hồi hiệu suất, nó được hiển thị như:

Càng thấp càng tốt được chọn khi yêu cầu của đầu ra phản hồi càng thấp càng tốt.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_i^2 \right) \quad (1)$$

Càng cao càng tốt được chọn khi yêu cầu của đầu ra phản hồi càng cao càng tốt.

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i^2}\right) \quad (2)$$

Danh nghĩa là tốt nhất được chọn khi yêu cầu của hệ thống cần giảm biến.

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (g_i - g_0)^2\right) \quad (3)$$

Trong đó, g_i là phản ứng chất lượng, i là số thí nghiệm, m là số thí nghiệm và g_0 là giá trị mục tiêu của phản hồi.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã quan sát thấy rằng tỷ lệ S/N càng cao thì phản hồi chất lượng càng tốt. Mục tiêu của tham số thiết kế là càng cao càng tốt vì độ dịch chuyển lớn và phản lực cao sẽ tăng khả năng của cơ cấu chấp hành tuyến tính tuân thủ. Ứng suất của kết cấu cũng là một yếu tố quan trọng; càng thấp càng tốt là mục tiêu mong muốn của yếu tố ứng suất. Tuy nhiên, để đạt được phạm vi tốt hơn về giá trị dịch chuyển và phản lực, cần giảm thiểu các điều kiện biên đồng thời đảm bảo rằng giá trị ứng suất vẫn nằm trong giới hạn cho phép, điều này có nghĩa là nhỏ hơn ứng suất giới hạn của vật liệu. Ngoài ra, dựa trên phân tích phương sai (ANOVA), tác động của mỗi tham số đến phản hồi đầu ra đã được so sánh và đánh giá. Sau đó, phân tích quan hệ xám được sử dụng để tái tạo các phản hồi từ đầu ra dịch chuyển và phản lực thành một mục tiêu duy nhất bằng cách sử dụng quan hệ xám.

*Phân tích quan hệ xám (GRA): Nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc tối ưu hóa các tham số thiết kế hình học của SIC để tối đa hóa hiệu suất phản hồi, bao gồm đầu ra dịch chuyển và phản lực. Các tham số thiết kế được phân tích là độ dày (t), chiều cao (h), khoảng cách (a) và khoảng cách (b). Các bước sau đây đã được thực hiện để đạt được mục tiêu này [5]:

Bước 1: Bước đầu tiên của phương pháp liên quan đến xử lý dữ liệu trước, trong đó các giá trị đầu ra dịch chuyển và phản lực được chuẩn hóa. Nghiên cứu nhằm mục đích tối đa hóa hiệu suất của các giá trị này, với mục tiêu “càng cao càng tốt”.

$$x_i^*(g) = \frac{x_i^0(g) - \min x_i^0(g)}{\max x_i^0(g) - \min x_i^0(g)} \quad (4)$$

Bước 2: Việc tính toán hệ số quan hệ xám (GRC) liên quan đến việc chuẩn hóa dữ liệu đầu ra dịch chuyển và phản lực, được thực hiện trong bước xử lý trước dữ liệu. Trong nghiên cứu này, mục tiêu là đạt được giá trị cao hơn cho cả đầu ra dịch chuyển và phản lực.

$$\zeta(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(g) + \xi \Delta_{\max}} \quad (5)$$

Bước 3: Bậc quan hệ xám (GRG) thu được bằng cách lấy trung bình cộng các GRC tương ứng với hai đặc trưng.

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{g=1}^n w_g \zeta_i(g) \quad (6)$$

Trong đó, w_g thể hiện tầm quan trọng tương đối của hệ số g trong kịch bản thực tế. Nó được sử dụng để gán trọng số cho các yếu tố khác nhau dựa trên mức độ quan trọng của chúng.

Tiếp theo, ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến phản hồi đầu ra đã được đánh giá và so sánh bằng ANOVA. Phân tích này cung cấp thông tin về tỷ lệ phần trăm đóng góp của mỗi yếu tố, cũng như thống kê tương ứng (F) và xác suất (P). Để cải thiện độ chính xác và độ tin cậy của kết quả, phân tích trọng số của đầu ra phản hồi đã được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp entropy. Không giống như nhiều

ngiên cứu trước đây, phương pháp này được sử dụng để xác định trọng số của các phản hồi đầu ra.

Bước 4: Trọng số entropy.

Phương pháp entropy là một phương pháp dựa trên lý thuyết xác suất được sử dụng để giải quyết các vấn đề mơ hồ. Nó được biết đến với độ chính xác và độ tin cậy trong việc xác định trọng số cho các phản hồi đầu ra [5]. Giá trị entropy (E_g) được tính bằng công thức sau:

$$E_g = - \frac{\sum_{w=1}^h p_{wg} \ln(p_{wg})}{\ln(h)}, \quad (7)$$

$$w \in \{1, 2, \dots, h\}, g \in \{1, 2, \dots, k\}$$

Mức độ lệch (d_g) của dữ liệu gốc được cho bởi tương quan với xếp hạng gán trên điểm tham chiếu pug có thể được biểu thị là:

$$d_g = 1 - E_g, g \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (8)$$

Giá trị của d_g biểu thị cường độ tương phản ban đầu của p_{wg} và trọng số entropy có thể được tính như sau:

$$w_g = \frac{d_g}{\sum_{g=1}^n d_g}, g \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (9)$$

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

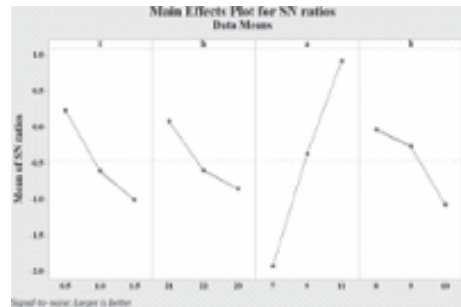
Nghiên cứu sử dụng mảng trực giao L27 để thiết kế ma trận thí nghiệm, bao gồm bốn yếu tố và mỗi yếu tố có ba mức, dựa trên các thông số được liệt kê trong Bảng 1.

Đầu ra dịch chuyển và phản lực được phân tích bằng Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trong phần mềm ANSYS với đầu vào quay 1 độ.

Trong hình 2, tỷ lệ SN cao nhất của mỗi yếu tố cho đầu ra dịch chuyển được quan sát ở t0.5h21a11b8, và độ lệch cao nhất là 2.846.

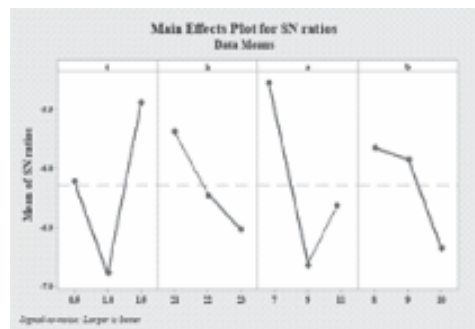
Bảng 1. Các mức giá trị biến đầu vào

Yếu tố	Đơn vị	Mức độ		
		1	2	3
Độ dày (t)	mm	0.5	1	1.5
Chiều cao (h)	mm	21	22	23
Khoảng cách (a)	mm	7	9	11
Khoảng cách (b)	mm	8	9	10



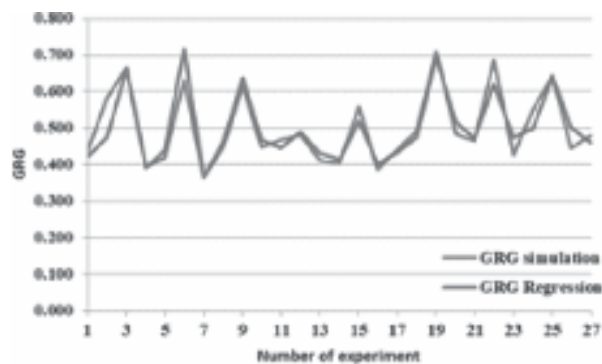
Hình 2. Biểu đồ ảnh hưởng chính của tỷ số SN đối với đầu ra dịch chuyển

Kết quả của GRC và GRG bằng cách sử dụng (4) và (8), giá trị trọng số được tính bằng (12). Kết quả mô phỏng cho trường hợp thứ 19 cho thấy giá trị GRG cao nhất, cho thấy thứ hạng vượt trội của nó. Mức kết hợp tối ưu của mỗi yếu tố được xác định là t1.5h21a7b8 từ hình 3, với độ lệch cao nhất là 1.548.



Hình 3. Biểu đồ ảnh hưởng chính của tỷ số SN đối với GRG

Từ kết quả phân tích ANOVA, hình 4 minh họa mối tương quan giữa kết quả mô phỏng và phương trình hàm hồi quy của GRG.



Hình 4. Mô phỏng và phương trình hồi quy của GRG

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, bằng cách sử dụng đường cong nội suy spline để thiết kế bản lề uốn của cấu trúc xoắn ốc, chuyển động quay được chuyển đổi trực tiếp thành chuyển động tuyến tính, mang lại hiệu quả tích cực.

Kết quả cho thấy, phương pháp cơ cấu uốn dịch chuyển và quay không gian, kết hợp với phương pháp tối ưu hóa lai có thể nâng cao đáng kể quy trình thiết kế cho bộ vi thao tác và các ứng dụng khác. ❖

Ngày nhận bài: **15/9/2024**

Ngày phản biện: **24/10/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. L. L. Howell, “Compliant mechanisms”. In 21st century kinematics, ed: Springer, 2013, pp. 189-216.
- [2]. Y. Li and Q. Xu, “Optimal design of a novel 2-DOF compliant parallel micromanipulator for nanomanipulation”. In IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2005., 2005, pp. 118-123.
- [3]. K. Folkersma, S. Boer, D. Brouwer, J. Herder, and H. Soemers, “A 2-DOF large stroke flexure based positioning mechanism”. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2012, pp. 221-228.
- [4]. W. L. Zhu, Z. Zhu, Y. Shi, X. Chen, Y. He, K. F. Ehmann, et al., “A novel piezoelectrically actuated 2-DoF compliant micro/nano-positioning stage with multi-level amplification”. Rev Sci Instrum, vol. 87, p. 105006, Oct 2016.
- [5]. D. Julong, “Introduction to grey system theory”. The Journal of Grey System, vol. 1, pp. 1-24, 1989.