

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO CƠ CẤU TẠO VI CHUYỂN ĐỘNG THẲNG

DESIGN AND FABRICATION OF MICRO LINEAR ACTUATOR

Phạm Huy Hoàng

Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Cơ cấu tạo vi chuyển động thẳng được sử dụng cho nhiều lĩnh vực chính xác như định vị chính xác, gia công chính xác, quang khắc. Việc thiết kế cơ cấu tạo chuyển động thẳng cấp micro mét được trình bày trong bài báo này. Cơ cấu vi chuyển động thẳng bao gồm một piezo nhiều lớp và một cơ cấu đòn hồi khuếch đại vi sai. Việc mô phỏng sự làm việc của cơ cấu được thực hiện qua mô hình phần tử hữu hạn trước khi chế tạo. Hai vấn đề, tiếp xúc và liên kết biến dạng-điện, được phân tích dựa trên mô hình ANSYS để có được mối quan hệ giữa độ dịch chuyển, điện áp điều khiển và tải tác dụng lên cơ cấu. Việc chế tạo và các thí nghiệm ban đầu được thực hiện để xác minh thiết kế đề xuất.

Từ khóa: *Cơ cấu đòn hồi; Cơ cấu khâu cứng tương đương.*

ABSTRACT

Micro linear actuators are applied to many precision fields such as ultra-precise positioning, precision manufacturing, optics, etc. The design of a micro-linear actuator is presented in this paper. The micro linear actuator includes a stacked piezo and a flexure-based differential amplifier mechanism. The simulation of the designed actuator is also performed before fabrication. Two problems, contact and strain-electricity coupling, are analyzed based on the ANSYS model to get the relation between the displacement, the controlled voltage and the load applied on the actuator. The fabrication and the initial experiments are performed to verify the proposed design.

Keywords: *Flexure mechanism; Pseudo rigid body mechanism.*

1. GIỚI THIỆU

Cơ cấu tạo vi chuyển động thẳng (CCVCĐT) có thể được ứng dụng cho các lĩnh vực như gia công chính xác, kết nối cáp quang, quang khắc, công nghệ sinh học, v.v. Gần đây, CCVCĐT được phát triển dựa trên các nguyên tắc sâu đo (Inchworm) [1, 2], dính-trượt (Stick-Slip) [3], nam châm hút nhỏ [4] hoặc sự kết

hợp giữa dính-trượt và vít siêu chính xác (Micro screw) [5], động cơ đặc biệt hoặc bộ truyền động điện từ với cơ cấu khuếch đại [6, 8]. CCVCĐT được phát triển có tải trọng nhỏ (loại dính-trượt) hoặc phạm vi hoạt động nhỏ (loại sâu đo hoặc loại cơ cấu chấp hành dùng vật liệu áp điện - piezo) hoặc độ phân giải thấp và độ cứng thấp (loại nam châm hút nhỏ). Khớp đòn hồi có ưu điểm là không ma sát và không

có khe hở nên cơ cấu khuếch đại được thiết kế dựa trên cơ cấu đàn hồi. Gần đây, Hwee Choo Liaw sử dụng cơ cấu bốn khâu bản lề đàn hồi được kích hoạt bằng áp điện như một thiết bị định vị phụ [9]. Hầu hết CCVCĐT được thiết kế dựa trên một cơ cấu chấp hành áp điện kết hợp cơ cấu khuếch đại đàn hồi [10-12]. Cơ cấu chấp hành áp điện có phạm vi giới hạn (dưới 200 μm). Do đó, để có được hành trình dài (500 – 1000 μm), các CCVCĐT gần đây được thiết kế với một hệ thống đòn bẩy liên tiếp dựa trên các khớp bản lề đàn hồi. Tỷ số khuếch đại lớn sẽ cần nhiều đòn bẩy gây ra kích thước lớn. Có rất nhiều cải tiến của cơ cấu khuếch đại đàn hồi để có kích thước nhỏ hơn và hành trình dài hơn. Bài báo này, trình bày thiết kế của một CCVCĐT dựa trên cơ cấu chấp hành áp điện nhiều lớp và cơ cấu khuếch đại vi sai kiểu đòn hồi để có tỷ lệ khuếch đại tốt hơn. Sau phần thiết kế mô hình, trong phần 2, phân tích độ cứng và ứng dụng của nó được trình bày trong phần 3. Phần 4 trình bày mô phỏng hoạt động của CCVCĐT bằng ANSYS. Cuối cùng, phần 5 cho thấy quá trình chế tạo và thử nghiệm.

2. THIẾT KẾ MÔ HÌNH

2.1. Cơ cấu khâu cứng tương đương

Cơ cấu tạo vi chuyển động thẳng dựa trên cơ cấu áp điện nhiều lớp có tải trọng cao (lên đến 10 KN) và phạm vi hoạt động ngắn (<100 μm). Chuyển động của đầu ra sẽ được khuếch đại bằng đòn bẩy vi sai. Thông thường, một đòn bẩy (Hình 1-a) có đầu ra:

$$o = \frac{n}{m} i, \quad (1)$$

Trong đó o , i : Chuyển động đầu ra và đầu vào và m , n là kích thước của đòn bẩy.

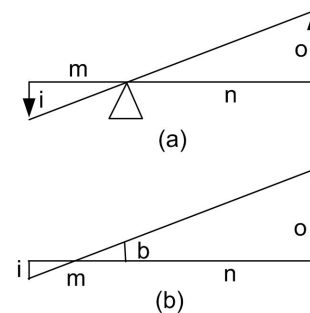
Để tăng độ phóng đại của đòn bẩy, điểm

tựa được cung cấp một chuyển động nhỏ b như trong Hình 1-b và đầu ra là:

$$o = \frac{m+n}{m} b + \frac{n}{m} i, \quad (2)$$

Cơ cấu khâu cứng khuếch đại vi sai được tổng hợp dựa trên ý tưởng trên. Cơ cấu bao gồm một đòn bẩy duy nhất và một đòn bẩy bổ sung cung cấp chuyển động cho điểm tựa của đòn bẩy đầu tiên (Hình.2). Đầu ra được tính lý tưởng là:

$$o = \frac{2m+4n}{m} i, \quad (3)$$



Hình 1: a) Đòn bẩy đơn và b) Đòn bẩy vi sai.

2.2. Cơ cấu khuếch đại vi sai đòn hồi

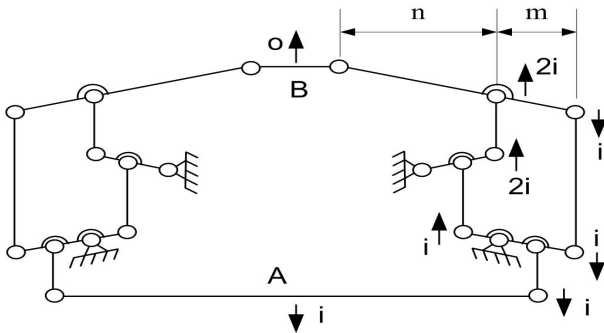
Các khớp truyền thống không phù hợp với chuyển động siêu nhỏ do có khe hở sẽ được thay bởi các khớp bản lề đàn hồi (flexure pivot). Khớp đàn hồi có hình dạng như Hình 3 làm việc nhờ sự biến dạng đàn hồi tại vị trí mảnh/hẹp của kết cấu vật liệu chứ không phải từ các sự trượt hay xoay như ở các khớp truyền thống. Cơ cấu khâu cứng trong Hình 2 được thay đổi bằng cơ cấu đàn hồi như trong Hình 4. Cơ chế trong cấu trúc nguyên khối khuếch đại biến dạng của piezo nhiều ngăn thành chuyển động phạm vi lớn hơn của liên kết dẫn động.

Cơ cấu đàn hồi được thiết kế theo hai bước:

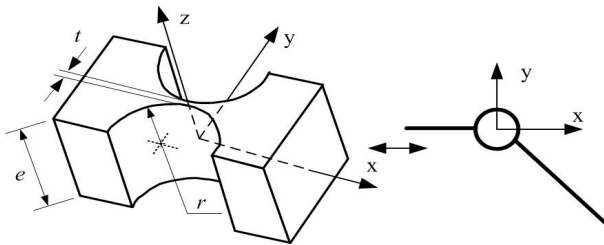


• Tối ưu hóa độ cứng sử dụng cơ cấu khâu cứng tương đương với ràng buộc độ khuếch đại 10 lần;

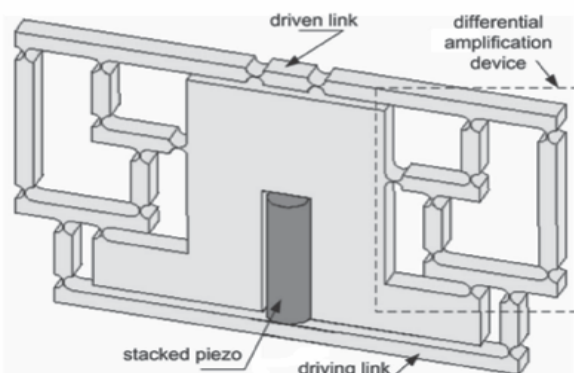
• Tối ưu hóa độ khuếch đại với ràng buộc độ bền $S_{\max} \leq S_y$ ($S_{\max}$: Ứng suất Von Mises lớn nhất, S_y : Ứng suất chảy dẻo - yield stress).



Hình 2. Cơ chế khâu cứng khuếch đại vi sai.



Hình 3. Khớp bản lề đàn hồi.



Hình 4. Cơ cấu khuếch đại vi sai kiểu đàn hồi.

Hợp kim nhôm 6061-T6 ($E = 68900 \text{ N/mm}^2$, hệ số Poisson $\alpha = 0,35$ và ứng suất chảy dẻo $S_y = 500 \text{ MPa}$) được chọn làm vật liệu của

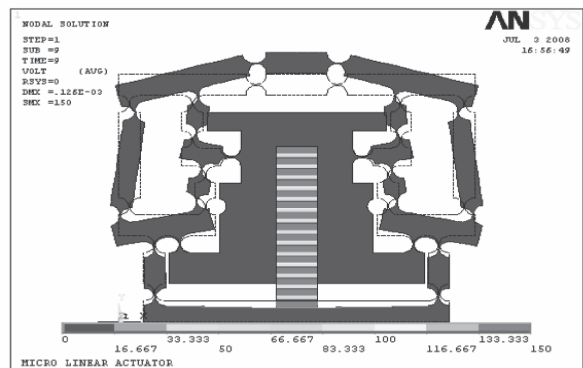
cơ cấu đàn hồi khi mô phỏng và chế tạo vì nó có tỷ lệ S_y/E cao (bền và dẻo dai) và giá thành thấp so với thép không gỉ và titan.

3. MÔ PHỎNG

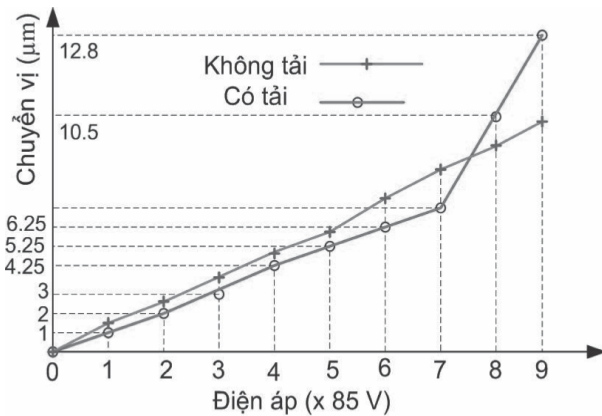
Trong mô phỏng, một cơ cấp áp điện (piezo) nhiều lớp (chiều dài $L = 90 \text{ mm}$, 400 lớp hình chữ nhật, kích thước lớp: cạnh - 20 mm và độ dày - $0,225 \text{ mm}$) được sử dụng dẫn động CCVCDT. Vật liệu áp điện Zirconate Titanate 5H4E có hằng số biến dạng đàn hồi $E = 5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, hằng số điện môi $K^T_3 = 3800$, hằng số áp điện $d_{33} = 650 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ và $d_{31} = -320 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ và tỷ trọng 7800 Kg/m^3 . Sự biến dạng của lớp được giả định là theo hướng dọc trục và phụ thuộc vào điện áp chứ không theo độ dày. Mô phỏng được thực hiện dựa trên mô hình ANSYS với hai bài toán: (1) Sự ghép nối (coupling) giữa điện áp và biến dạng của piezo; (2) Sự tiếp xúc (contact) giữa piezo và khâu dẫn của cơ cấu khuếch đại.

Độ dịch chuyển của phần bị dẫn của cơ cấu đàn hồi là $898 \text{ }\mu\text{m}$, do đó, độ khuếch đại không tải ước tính của cơ cấu là:

$$K = \frac{898}{93.3} = 9.53, \quad (6)$$



Hình 5: Mô phỏng biến dạng so với điện áp.



Hình 6: Chuyển vị có tải hoặc không tải.

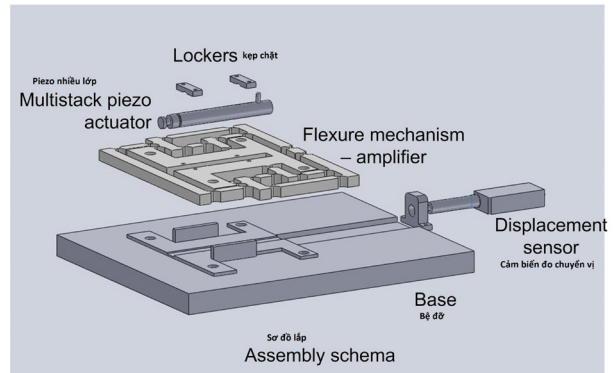
Sự dịch chuyển của phân bị dẫn và piezo nhiều lớp tăng theo điện áp ở hai đầu của piezo (Hình 5 và 6). Hình 6 cũng cho thấy kết quả mô phỏng khi có và không có tải áp dụng cho phần đầu ra của CCVCĐT.

Sự biến dạng “ký sinh” tại các khớp uốn là nguyên nhân tạo ra sự khác biệt giữa độ khuếch đại thực tế và độ khuếch đại lý tưởng đạt được trong cơ cấu khâu cứng. Hoạt động của piezo nhiều lớp độ phân giải dưới 50 nm, do đó, hoạt động của CCVCĐT có thể được xem là cơ cấu vi chuyển động ($50 \text{ nm} \times 10 = 500 \text{ nm} = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$).

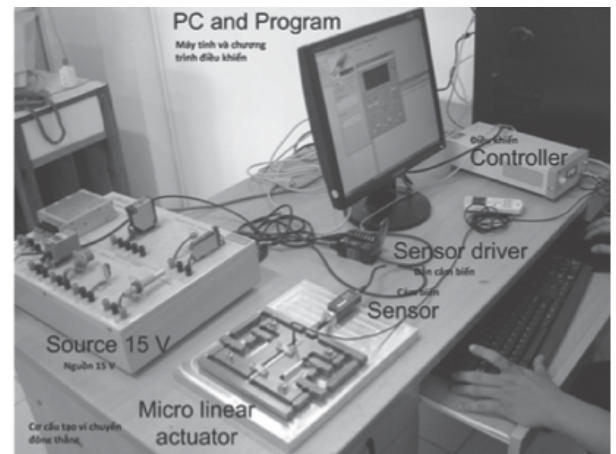
4. CHẾ TẠO VÀ LẮP RÁP

Hình 7, thể hiện sơ đồ lắp ráp và CCVCĐT được dẫn động bởi bộ truyền động áp điện PAS100 của Thorlabs (hành trình $85 \text{ } \mu\text{m}$). CCVCĐT được trang bị cảm biến tiếp xúc GT2-71CN (Keyence) với độ phân giải $0,1 \text{ } \mu\text{m}$.

CCVCĐT được điều khiển bằng chương trình viết bằng Visual Basic (Hình 8). Thử nghiệm bước đầu cho thấy CCVCĐT được thiết kế có độ phân giải $0,4 \text{ } \mu\text{m}$ và hành trình $1050 \text{ } \mu\text{m}$.



Hình 7: Sơ đồ lắp ráp CCVCĐT đã thiết kế.



Hình 8: CCVCĐT với nguồn và chương trình điều khiển.

5. KẾT LUẬN

Thiết kế, mô phỏng và chế tạo cơ cấu tạo vi chuyển động thẳng dựa trên cơ cấu khuếch đại vi sai kiểu đàn hồi và piezo nhiều lớp đã được trình bày. Thiết kế bao gồm ba bước: (1) Thiết kế mẫu – đề xuất bộ khuếch đại vi sai – cơ cấu khâu cứng và chuyển đổi cơ cấu khâu cứng thành cơ cấu đàn hồi; (2) Thiết kế tối ưu cho độ cứng và độ khuếch đại. (3) Việc mô phỏng được thực hiện trong lời giải của hai bài toán: (1) “Ghép nối” điện áp và biến dạng; (2) Tiếp xúc giữa piezo và cơ cấu đàn hồi. Mô phỏng cho phép, người ta nhìn thấy các đặc điểm của cơ cấu tạo vi chuyển động thẳng trước khi chế

tạo nó. Các thí nghiệm bước đầu cho thấy hiệu quả quá trình thiết kế. Các thí nghiệm sâu hơn để đánh giá độ chính xác, độ phân giải sẽ được tiến hành trong tương lai.

Lời cảm ơn:

Cảm ơn sự hỗ trợ về tinh thần, trang thiết bị nghiên cứu và thời gian làm việc từ Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm thành phố Hồ Chí Minh. ❖

Ngày nhận bài: **22/3/2023**

Ngày phản biện: **02/4/2023**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J. Li et al., *Mechatronics*. 15, 651-681 (2005).
- [2]. Z. Zhang and H. Hu, *Proceeding of International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, April, Hunan, China 2009, 98-105.
- [3]. Y. Zhang et al., *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 11(5), 647-651 (2006).
- [4]. S. Verma and W-J. Kim, *IEEE Transactions on Industry Applications*. 41 (5), 1159-1167 (2005).
- [5]. Website of New Focus's Products: <http://www.newfocus.com/products/>.
- [6]. J. Shen Jianying and Q. Zhou, *Proceeding of IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications (CESA)* - Beijing, China 2006, 1864-1873.
- [7]. J. S. Zhao, *Proceeding of The 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, Beijing, China 2009, 294-302.
- [8]. Mei-Yung Chen, Hsuan-Han Huang, and Shao-Kang Hung, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 57(1), 96-103 (2010).
- [9]. Hwee Choo Liaw et al., *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*. 14(5), 517-524 (2009).
- [10]. X. Tang, I-M Chen and Q. Li, *Rev. Sci. Instrum.* 77, 115101(2006).
- [11]. S-B Choi et al. *Mechanism and Machine Theory*, 42(9) 1184-1198 (2007).
- [12]. C-L Chu and S-H Fan. *Precision Engineering*, 30, 85-95 (2006).
- [13]. H-H Pham I-M Chen. *Precision Engineering*, 29, 467-478 (2005).
- [14]. J. M. Paros and L. Weisbord. *Machine Design*, 25, 151-156 (1965).