THIẾT KẾ VÀ PHÂN TÍCH CƠ CẤU MỀM THAY ĐỔI CHUYỂN ĐỘNG TỊNH TIẾN THÀNH CHUYỂN ĐỘNG XOAY DỰA TRÊN VI CƠ CẤU TRUYỀN ĐỘNG TĨNH ĐIỆN RĂNG LƯỢC

NGÔ TIẾN HOÀNG
Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh
ngotienhoang@iuh.edu.vn
DOIs: https://doi.org/10.46242/jstiuh.v61i07.4716

Tóm tắt. Một cơ cấu mềm có khả năng thay đổi linh hoạt chuyển động tịnh tiến thành chuyển động tròn xoay được nghiên cứu để ứng dụng trong hệ thống vi cơ điện tử (MEMS). Phương pháp để đạt được sự biến đổi chuyển động này là do sự sắp xếp đối xứng của hai đầu vào chuyển động tuyến tính. Chuyển động tính tiến này được cung cấp bởi cơ cấu truyền động comb-drive được sắp xếp đối xứng nhau và được treo bởi hệ thống các lò xò đối xứng. Sự chuyển động tịnh tiến được hình thành bởi lực tĩnh điện giữa răng lược di chuyển (movable comb-drive) đóng vai trò cực âm V_- và răng lược cố định (fixed comb-drive) đóng vai trò cực dương V_+. Để đạt được một tỷ số biến đổi (transduction ratio) của chuyển động xoay tròn so với chuyển động tịnh tiến, thuật toán giải thuật di truyền NSGA-II (Genetic Algorithm) được sử dụng để tối ưu hóa thiết kế cho đường cong tham số Bézier. Trong nghiên cứu này, vật liệu tổng hợp (composite materials) bao gồm một lớp kim loại và lớp Silicon dioxide ⟦SiO⟧_2 phủ trên và dưới bề mặt lớp kim loại được sử dụng để chế tạo cơ cấu mềm này. Với sự đột phá trong MEMS, cơ cấu mềm này có thể được sử dụng trong một số các ứng dụng vi quang học như bộ chuyển mạch quang học, đo đạc các nhiễu xạ, bộ giảm cường độ quang học, v.v… Phân tích phần tử hữu hạn (FEA) được thực hiện để dự đoán các hành vi của cơ cấu. Tỷ số truyền biến đổi chuyển động đạt được xấp xỉ khoảng 1.2 độ/µm. Để đáp ứng cho việc gia công chế tạo, cơ cấu mềm tích hợp mạch điện điều khiển sẽ được thiết kế trên phần mềm Cadence Virtuoso. Dựa vào các kết quả mô phỏng cho thấy sự dịch chuyển theo phương z (out-of-plane) tại vi trí đĩa xoay là rất nhỏ, điều này chứng tỏ cơ cấu không bị xoắn, võng khi điện áp được đặt vào. Ngoài ra, ứng suất sinh ra trong cơ cấu mềm nhỏ hơn rất nhiều so với ứng suất cho phép của vật liệu. Một hệ thống thí nghiệm được trình bày để xác định khả năng làm việc của cơ cấu.
Từ khóa: thay đổi linh hoạt chuyển động tịnh tiến thành chuyển động tròn xoay, tỷ số truyền, cơ cấu truyền động tĩnh điện răng lược.

1. GIỚI THIỆU

Lau và cộng sự. [1] đã trình bày một vi cơ cấu định vị có thể xoay theo hai hướng cùng và ngược kim đồng hồ được kích hoạt bằng sự giãn nở nhiệt của vật liệu tổng hợp silicon/polyme nhằm giải quyết nhu cầu cần thiết một hành trình lớn, bằng 6-7 lần so với các thiết kế trước [2-3]. Một hành trình lớn đạt được nhờ sự khuếch đại đòn bẩy của thanh trượt quay mà không yêu cầu thêm công suất hoặc làm giảm tần số cộng hưởng. Cơ cấu này được ứng dụng cho việc định vị nhiệt độ trên đĩa từ Tb/in^2. Ngoài ra, bộ định vị vi quay có tần số cộng hưởng chuyển động 35kHz, cao hơn 31kHz của thiết kế bên trước. Điểm yếu của bộ vi định vị quay này là do tần số cắt thấp và giảm độ lợi. Bản lề uốn đã được sử dụng phổ biến để thay thế cho các khớp cơ học trong thiết kế các vi cơ cấu định vị. Tuy nhiên, mô hình hóa bản lề uốn không chính xác sẽ làm giảm khả năng định vị của cơ cấu dẫn tới bị sai lệch vị trí. Yi và cộng sự. [2] đã trình bày vi cơ cấu định vị ba bậc tự do (DOF) với bản lề uốn. Nó yêu cầu 12 cơ cấu truyền động áp điện để đạt được vị trí hai bậc tự do và một bậc tự do xoay trên một tấm nền. Một phân tích động học sơ bộ bao gồm động học, động lực học và mô hình hóa độ cứng được tham chiếu đến tọa độ được trình bày. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn không trùng với kết quả phân tích. Điều này là do độ giãn dài dọc trục nhỏ, dọc theo hướng liên kết giữ cho cơ cấu không được định vị chính xác. Để đối phó với vấn đề này, mô hình bản lề uốn cong hai bậc tự do được sử dụng. Trên cơ sở của mô hình này, độ chính xác của vị trí được đảm bảo. Hiệu quả của mô hình chính xác này được thể hiện qua cả mô phỏng và thử nghiệm. Chao và cộng sự. [3] đã báo cáo một cơ cấu bao gồm hai cơ cấu mềm thành phần được thiết kế song song nhau. Hệ thống sẽ có ba chuyển động tịnh tiến và chín bản lề uốn. Bộ phận bên trên được gọi là cơ cấu 3-RPS và

© 2023 Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh

bên dưới là cơ cấu 3-RRR. Nhờ phương pháp mô hình vật lý của không gian giải pháp, thiết kế tối ưu của kết cấu phần dưới đã được thực hiện. Để đạt được độ chính xác cao, họ đã sử dụng các phần tử gốm áp điện làm thiết bị truyền động. Sau đó, quá trình hiệu chuẩn của cơ cấu bên dưới được thực hiện bằng hệ thống thị giác siêu chính xác. Thí nghiệm cho thấy cơ cấu bên dưới sở hữu không gian làm việc trong khoảng $120\mu m \times 130\mu m \times 18mrad$ với độ phân giải lần lượt là $50nm, 50nm, 18arcsec$. Bộ điều khiển này sẽ được sử dụng như một bộ định hình sợi quang học. Arefin và cộng sự. [4] trình bày một bàn xoay được kích hoạt bởi sự giãn nở nhiệt của các thanh trở nhiệt. Bộ truyền động bao gồm bốn thanh dẫn điện nhiệt (gọi là những "cánh tay nóng") được sự sắp xếp độc đáo xung quanh đĩa tròn xoay. Khi bốn thanh dẫn được áp điện vào thì các thanh sẽ nóng lên sau đó giãn nở và làm cho đĩa tròn quay xung quanh tâm của nó. Chuyển động quay này có thể được sử dụng cho các ứng dụng quang học khác nhau như chuyển mạch, sự suy giảm cường độ và nhiễu xạ. Bộ truyền động đã được chế tạo bằng công nghệ xử lý poly MUMPS. Một mô hình phân tích được sử dụng để dự đoán biên dạng nhiệt độ ở trạng thái ổn định dọc theo chiều dài bộ truyền động và hành vi xoay tròn của đĩa xoay dưới các dải điện áp khác nhau. Một phân tích phần tử hữu hạn (FEA) đã được thực hiện để dự đoán hoạt động của cơ cấu chấp hành bằng cách xác định một lượng không khí xung quanh kết cấu và cả giữa kết cấu và chất nền. Cuối cùng, thí nghiệm đã được thực hiện để dự đoán tính khả thi của thiết bị truyền động. So sánh hành vi xoay tròn của đĩa thu được từ cả mô hình phân tích và FEA với hành vi xoay tròn thu được từ thử nghiệm cho thấy sự thống nhất chặt chẽ hay sai lệch không đáng kể. Lin, chao và các cộng sư [5] đã thành lập một hệ số dẫn nhiệt biên dạng để giải quyết bài toán nhiệt dẫn từ cơ cấu truyền động ra môi trường xung quanh. Một mô hình điện nhiệt ba chiều đã được thiết lập. Mô hình này dựa trên phân tích nhiệt điện một chiều dọc trục và hệ số hình dạng dẫn theo nhịp thể hiện sự truyền nhiệt vuông góc với hướng trục. Cơ cấu đã được chế tạo bằng quy trình vi gia công bề mặt với khe hở $2\ \mu m$ so với tấm nền để cấu trúc có không gian để biến dạng. Năng lượng điện được truyền qua các vi cấu trúc này để đặc trưng cho các phản ứng nhiệt điện. Hệ số dẫn nhiệt biên dạng đã được mô phỏng và nhận thấy nó tăng tuyến tính khi độ dày của thiết bị trên tỷ lệ chiều rộng, h / w. Kết quả thí nghiệm bao gồm đường cong $I - V$ phù hợp với mô hình phân tích. Hệ số nhiệt độ dương $2 \times 10^{-3}\ °C$ của điện trở suất polysilicon đã được tìm thấy đối với các vi cấu trúc kèm theo. Arefin và cộng sự. [8] trình bày một chi tiết xoay được dẫn động bởi sự giãn nở nhiệt của các thanh truyền động dẫn nhiệt. Họ đã cung cấp một mô hình phân tích để khảo nhiệt độ phân bố dọc theo chiều dài của thiết bị truyền động ở trạng thái ổn định và dự đoán hành vi xoay tròn của chi tiết dưới điện áp truyền động. Trong kết quả thu được, trạng thái xoay tròn thu được từ FEA và mô hình phân tích đạt được một sự thống nhất chặt chẽ. Vật liệu áp điện bị biến dạng dưới tác dụng của điện trường. Cơ cấu chấp hành loại này có thể tạo ra lực và độ biến dạng lớn. Ưu điểm ở đây này là vật liệu áp điện là chịu lực cao, tốc độ chuyển mạch cao, tiêu hao công suất thấp, nhạy cảm với sự thay đổi nhiệt độ và nó cần được phát triển thêm trong quá trình chế tạo để chứng minh tiềm năng của mình. Mặt khác, nhược điểm của vật liệu áp điện là các biến dạng nhỏ phải được kỹ thuật hóa để trở nên có ích. Zhang và cộng sự [9] đã trình bày các thiết bị truyền động công xôn được cấu tạo bởi một màng mỏng PZT trên một nitrua silic ứng suất thấp. Với sự gia tăng của các điện áp khác nhau, công xôn có chiều dài lớn hơn thu được dịch chuyển hướng xuống tại vị trí đầu thành khoảng 30 µm. Kết quả thực nghiệm so sánh với mô phỏng sai lệch trong khoảng dưới 5%. Girbau và cộng sự. [10] đề xuất một thiết bị truyền động điện nhiệt lệch theo phương dọc trục tiêu thụ điện năng thấp. Về mặt định tính có thể được coi là sự kết hợp giữa thiết bị truyền động chùm thanh chevron trong mặt phẳng truyền thống và thiết bị truyền động "nóng-lạnh" theo phương thẳng đứng. Mô hình phân tích được tạo ra và được xác nhận bằng FEA chỉ ra rằng độ dịch chuyển tăng lên đáng kể khi góc ban đầu tăng lên. Thiết bị truyền động cũng đã chứng minh khả năng tiết kiệm điện một chiều so với thiết bị truyền động thẳng đứng khác. Comtois và cộng sự. [11] đã giới thiệu một thiết bị truyền động nhiệt điện thẳng đứng mới kết hợp hai hoặc nhiều thiết bị truyền động điện nhiệt có thể được áp dụng cho nhiều loại thiết bị vi cơ khối xây dựng cơ bản. "Cánh tay nóng" được đặt trên đỉnh của "cánh tay lạnh" trong cấu trúc liên kết này, theo một kết quả là nó biến dạng cong xuống khi dòng điện đi qua bộ truyền động. Edward và cộng sự. [12] tập trung vào việc thiết kế và mô tả thực nghiệm của hai loại vi cơ nhiệt điện không đối xứng MEMS. Động lực để thực hiện là trình bày mô tả hoạt động của vi cơ nhiệt điện để tạo điều kiện thích ứng với nhiều ứng dụng MEMS khác nhau. Cả hai kiểu thiết kế bộ vi phản ứng nhiệt điện polysilicon MEMS đều sử dụng nhiệt điện trở (Joule) để tạo ra sự giãn nở và chuyển động nhiệt. Trong cơ cấu vi phản ứng điện nhiệt thông thường, thanh dẫn "nóng" được đặt song song với thanh dẫn "lạnh", nhưng vì thanh dẫn "nóng" hẹp hơn thanh dẫn "lạnh", điện trở của thanh dẫn "nóng" lớn hơn. Khi dòng điện đi qua bộ vi phản ứng (qua điện trở nối tiếp của thanh truyền

"nóng" và "lạnh"), thanh truyền "nóng" được làm nóng đến nhiệt độ cao hơn thanh truyền "lạnh". Sự gia tăng nhiệt độ này làm cho thanh truyền "nóng" nở ra dọc theo chiều dài của nó, do đó vị trí đỉnh đầu của thiết bị sẽ xoay xung quanh một phần tử uốn cơ học (mechanical flexure element). Các phép đo độ lệch và lực của cả hai thiết bị truyền động nhiệt điện như một hàm của công suất điện được trình bày. Cũng được mô tả là sự tích hợp thực tế của bộ vi nhiệt điện trong một vi mạch nguyên khối có khả năng quay một bộ bánh răng. Một vi thiết bị truyền động nhiệt điện mới với chuyển động thẳng đứng hai chiều được giới thiệu, phân tích và thử nghiệm bởi Dong và các cộng sự. [13]. Trong các bộ truyền động nhiệt điện dọc trước đây, các thanh truyền động được chế tạo với các chiều rộng khác nhau để cung cấp điện trở cao và thấp cho các thanh truyền "nóng" và "lạnh". Việc tác động dòng điện vào các thanh truyền động điện nhiệt dẫn đến độ giãn nở nhiệt khác nhau giữa các thanh truyền "nóng" và "lạnh", điều này buộc phần đầu của thiết bị bị uốn cong. Bộ truyền động nhiệt thẳng đứng hai chiều mới loại bỏ điện trở ký sinh của thanh truyền "lạnh" thông qua việc sử dụng cấu trúc hình chữ "U". Cấu trúc hình chữ "U" này cung cấp độ võng lớn hơn với hiệu suất điện được cải thiện. Bộ truyền động hình chữ U có lợi hơn trong các ứng dụng như tụ điện thay đổi, nơi cần độ lệch lớn hơn để tăng phạm vi điều chỉnh. Các kết quả mô phỏng và thử nghiệm được cung cấp để chỉ ra độ lệch và ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến hoạt động của cơ cấu chấp hành. Eniko và cộng sự. [14] mô tả hệ thống thanh truyền động hình chữ V được mô hình hóa bằng cách sử dụng lý thuyết về độ vênh cột dầm. Các biến dạng dọc trục bao gồm các quan hệ biến dạng phi tuyến bậc nhất hay biến dạng cơ học và biến dạng được sinh ra do ảnh hưởng của nhiệt độ được xem xét. Các phương trình phi tuyến thu được cho các phản lực được giải bằng số học và các nghiệm được so sánh với mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến (FE). Một thiết bị truyền động thử nghiệm cũng đã được chế tạo để phục vụ cho việc thí nghiệm. Độ chính xác của mô phỏng phần tử hữu hạn thu được nằm trong khoảng 1,1% của và phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm. Một mô hình truyền nhiệt một chiều (1-D) tương ứng cũng đã được phát triển và xác nhận dựa trên các phép đo thực nghiệm ở các nhiệt độ khác nhau. Sau đó, các mô hình phân tích đã phát triển được sử dụng để phân tích ứng suất cực đại và nhiệt độ phân bố trên thanh truyền động. Trong hệ thống MEMS, Kim và cộng sự. [15] giới thiệu một thiết bị có khả năng di chuyển đồng thời theo hai phương X và Y với sự hỗ trợ của cơ cấu đòn bẩy và hệ thống các chùm thanh truyền động dạng chữ V tác dụng lên hệ thống đòn bẩy. Đề có thể dịch chuyển theo phương X thì hệ thống các thanh truyền động nhiệt và cơ cấu đòn bẩy sẽ bố trí theo phương vuông góc với phương X và tương tự như vậy với phương Y. Để dự đoán được nhiệt độ, sự biến dạng và lượng dịch chuyển theo phương X và Y, phần mềm mô phỏng kỹ thuật ANSYS được sử dụng. Ngoài ra, mô hình lý thuyết (Analytical) cũng được phát triển để kiểm chứng kết quả của ANSYS. Trong báo cáo này, sự sai khác trong kết quả thu hoạch sự dịch chuyển theo phương X, Y dưới tác dụng của dãy điện áp đặt vào của cả hai phương pháp trên vào khoảng dưới 1%. Điều này chứng tỏ rằng, các thông số tính toán thiết kế và phương pháp gia công là đáng tin cậy. Tuy nhiên, khi thí nghiệm dưới dải tần số từ 10Hz-10kHz để tìm tần số cộng hưởng thì cả hai bàn di trượt theo phương X và Y không cho kết quả cộng hưởng tại cùng môt tần số. Lý do có thể giải thích kết quả trên là do khối lượng của hai bàn di trượt X và Y khác nhau. Để khai thác các ưu điểm của bộ truyền động áp điện và khuếch đại sự dịch chuyển của các bộ truyền động, Na và các cộng sự. [16] đã thiết kế một kết cấu sử dụng mô hình động học của liên kết bảy khâu bản lề bất đối xứng để biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động quay. Trong kết cấu này, liên kết bảy khâu bản lề là một hệ thống bất đối xứng với hai bậc tự do, hai vòng lặp trên dưới cùng với các khớp bản lề xoay và bản lề uốn giúp sự khuất đại chuyển động hiệu quả hơn. Trong quá trình phát triển thiết kế, để tìm vị trí thích hợp của hai chốt tâm xoay đặt ở trên và dưới cùng, phân tích phần tử hữu hạn được thực hiện bằng cách sử dụng mô-đun cơ học kết cấu trong COMSOL. Theo như kết quả phân tích mô phỏng COMSOL, độ dịch chuyển dọc trục theo phương X tăng lên thì góc quay của cơ cấu kết cấu tăng lên tỷ lệ thuận. Để kiểm tra kết quả mô phỏng, thí nghiệm được thực hiện cho kết quả dịch chuyển 70 μm thu được 1.52^{o} so với mô phỏng là 1.2^{o}. Tuy nhiên, kết cấu này yêu cầu dịch chuyển lớn để có thể đạt được góc xoay cái thiện hơn.

Nghiên cứu này phát triển một cơ cấu mềm có khả năng chuyển đổi chuyển động tịnh tiến sang cuyển động xoay tròn nhờ lực tĩnh điện của hệ thống răng lược được sắp xếp đối xứng. Phân tích mô phỏng được thực hiện để kiểm tra khả năng hoạt động của thiết bị. Tối ưu hoá thiết kế bằng giải thuật di truyền NSGA-II được sử dụng để đạt được tỷ số truyền tối ưu giữa góc xoay và sự dịch chuyển. Ngoài ra, kích thước của cơ cấu được hình thành trong vùng không gian cho phép. Thiết kế layout và cho cơ cấu được tiến hành để chuẩn bị cho quá trình gia công chế tạo.

2. NGUYÊN LÝ HOẠT ĐỘNG

Hình 1 (a) trình bày sơ đồ của cơ cấu mềm biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động xoay. Cơ cấu mềm bao gồm một đĩa quay (rotary stage), hai thanh mềm biến dạng linh hoạt có biên dạng tham số hình học Bézier (Bézier-curved beam), hai cơ cấu truyền động răng lược được sắp xếp đối xứng cấu tạo bao gồm một dãy răng lược cố định (fixed comb) và một dãy răng lược có thể di chuyển (movable comb). Để giữ cho mỗi răng lược di chuyển có thể chuyển động trong một mặt phẳng, nó sẽ được treo bởi hệ hai lò xo (spring) đặt tại vị trí đầu và cuối của mỗi răng lược di chuyển. Một đầu còn lại của lò xo sẽ nối với tấm nền (anchor). Mỗi răng lược cố định (fixe-comd) được tính toán thiết kế phù hợp tương thích với răng lược di chuyển để tạo ra chuyển động tịnh tiến. Tọa độ Đề-Các được sử dụng để tham chiếu chuyển động như trên hình 1. Khi đặt dòng điện một chiều với V_+ được đặt tại răng lược cố định và V_- được đặt tại tấm nền cố định như trong hình 1 (b) thì răng lược di chuyển sẽ bị hút vào răng lược cố định với một lượng dịch chuyển d. Chính sự dịch chuyển này sẽ kéo theo đĩa xoay xoay một góc θ tương ứng. Vì các bộ phận được thiết kế đối xứng qua trục y với tâm trùng với tâm của đĩa xoay nên sự dịch chuyển tuyến tính trong mặt phẳng x-y của đĩa xoay là rất nhỏ. Hình 1 (b) cho thấy rõ sự thay đổi vị trí của các bộ phận khi dòng điện một chiều được đặt vào. Hình 1 (c) và (d) là hình phóng to phần kết cấu được khoanh tròn tại khu vực A và B trong hình 1 (a).

3. THIẾT KẾ

Cấu hình của cơ cấu ở trạng thái lúc ban đầu và sau khi biến dạng được mô tả trong hình 2. Đường nét liền biểu thị cho cơ cấu ở trạng thái ban đầu (original) khi chưa đặt điện áp và ở trạng thái biến dạng (deformed) được thể hiện bằng đường nét đứt. Cũng trong hình 2, vị trí A được phóng lớn để thấy rõ chuyển động xoay tròn của đĩa xoay. Trong nghiên cứu này, hai bộ răng lược được sử dụng để tạo ra chuyển động tịnh tiền về hai phía ngược nhau, thể hiện trong hình 1 (b). Thiết kế của bộ răng lược được thể hiện trong hình 1 (c). Lực điện trường được sinh ra trong cơ cấu tuân theo công thức sau:

$$f_{elec} = \frac{N\varepsilon h}{g_c} V^2 \quad (1)$$

Với N là số lượng răng, h là độ sâu của răng, g_c là khe hở tại vị trí liền kề nhau của răng lược cố định và răng lược di chuyển, ε là hằng số điện môi của môi trường, V là điện áp chênh lệnh giữa răng có định và răng di chuyển, V có thể được biểu diễn bằng công thức:

$$V = V_+ - V_- \quad (2)$$

Các thông số thiết kế của lò xo được trình bày trên hình 1 (d) với L_s là tổng chiều rộng của hệ lò xo và là hằng số, W_s là chiều rộng của một đoạn lò xo, D_s là chiều rộng một đơn vị lò xo, g_s khoảng cách hay khe hở giữa các đoạn lò xo. Mối tương quan hình học có thể được biểu diễn bằng công thức sau:

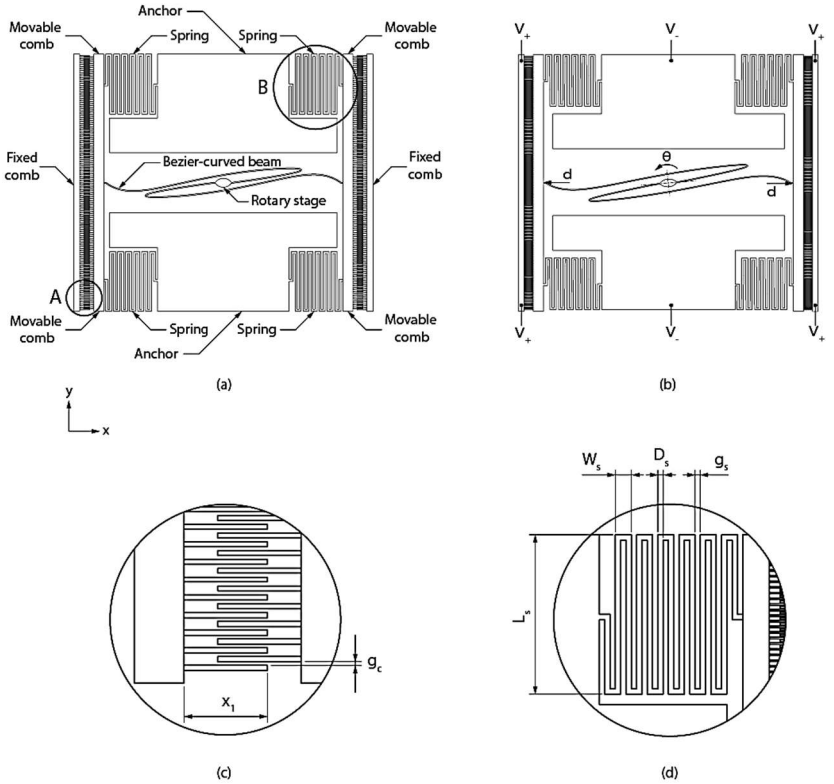
$$W_s = g_s + 2D_s \quad (3)$$

Như đã trình bày ở trên, mục tiêu của bài báo hướng tới đạt được tỷ số truyền θ/d càng lớn càng tốt. Chính vì vậy, giải thuật di truyền (Genetic Algorithm) được sử dụng cho thanh cong tham số Bézier để tìm ra thông số thiết kế tối ưu nhất có thể. Mục tiêu tối ưu hóa được cụ thể hóa như sau:

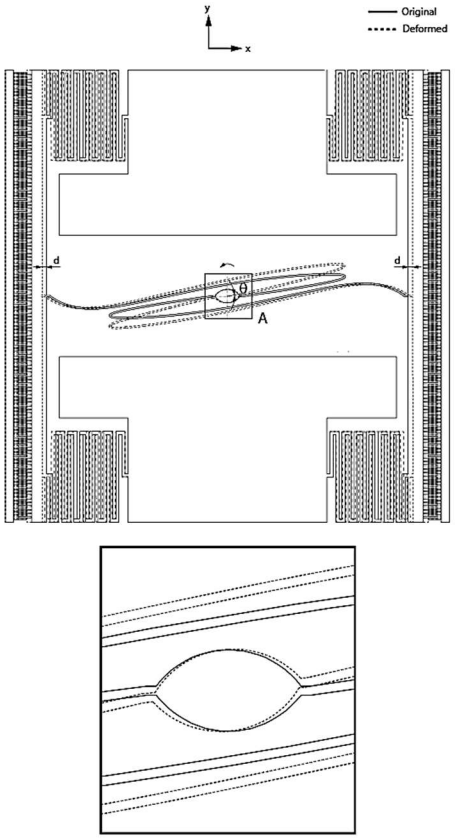
$$Max \quad \frac{\theta}{d}$$
$$Min \quad \sigma_{max}$$

Trong đó σ_{max} là ứng suất lớn nhất sinh ra trong cơ cấu khi ở trạng thái hoạt động. Để đơn giản hóa thuật toán di truyền, lượng dịch chuyển tối đa d được cho trước với giá trị là 10μm trong suốt quá trình. Dựa vào yêu cầu làm việc và độ bền của cơ cấu, ứng suất lớn nhất sinh ra trong cơ cấu phải nhỏ hơn ứng suất cho phép của vật liệu cấu thành. Thông số có định cho đĩa tròn xoay là R, D và W tương ứng với các giá trị $45\mu m$, $80\mu m$, $5\mu m$ được thể hiện trong hình 3. Thiết kế thanh cong tham số để thu được tỷ số truyền $\frac{\theta}{d}$ lớn được tối ưu hóa thông qua các tham số của chùm thanh cong Bézier. Đường cong Bézier được xác định bởi 8 điểm tạo thành một đa giác $Q_1Q_2Q_3Q_4Q_5Q_6Q_7Q_8$ được biểu diễn trên hình 3. Theo mô tả của Rogers và Adam [17], điểm đầu và điểm cuối tương ứng với Q_1 và Q_8 nằm trên thanh cong sẽ trùng với điểm đầu và điểm cuối của đa giác có nghĩa là điểm Q_1 và Q_8 có tọa độ cho biết trước sẵn. Vector tiếp tuyến tại điểm đầu và cuối của thanh cong sẽ cùng hướng với điểm đầu và cuối của đa giác. Chương trình thuật toán tạo đường cong tham số Bézier được trình bày trong phần phụ lục. Thông số tính toán cho đường cong tham

số Bézier với 8 điểm được biểu diễn như sau:

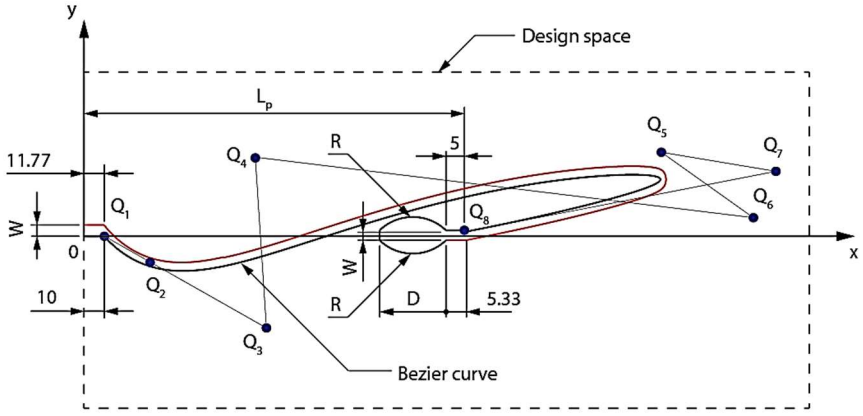


Hình 1. a) Cơ cấu tại vị trí ban đầu; b) Cơ cấu tại vị trí sau khi đặt điện áp (ví trị biến dạng); c) Thông số của những răng lược; d) lò xo.



Hình 2. Cấu hình ban đầu và sau biến dạng của cơ cấu.

$$P(t) = \begin{bmatrix} (1-t)^7 \\ 7t(1-t)^6 \\ 21t^2(1-t)^5 \\ 35t^3(1-t)^4 \\ 35t^4(1-t)^3 \\ 21t^5(1-t)^2 \\ 7t^6(1-t) \\ t^7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{Q_1} \\ P_{Q_2} \\ P_{Q_3} \\ P_{Q_4} \\ P_{Q_5} \\ P_{Q_6} \\ P_{Q_7} \\ P_{Q_8} \end{bmatrix} \quad 0 \le t \le 1 \tag{4}$$

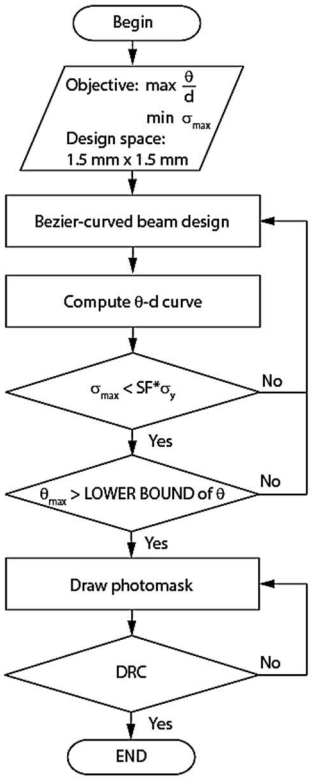


Hình 3. Thông số hình học của thanh mềm Bézier và đĩa tròn.

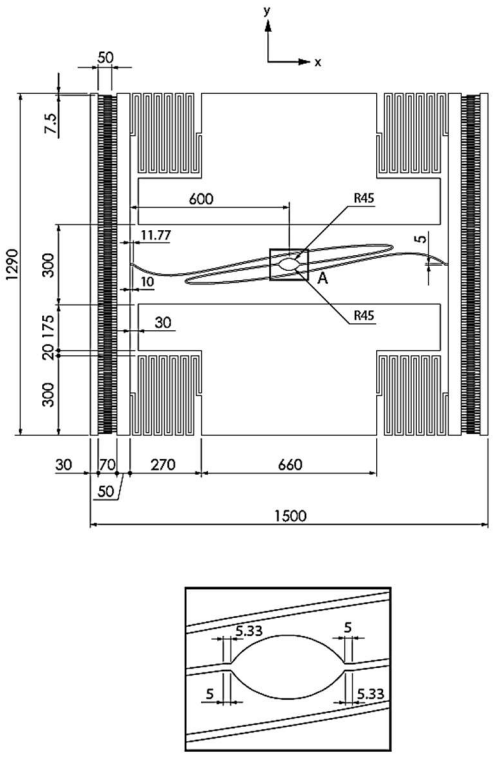
Trong đó t là tham số và P_{Q_i} là vector vị trí của Q_i với $i = 1,2,3,4,5,6,7,8$. Tỷ số truyền $\frac{\theta}{d}$ được tối ưu bằng cách cho phép các điểm từ Q_2 đến Q_7 di chuyển trong không gian thiết kế khép kín (design space) được thể hiện bằng nét đứt trong hình 3. Vị trí của điểm Q_1 đến Q_8 tương ứng tại vị trí chính giữa của răng lược di chuyển và tại bên phải phía cuối của đĩa xoay. Chiều rộng của thanh cong Bézier, W là 5µm. Trình tự tối ưu hóa được mô tả và trình bày trong hình 4. Thuật toán di truyền sắp xếp không phân loại (nondominated sorting genetic algorithm) được trình bày bởi Deb và các cộng sự. [18] ứng dụng để tối ưu hóa cơ cấu. Trong giải thuật di truyền náy, số lượng các thế hệ di truyền là 45 và đối tượng của mỗi thế hệ là 30. Hình 5 trình bày kích thước thiết kế sau khi đã thực hiện thuật toán di truyền. Kích thước của bộ truyền động răng lược được thiết kế với các thông số phù hợp trong vùng không gian cho phép được thể hiện trên hình 6 (a). Bằng phương pháp thử và lặp lại nhiều lần, kích thước của hệ lò xo được biểu diễn trên hình 6 (b) cho phép lò xo có thể treo các chi tiết như răng lược di chuyển, thanh cong tham số Bézier, đĩa xoay mà không bị võng hay uốn.

4. MÔ PHỎNG

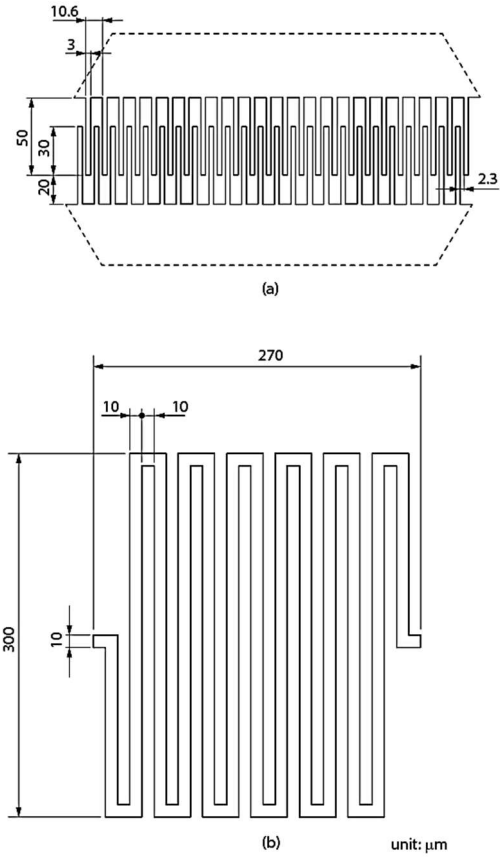
Phầm mềm thương mại phân tích phân tử hữu hạn ABAQUS được sử dụng cho thực hiện mô phỏng cơ cấu ở trạng thái 2D để thu được đồ thị góc xoay so với dịch chuyển tuyến tính $\theta - d$ và ứng suất lớn nhất σ_{max} của cơ cấu. Phần tử CPE4R với bốn điểm biểu diễn trong phần mềm ABAQUS được sử dụng cho việc phân tích kết cấu. Trong mô phỏng kỹ thuật có 43620 phần tử. Giả định rằng sự chuyển động lệch phẳng của kết cấu là rất nhỏ và hầu như không ảnh hưởng đến chuyển động phẳng của cơ cấu. Thuật toán di truyền sử dụng trong nghiên cứu này được thực hiện trên phần mềm MATLAB. Thuật toán di truyền, các tham số thiết kế (các điểm điều khiển Q_i của đường cong Bézier) và các ràng buộc hình học được viết trong một tệp script của MATLAB. Biên dạng của thanh cong Bézier được tính toán và tọa độ của tất cả các nút dọc theo biên dạng được tạo trong tệp script.



Hình 4. Sơ đồ khối mô tả quá trình thực hiện tối ưu hoá.



Hình 5. Kích thước của thiết bị.



Hình 6. a) Kích thước của răng lược; b) Kích thước của lò xo.

5. VẬT LIỆU

Vật liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là vật liệu composite với thành phần bao gồm một lớp kim loại là aluminium (Al) ký hiệu là ME6 và lớp thứ hai là silicon dioxide (SiO_2) bao phủ phần ở trên và dưới lớp ME6. Cả hai vật liệu trên được giả định là vật liệu đàn hồi tuyến tính. Các đặc tính của hai vật liệu được trình bày trong bảng 1. Vật liệu đồng nhất được sử dụng trong phân tích phần tử hữu hạn. Vì là vật liệu đa lớp và đa vật liệu nên hệ số modun đàn hồi E_c tương đương (equivalent Young's modulus) và hệ số Possion v_c tương đương của vật liệu composite được mô tả như sau:

$$E_c = f_1 E_{ox} + f_2 E_{al} + \frac{f_1 f_2 E_{ox} E_{al} (\nu_{ox} - \nu_{al})^2}{f_1 E_{ox}(1 - {\nu_{al}}^2) + f_2 E_{al}(1 - {\nu_{ox}}^2)} \quad (5)$$

$$\upsilon_c = \frac{f_1 E_{ox}(1 - {\nu_{al}}^2) + f_2 E_{al}(1 - {\nu_{ox}}^2)}{f_1 E_{ox}(1 - {\nu_{al}}^2) + f_2 E_{al}(1 - {\nu_{ox}}^2)} \quad (6)$$

Trong đó $f_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2} và\ f_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2}$ tương ứng với thể tích thay đổi của lớp ME6 và lớp SiO_2.

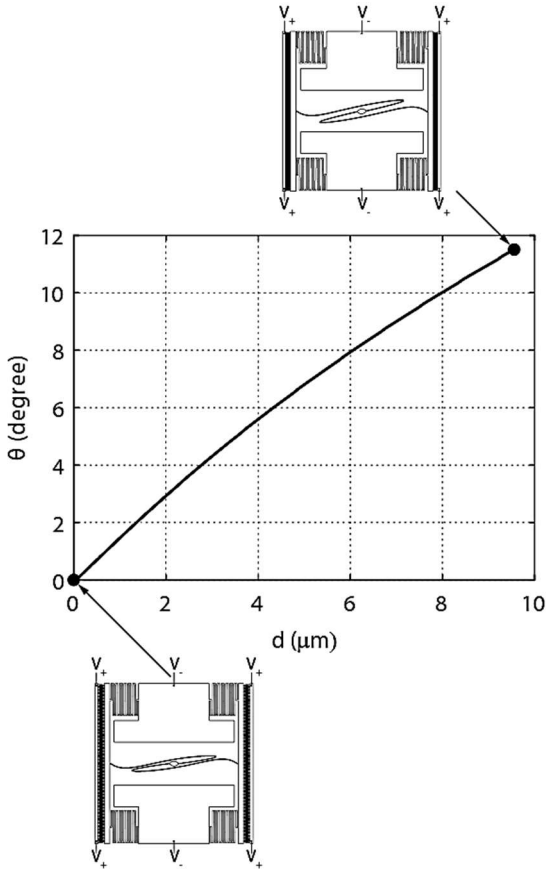
Bảng 1: Đặc tính của vật liệu ME6, SiO_2 và composite

Vật liệu	Thông số	Giá trị
Kim loại ME6 (aluminum)	Mô đun đàn hồi của aluminum, E_{al}	$70GPa$
	Hệ số Poisson ratio của aluminum, ν_{al}	0.3
	Chiều dày, h_1	$2.06\mu m$
	Tỷ trọng	$2700\ kgm^{-3}$
Silicon dioxide, SiO_2	Mô đun đàn hồi của SiO_2, E_{ox}	$75GPa$
	Hệ số Poisson ratio của SiO_2, ν_{ox}	0.17
	Chiều dày, h_2	$7.8\mu m$

	Tỷ trọng	$2200\ kgm^{-3}$
Composite	Mô đun đàn hồi, E_c	$71.26GPa$
	Hệ số Poisson ratio, ν_c	0.27

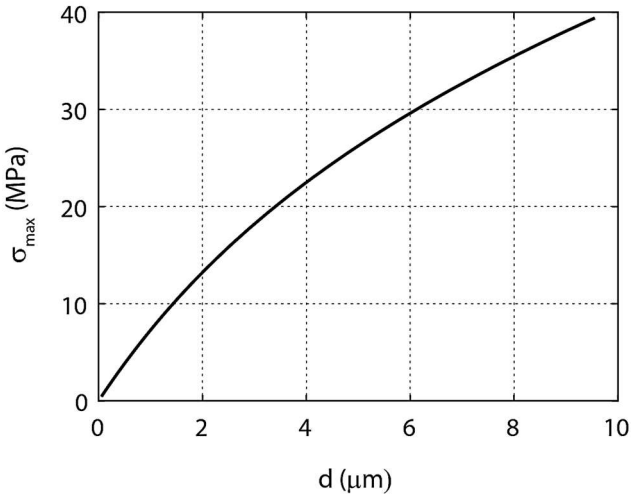
6. KẾT QUẢ

Hình 7 và 8 biểu diễn đồ thị $\theta - d$ và $\sigma_{max} - d$ của cơ cấu đã được tối ưu hóa dựa trên phân tích phần tử hữu hạn. Góc xoay θ và ứng suất lớn nhất σ_{max} tang khi dịch chuyển d tăng. Khi sự dịch chuyển được đưa vào đạt tới 9.6 μm thì góc xoay đạt giá trị 11.5° và $\sigma_{max} = 39.4MPa$, tỷ số truyền $\frac{\theta}{d} = 1.2\ °/\mu m$. Ứng suất lớn nhất σ_{max} phát sinh trong cơ cấu có trị số nhỏ hơn nhiều so với ứng suất tới hạn của aluminum là 124MPa và của SiO_2 là 320MPa.

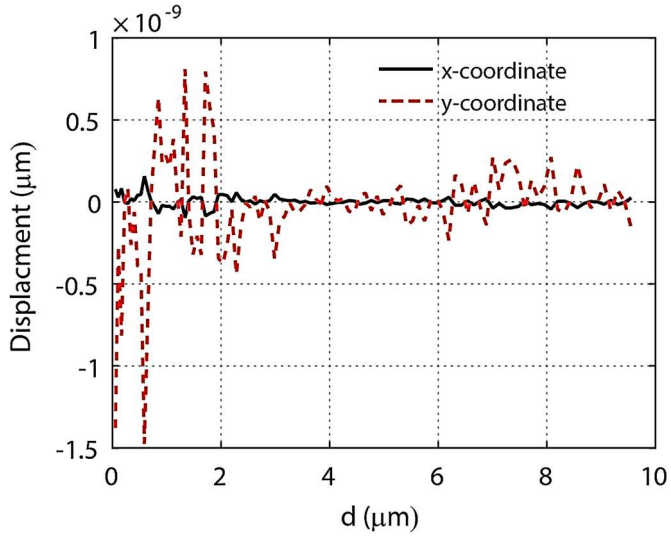


Hình 7. Tương quan tỷ lệ giữa dịch chuyển tuyến tính và góc xoay.

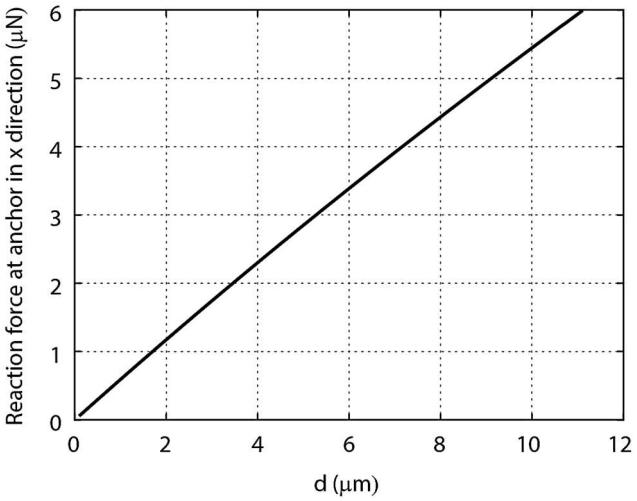
Hình 9 trình bày sự lệch tâm theo hướng x và y tại tâm của đĩa xoay khi dịch chuyển tuyến tính trong khoảng 0 đến 9.6μm dựa trên phân tích phần tử hữu hạn. Kết quả thể hiện rõ ràng rằng, sự dịch chuyển của tâm đĩa xoay là rất bé so với khoảng dich chuyển được đưa vào. Hình 10 mô tả độ lớn của phản lực tại vị trí cố định theo phương x trùng với phương chuyển động của cơ cấu khi khoảng dịch chuyển tuyến tính trong khoảng 0 đến $11\mu m$. Dựa trên phân tích mô phỏng phần tử hữu hạn. Phản lực lớn nhất sinh ra tại vị trí cố định là $6.0\mu N$ khi dịch chuyển một lượng 11μm. Lực dẫn động (actuation force) được sinh ra bởi một bên răng lược bằng với phản lực bên trái (hoặc bên phải) theo phương đối xứng. Để một bên răng lược có thể tạo ra 6.0μN thì nó sẽ được thiết kế với số lượng răng là N=121, g_c=2.3μm, h=4.86μm (ME1-ME6) và được đặt ở điện áp V=51 Votls.



Hình 8. Ứng suất lớn nhất sinh ra trong kết cấu tại các vị trí dich chuyển tương ứng.



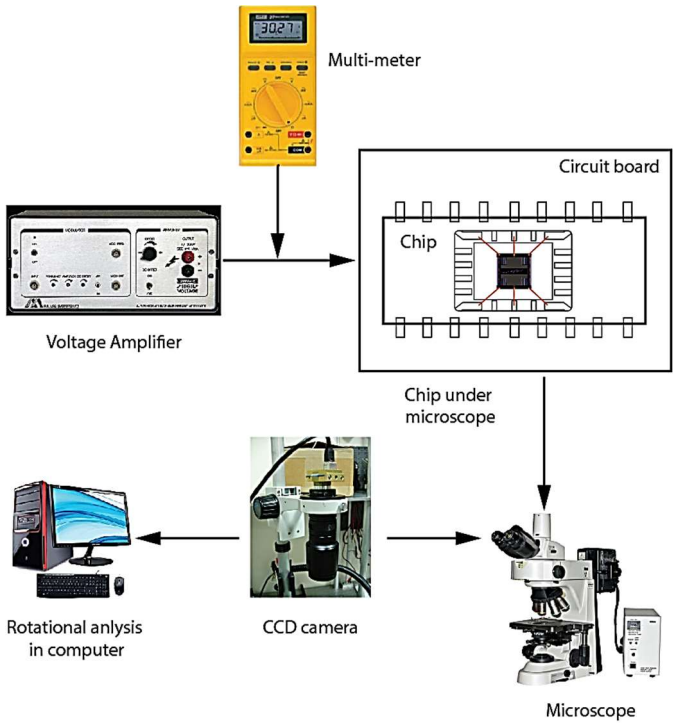
Hình 9. Sự dịch chuyển tại tâm của đĩa xoay tương ứng với khoảng dịch chuyển tuyến tính được đưa vào.



Hình 10. Độ lớn của phản lực tại ngàm theo hướng x tương ứng với khoảng dịch chuyển tuyến tính được đưa vào.

7. BỐ TRI THI NGHIỆM

Cơ cấu sẽ được đóng gói có tích hợp mạch điện trong một con chip hoàn thiện. Toàn bộ quá trình gia công chế tạo sẽ được thực hiện bởi National Chip Implementation (CIC), Đài Loan. Để mô tả khả năng làm việc của cơ cấu, con chip sẽ được quan sát dưới kính hiển vi như mô tả trong hình 11. Điện áp một chiều được cung cấp bởi máy dao động ký (function generator, WW5062, Tabor Electronic Ltd., Israel) và được khuếch đại bởi bộ khuếch đại điện áp (A-303, A.A. LAB SYSTEMS LTD.,). Máy ảnh cảm biến tốc độ cao (CCD camera) sẽ được sử dụng để phân tích chuyển động xoay tròn của đĩa xoay và tịnh tiến của hệ thống răng lược.



Hình 11. Bố trí thí nghiệm

8. KẾT LUẬN

Do lợi ích đáng kể, các vi cơ cấu truyền động trong MEMS tiếp tục được nghiên cứu phát triển và sử dụng cho các thiết kế mới. Nghiên cứu này trình bày một cơ cấu mềm biến đổi chuyển động tịnh tiến thành chuyển động xoay tròn một cách linh hoạt. Các cấu trúc liên kết thiết kế khác nhau cho cơ cấu truyền động này cũng được xem xét để đạt được tỷ số truyền tối đa. Trong báo cáo cũng trình bày sự thiết kế và mô hình hoá quá trình truyền chuyển động với các kết quả so sánh. Một điều rõ ràng rằng, điều khiển vị trí các điểm của đường cong tham số Bézier tương đối phức tạp để đạt được mục tiêu mong muốn. Mục tiêu tối ưu sẽ được thực thi bởi thuật toán di truyền NSGA-II. Các kết quả phân tích kỹ thuật CAE cho ta thấy phản lực và ứng suất trong cơ cấu ở trong mức an toàn. Ngoài ra, cơ cấu đạt tỷ số truyền giữa chuyển động tịnh tiến và chuyển động xoay xấp xỉ 1.2 độ/µm khi lương dịch chuyển tối đa là 9.6 µm. Một bố trí thực nghiệm đã được trình bày để chuẩn bị cho việc thí nghiệm sau khi thiết bị được chế tạo. Cơ cấu được gia công, đóng gói trong một con chip có tích hợp mạch điện.

9. CÔNG VIỆC TIẾP THEO

Phần đầu tiên của đề tài này như đã trình bày ở những nội dung trên sẽ tập trung vào việc đưa ra ý tưởng, thiết kế và sau đó sử dụng mô hình mô phỏng để phân tích ý tưởng. Công việc tiếp theo cho đề tài này sẽ là chế tạo và thử nghiệm thiết bị thực tế để kiểm tra sự đáp ứng của hệ thống khi có điện áp đặt vào. Thiết bị được chế tạo bằng phương pháp ăn mòn (Etching) trong hệ vi cơ điện tử (MEMS) nên cần có thiết bị, máy móc chuyên dụng, chế tạo trong phòng sạch và phải có nhiều kinh nghiệm chế tạo cũng như tốn rất nhiều thời gian và chi phí rất lớn.

10. THẢO LUẬN

Trong hệ thống vi cơ điện tử MEMS, thiết bị được chế tạo và thử nghiệm hoạt động trong phòng sạch với nhiệt độ hợp lý. Chính vì vậy, ảnh hưởng của các tác nhân môi trường bên ngoài hầu như là không đáng kể để sự hoạt động của thiết bị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] G. K. Lau, J. Yang, C. P. Tan and N. B. Chong, "An electro-thermally activated rotary micro-positioner for slider-level dual-stage positioning in hard disk drives," *J. Micromech. Microeng*., vol. 26, 2016.
[2] J. P. Yang, G. K. Lau, C. P. Tan, N. B. Chong, B. Thubthimthong and Z. M. He, "An electro-thermal micro-actuator based on polymer composite for application to dual-stage positioning systems of hard disk drives," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 187, pp. 98-104, 2012.
[3] J. P. Yang, G. K. Lau, C. P. Tan, N. B. Chong, B. Thubthimthong, L. Gonzaga and Z. M. He, "Improved design of polymeric composite electrothermal micro-actuator for high track density hard disk drives," *Microsystem Technologies*, vol. 19, pp. 1697-1704, 2013.
[4] B.-J. Yi, G. B. Chung, H. Y. Na, W. K. Kim and I. H. Suh, "Design and experiment of a 3-DOF parallel micromechanism utilizing flexure hinges," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, pp. 604-611, 2003.
[5] D. Chao, G., Zong and R. Liu, "Design of a 6-DOF compliant manipulator based on serial-parallel architecture," *2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, vols. 1 and 2*, IEEE, 2005, pp. 765–770.
[6] M. Arefin, M. Packirisamy and A. K. W. Ahmed, "Disc type thermal actuator with straight beams for angular motion," *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 988-999, 2013.
[7] L. Lin and M. Chiao, "Electrothermal responses of lineshape microstructures," *Sensor and Actuators A*, vol. 55, pp. 35-41, 1996.
[8] M. Arefin, M. Packirisamy and A. K. W. Ahmed, "Disc type thermal actuator with straight beams for angular motion," *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, pp. 988-999, 2013.
[9] Q.Q. Zhang, S.J Gross, S. Tadigadapa, T.N Jackson, F.T Djuth and S. Trolier-McKinstry, "Lead zirconate titanate films for d33 mode cantilever actuators," *Sensor and Actuators A*, vol. 105, pp. 91-97, 2003.
[10] D. Girbau, M.A. Llamas, J.C-Terré, X.S-Selvas, L. Pradell, and A. Lázaro, "A Low Power-Consumption Out-of-Plane Electrothermal Actuator," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 16, no. 3, 2007.
[11] J.H. Comtois, V.M. Bright, "Applications for surface-rnicromachined polysilicon thermal actuators and arrays," *Sensors and Actuators A*, vol. 58, pp. 19-25, 1997.
[12] E. S. Kolesar, M. D. Ruff, W. E. Odom, …, R. J. Wilks, "Single- and double-hot arm asymmetrical polysilicon surface micromachined electrothermal microactuators applied to realize a microengine," *Thin Solid Films*, vol. 420–421, pp. 530–538, 2002.
[13] D. Yan, A. Khajepour and R. Mansour, "Design and modeling of a MEMS bidirectional vertical thermal actuator," *J. Micromech. Microeng*., Vol. 14, pp. 841–850, 2004.
[14] E. T. Enikov, S. S. Kedar, and K. V. Lazarov, "Analytical Model for Analysis and Design of V-Shaped Thermal Microactuators," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, pp. 788-798, 2005.
[15] Y. S. Kim, J. M. Yoo, S. H. Yang, Y. M. Choi, N. G. Dagalaks and S. K. Gupta, "Design, fabrication and testing of a serial kinematic MEMS XY stage for multifinger manipulation," *J. Micromech. Microeng*, vol. 22, 2012.
[16] T. W. Ta, D. H. Kang, J. Y. Jung, J. H. Han and I. K. Oh, "Linear-to-rotary motion converter using asymmetric compliant mechanics and single-crystal PMN-PT stack actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 25, pp. 2221-2227, 2014.
[17] D. F. Rogers and J. A. Adams, "Mathematical elements for computer graphics, 2nd edition," McGRAW-Hill, New York, 1990.
[18] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, pp. 182-197, 2002.

DESIGN AND ANALYSIS OF A COMPLIANT LINEAR-TO-ROTARY MOTION TRANSDUCTION MECHANISM BY A MEMS COMB-DRIVE ACTUATOR

TIEN HOANG NGO
Faculty of Mechanical Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City
ngotienhoang@iuh.edu.vn

Abstract. A mechanism to convert linear motion to rotary motion has been studied for application in microelectromechanical systems (MEMs). The means to achieve the linear-to-rotary motion transduction is attributed to a symmetric arrangement of two linear motion inputs. The linear motion is provided by comdrive actuator suspended by symetrical springs system. The translational movement is formed by the electrostatic force that act between the movable comb-drive acting as V_- and the fixed comb-drive working as the V_+. In order to achieve a transduction ratio of the rotation compared to the linear motion, the Genetic Algorithm is used to optimize the design for the Bézier parametric curve. In this investigation, composite materials consisting of a metal layer and a silicon dioxide ⟦SiO⟧_2 layer above and below the metal layer were used to fabricate the structure. With a break-through in the high tech technology, this rotary motion can be applied for various optical applications like, attenuation, switching and diffraction, etc. Finite element analyses were carried out to predict behaviors of the transduction mechanism. A transduction ratio of nearly 1.2 degree/μm is achieved. To meet the fabrication requirements, the mechanism integrating the control circuit will be designed using Cadence Virtuoso software. Based on the simulation results, the out-of-plane displacement at the rotary stage is very small, proving that the structure does not twist or sag when voltage is applied. In addition, the stress generated in the structure is much smaller than the allowable stress of the material. An experimental system is presented to determine the operability of the device.
Keywords: linear-to-rotary, motion transduction, transduction ratio, comb-drive actuator.

Ngày gửi bài: 21/06/2022

Ngày chấp nhận đăng: 07/10/2022