

**PHÁT TRIỂN CƠ CẤU CHẤP HÀNH QUAY SỬ DỤNG PHẦN TỬ ÁP ĐIỆN**

Lê Thế Truyền, Nguyễn Minh Phú, Trịnh Tiến Thọ

*Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Tp. HCM*

Ngày nhận bài: 08/12/2015

Ngày chấp nhận đăng: 15/1/2016

**TÓM TẮT**

Bài báo giới thiệu một cơ cấu định vị chính xác cao 2 DOF (Degree Of Freedom – bậc tự do) cung cấp chuyển động phẳng dọc theo trục X và chuyển động quay quanh trục Z ở tỉ lệ nano. Chuyển động quay được điều khiển theo cả 2 chiều: chiều kim đồng hồ và chiều ngược lại. Cơ cấu được thiết kế dựa trên nguyên lý sử dụng các khớp bản lề đàn hồi và hai phần tử áp điện (piezoelectric) làm nguồn phát chuyển động. Cơ cấu dẫn động dạng xung nhỏ (Smooth Impact Driving Mechanism – SIDM) được áp dụng để tạo ra chuyển động quay. Phép phân tích phần tử hữu hạn thông qua phần mềm thương mại ANSYS được áp dụng để đánh giá cơ cấu định vị. Một cơ cấu định vị mẫu đã được chế tạo và tiến hành hàng loạt thí nghiệm để đánh giá tính năng của cơ cấu theo thời gian. Kết quả thực nghiệm cho thấy cơ cấu này có thể thực hiện góc quay  $0,11^{\circ}$ .

**Từ khóa:** phần tử áp điện, cơ cấu định vị quay, cơ cấu chấp hành quay.

**1. GIỚI THIỆU**

Ngày nay, hệ định vị chính xác đặc biệt cần thiết trong nhiều lĩnh vực khoa học ứng dụng bao gồm đo lường chính xác, gia công trên chất bán dẫn, in thạch bản tia X... Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các lĩnh vực này, nhu cầu về các thiết bị chính xác với độ phân giải dịch chuyển cao, dải chuyển động rộng và tốc độ đáp ứng cao ngày càng tăng.

Điều khiển độ dịch chuyển một cách chính xác thực sự cần thiết trong các kính hiển vi, giao thoa kế cơ điện, thiết bị quang học, cơ cấu định vị X-Y, lắp ráp các chi tiết với kích thước micro và trong vi phẫu thuật. Các lực bám dính bề mặt như lực tĩnh điện, lực van der Waals và sức căng bề mặt trở nên đáng kể khi kích thước vật lý nhỏ hơn 1 milimet. Thao tác lắp ráp các chi tiết có kích thước micro bằng tay trở nên khó khăn do sự kết dính dẫn đến việc định vị các chi tiết không được chính xác. Đã có nhiều nghiên cứu về các cơ cấu và hệ thống chấp hành micro nhằm đạt được sự định vị chính xác. Dựa trên nguyên lý hoạt động, cơ cấu micro có thể phân thành các loại động cơ dạng “sâu đo” (inchworm motors), cơ cấu dạng “dính-trượt” (stick-slip actuators), cơ cấu dạng xung (impact actuators). Các cơ cấu chấp hành dạng xung có kích cỡ micro được quan tâm nhiều do dễ chế tạo, có khả năng xử lý hàng loạt, ít bị gây nhiễu bởi môi trường, có độ chính xác cao và năng lượng đầu ra cũng như tốc độ đáp ứng của các chi tiết dẫn động cao. Cơ cấu sử dụng hai loại lực: lực đẩy và lực quán tính sinh ra do sự giãn nở nhanh của các chi tiết dẫn động và sự va chạm cơ học giữa các bộ phận khác nhau. Tuy nhiên, hiện tượng xung làm cho hệ thống dẫn động không mượt (non-smooth) gây ra nguồn phi tuyến mạnh mẽ. Việc nghiên cứu các đặc tính của hệ thống động lực không mượt là một thách thức khi chỉ sử dụng các công cụ hệ thống động lực truyền thống.

Một loại cơ cấu chấp hành khác với các chi tiết dẫn động có độ giãn nở chậm và độ co rút nhanh được đề xuất. Đây là dạng hiệu chỉnh để cơ cấu dẫn động dạng xung (Impact Driving Mechanism – IDM) có chuyển động êm và được gọi là cơ cấu dẫn động dạng xung nhỏ (Smooth Impact Driving Mechanism – SIDM). Bộ phận chính trong cơ cấu dẫn động dạng xung không thể dịch chuyển với độ phân giải cao khi sử dụng chính sự chuyển vị của cơ cấu dẫn động dạng phần tử áp điện, tuy nhiên vấn đề này lại đạt được ở cơ cấu dẫn động dạng

xung nhỏ. Tóm lại, cơ cấu dẫn động dạng xung nhỏ có sự truyền động êm hơn, tần số hoạt động cao hơn và độ phân giải định vị cao hơn so với cơ cấu dẫn động dạng xung.

Sự chuyển động của các chi tiết dẫn động có thể đạt được thông qua tác động điện từ, áp điện, quang nhiệt hay tĩnh điện. Vì các phần tử áp điện (piezoelectric) cung cấp chuyển vị có độ phân giải cao, lực tạo ra lớn và tốc độ đáp ứng cao nên đa số các thiết bị chính xác cao được phát triển dựa trên cơ cấu dẫn động dạng phần tử áp điện. Tuy nhiên, hành trình của cơ cấu dẫn động dạng phần tử áp điện là vô cùng nhỏ, cỡ vài chục  $\mu\text{m}$ . Một vài thiết bị truyền động đã được đề xuất để khắc phục vấn đề này [4], [7], [8].

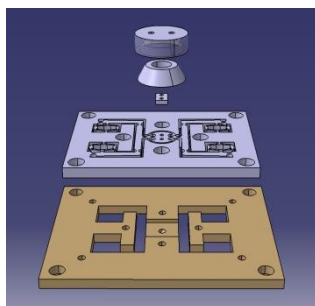
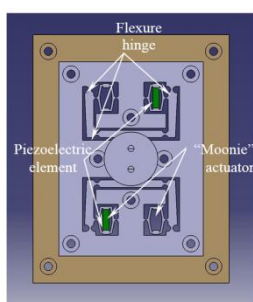
Bài báo này trình bày một nghiên cứu về cơ cấu chấp hành quay sử dụng cơ cấu định vị 2 bậc tự do đơn giản dựa trên nguyên lý SIDM. Cơ cấu chấp hành quay bao gồm một bộ khuếch đại cơ khí nhằm tăng độ dịch chuyển của phần tử áp điện (piezoelectric) và một cơ cấu quay. Phần mềm thương mại ANSYS được sử dụng để đánh giá tính năng của cơ cấu định vị cũng như phép phân tích phần tử hữu hạn. Một cơ cấu định vị mẫu đã được chế tạo và kiểm chứng.

## 2. ĐỀ XUẤT CỦA CƠ CẤU ĐỊNH VỊ CHUYỂN ĐỘNG

### 2.1. Thiết kế cơ cấu định vị

Thiết bị định vị được đề xuất có 2 phần chính: một cơ cấu đàn hồi và một cặp chi tiết ma sát được thể hiện trong hình 1, hình 2 và hình 3. Biến dạng thu được bằng cách đặt một điện áp vào phần tử áp điện. Sự biến dạng của phần tử áp điện sẽ làm cho cơ cấu đàn hồi biến dạng tạo ra sự dịch chuyển mong muốn.

Cơ cấu đàn hồi là một cấu trúc nguyên khối. Nó bao gồm các cơ cấu chấp hành “Moonie” [1], [5] và hệ thống khuếch đại dựa trên các đòn bẩy và khớp bản lề đàn hồi. Việc sử dụng các khớp bản lề đàn hồi làm cho thiết bị đơn giản hơn đồng thời làm thu nhỏ toàn bộ thiết bị. Có 2 phần tử áp điện được sử dụng, các phần tử áp điện kết hợp với cơ cấu chấp hành “Moonie” để tạo ra sự dịch chuyển với tỷ lệ nano. Khi 2 phần tử áp điện được kích thích bởi một điện áp đầu vào, xuất hiện sự dịch chuyển theo chiều dọc của các phần tử áp điện này, từ đó tạo ra chuyển động quay của phần trung tâm cấu trúc đàn hồi.



**Hình 1. Cơ cấu đàn hồi**

**Hình 2. Các bộ phận lắp ghép**

**Hình 3. Cặp chi tiết ma sát**

Một cơ cấu quan trọng khác là cặp chi tiết ma sát, nó bao gồm một nắp quay và một đế. Cặp chi tiết ma sát được thiết kế để tạo ra một bề mặt ma sát giữa nắp quay và đế. Mặt trên của đế là bề mặt sử dụng để tạo ra ma sát. Có 2 lỗ bắt ốc trên đế để kết nối với phần trung tâm của cơ cấu đàn hồi thông qua một tấm lót mỏng. Lực ma sát giữa 2 chi tiết có thể được thay đổi bởi việc thay đổi tải trên nắp quay.

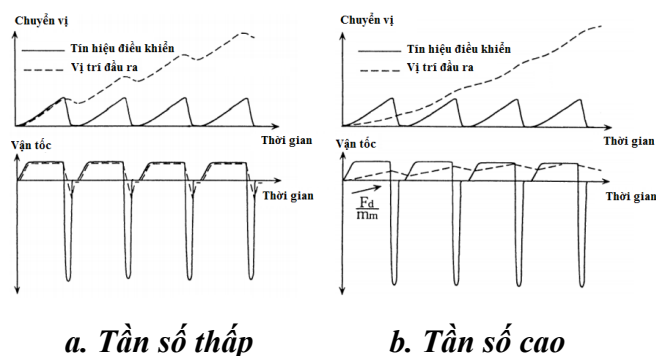
## 2.2. Nguyên lý hoạt động

Như được đề cập ở phần trước, bậc tự do đầu tiên là chuyển động quay xung quanh trục z. Chuyển động quay dựa trên cơ chế điều khiển tác động mượt [8]. Cơ chế này là sự hiệu chỉnh của cơ chế điều khiển tác động để có chuyển động mượt hơn. Trong đó, lực quán tính và ma sát do sự giãn nở/thu ngắn của các phần tử truyền động được dùng để tạo ra chuyển động quay của phần tử chuyển động.

Quay lại với chủ đề, cơ cấu đàn hồi với các phần tử áp điện (piezo) là nguồn chuyển động (phần tử dẫn động) cho SIDM. Nó tạo ra các dao động quay và các dao động này được truyền đến đế ma sát. Bằng cách này, nếu nguồn điện điều khiển của các phần tử áp điện có hình dạng răng cưa với giai đoạn “tăng chậm” và giai đoạn “giảm nhanh” thì quỹ đạo chuyển động của đế ma sát cũng sẽ có hình dạng tương tự, và nắp quay cũng sẽ dính hoặc trượt theo cùng với đế ma sát. Giai đoạn đế ma sát quay chậm thì nắp quay chuyển động theo do hiện tượng dính. Giai đoạn đế ma sát quay về nhanh thì nắp quay sẽ giữ nguyên vị trí trước đó (bị trượt) do không theo kịp chuyển động của đế. Như vậy, sự chuyển động có thể được chia làm 2 loại: chuyển động ở tần số điều khiển thấp và chuyển động ở tần số điều khiển cao.

Ở tần số điều khiển thấp thì nắp quay sẽ chuyển động theo cùng với đế. Tuy nhiên, chuyển động “trượt” sẽ thế chỗ cho chuyển động “không trượt” khi lực ma sát tĩnh giữa đế ma sát và nắp quay nhỏ hơn lực tác động. Như thế, khi hiện tượng trượt xảy ra nắp quay gần như không chuyển động bởi vì lực quán tính của nó lớn (Hình 4a).

Tuy nhiên, tại tần số điều khiển cao, hiện tượng trượt luôn luôn xảy ra ngay cả trong quá trình giãn nở chậm của vật liệu áp điện. Hình 4b trình bày độ dịch chuyển vị của piezo và nắp quay trong trường hợp tần số điều khiển cao. Độ dịch chuyển góc và vận tốc của nắp quay tăng lên tại thời điểm một xung điện áp do sự khác nhau giữa thời gian các giai đoạn giãn nở chậm và thu ngắn nhanh.



**Hình 4. Nguyên lý chuyển động**

Mặt khác, nếu nguồn điện áp điều khiển của các phần tử áp điện có một hình dạng mượt thì chuyển động trượt sẽ không thể xảy ra. Vì vậy độ dịch chuyển góc của nắp quay phải tương ứng với sự quay của đế ma sát. Kết quả là nắp quay có thể được định vị một cách chính xác.

Bậc tự do thứ 2 là chuyển động phẳng. Để thực hiện loại chuyển động này, điều cần thiết là cung cấp 50% điện thế vào các phần tử áp điện để cơ cấu đàn hồi thu được vị trí mong muốn. Theo cách này, phần trung tâm của cơ cấu đàn hồi sẽ thực hiện chuyển động phẳng nếu điện thế bị thay đổi ngược lại tại phần tử áp điện đầu tiên và phần tử áp điện thứ hai. Do

đó độ chính xác chuyển động chỉ phụ thuộc vào độ chính xác của sự biến dạng các phần tử áp điện.

### 3. PHÂN TÍCH FEM

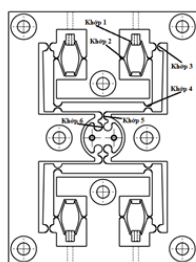
#### 3.1. Mô hình hóa

Để đánh giá đáp ứng của cơ cấu định vị, phân tích FEM (Finite Element Model – Mô hình phần tử hữu hạn) được áp dụng. Phần mềm ANSYS được sử dụng để mô phỏng đáp ứng của cơ cấu. Từ cấu trúc được thiết kế như trong hình 1, mô hình 2D của cơ cấu định vị được xây dựng với các khớp đàn hồi như được thể hiện trong hình 5.

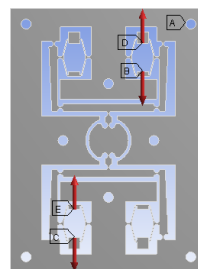
Trong mô hình này, cơ cấu định vị với 2 bậc tự do (dọc theo hướng trục x và y) được áp dụng để mô phỏng cấu trúc đàn hồi. Nguồn phát động là chuyển vị của phần tử áp điện được cơ cấu dùng để tạo ra sự biến dạng trên cơ cấu chấp hành “Moonie” như được trình bày ở hình 6. Vật liệu trong nghiên cứu này là nhôm dura.

#### 3.2. Các thông số tối ưu

Các thông cơ bản của mô hình được thể hiện trong Bảng 1. Nhằm đơn giản bài toán tối ưu, một số thông số của cơ cấu chấp hành Moonie và khớp đàn hồi được đặt trước. Các thông số khác được tối ưu nhằm tối đa độ khuếch đại và các điều kiện hoạt động.



**Hình 5: Mô hình 2D của cơ cấu định vị với khớp đàn hồi**



**Hình 6: Vị trí đặt lực của các phần tử áp điện**

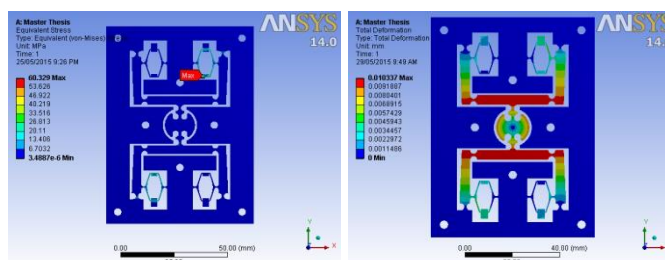
**Bảng 1: Các thông số mô hình cơ cấu định vị**

Biến số	Giá trị [mm]	Ghi chú
R_1	0.24	Bán kính khớp 1
T_1	0.31	Chiều dày của khớp 1
R_2	Tối ưu hóa	Bán kính khớp 2
T_2	Tối ưu hóa	Chiều dày của khớp 2
R_F	6.24	Bán kính góc bo của “Moonie”
R_3	Tối ưu hóa	Bán kính khớp 3
T_3	Tối ưu hóa	Chiều dày của khớp 3
R_4	Tối ưu hóa	Bán kính khớp 4
T_4	Tối ưu hóa	Chiều dày của khớp 4
R_5	Tối ưu hóa	Bán kính khớp 5
T_5	Tối ưu hóa	Chiều dày của khớp 5
R_6	Tối ưu hóa	Bán kính khớp 6
T_6	Tối ưu hóa	Chiều dày của khớp 6
T	5	Chiều dày của cơ cấu đàn hồi
W_A	69	Chiều rộng của cơ cấu đàn hồi
L_A	93	Chiều dài của cơ cấu đàn hồi

Sử dụng module “Goal Driven Optimization” trong phần mềm ANSYS, các thông số tối ưu hóa thu được trong Bảng 2.

**Bảng 2: Các thông số được tối ưu**

Biến	R_2	T_2	R_3	T_3	R_4
Giá trị được tối ưu [mm]	0.757	0.301	0.983	0.397	1.107
Giá trị xấp xỉ [mm]	0.76	0.3	1	0.4	1.1
Biến	T_4	R_5	T_5	R_6	T_6
Giá trị được tối ưu [mm]	0.413	1.229	0.344	1.229	0.344
Giá trị xấp xỉ [mm]	0.4	1.23	0.34	1.23	0.34



**Hình 7. Các kết quả phân tích ANSYS**

Các kết quả phân tích thu được từ ANSYS về ứng suất tập trung tối đa và chuyển động khuếch đại được thể hiện trong hình 7. Những kết quả mô phỏng này cho thấy ứng suất tập trung tối đa là 66.33MPa, và chuyển vị tối đa là 21.2 $\mu$ m. Ứng suất tập trung tối đa là nhỏ hơn ứng suất chảy của nhôm dura là 324MPa. Do đó cấu trúc được thiết kế và vật liệu được chọn là phù hợp với việc chế tạo thực tế.

### 3.3. Mô phỏng chuyển động

Kết quả mô phỏng chuyển vị góc quay theo dịch chuyển của phần tử áp điện được trình bày ở bảng 3. Điện áp cung cấp cho phần tử áp điện từ 0V đến 100V. Ở mỗi giá trị điện áp, phần tử áp điện dịch chuyển tương ứng từ 1 $\mu$ m đến 6.1 $\mu$ m. Góc quay lớn nhất tương ứng với điện áp 100V cung cấp cho phần tử áp điện là 0.17 $^{\circ}$ , góc quay nhỏ nhất là 0.028 $^{\circ}$  tương ứng với điện áp 16.6V cung cấp cho phần tử áp điện.

**Bảng 3: Các kết quả chuyển động của cơ cấu định vị**

Điện áp cấp [V]	Độ dịch chuyển của piezo [ $\mu$ m]	Góc quay của phần trung tâm [ $^{\circ}$ ]	Ứng suất tập trung [MPa]
0	0	0	0
16.6	1	0.0285	10.874
33.3	2	0.0569	21.747
50	3	0.0854	32.621
66.6	4	0.1138	43.495
83.3	5	0.1423	54.369
100	6.1	0.1736	66.33

## 4. CÁC KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

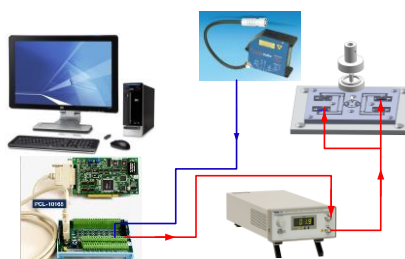
Từ mô phỏng và các kết quả tối ưu các thông số thiết kế, mô hình thực tế được chế tạo. Để kiểm tra hoạt động của mô hình thực tế, kết cấu thực nghiệm được xây dựng như trong hình 8 và hình 9. Trong bài báo này, biến dạng tĩnh của phần trung tâm và chuyển động của nắp quay thu được và được phân tích.

Một chương trình được thiết kế trong môi trường Matlab để tạo tín hiệu điện áp cung cấp cho phần tử áp điện. Vì điện áp lớn nhất được xuất từ máy tính là 5V nên tín hiệu này cần phải được khuếch đại lên để cung cấp cho phần tử áp điện.

Trong các thực nghiệm mà các tác giả đã thực hiện, bộ khuếch đại điện áp Thorlabs được sử dụng để khuếch đại tín hiệu điều khiển đến với điện áp của các phần tử áp điện. Hệ số khuếch đại được sử dụng là 20. Các độ dịch chuyển của cặp chi tiết ma sát được đo bằng cách sử dụng cảm biến vị trí laser có độ phân giải cao. Hoạt động của hệ thống được điều khiển bởi MatLab Simulink Toolbox thông qua card điều khiển PCI-1711. Tín hiệu điện áp điều khiển với biên độ và tần số khác nhau được xuất từ máy tính thông qua card điều khiển PCI đến bộ khuếch đại điện áp. Tín hiệu điện áp sau khi được khuếch đại sẽ cung cấp đến 2 phần tử áp điện. Các phần tử áp điện chuyển năng lượng điện này sang dịch chuyển cơ học, từ đó tạo chuyển động quay cho nắp quay theo nguyên lý SIDM.



Hình 8. Mô hình thực tế



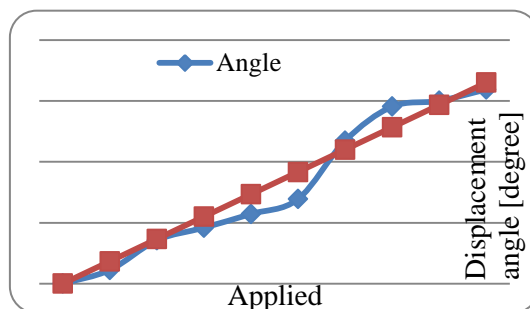
Hình 9. Kết cấu thực nghiệm

#### 4.1. Chuyển động tĩnh

Để kiểm tra chuyển động tĩnh, các phần tử áp điện được áp một điện áp cố định, và chuyển vị của góc phần trung tâm được đo ở trạng thái ổn định. Với kết quả này, mối quan hệ giữa điện áp cấp và góc chuyển động được thể hiện trong Bảng 4 và hình 10.

Bảng 4: Đáp ứng tĩnh

Điện áp [V]	10	20	30	40	50
Góc [°]	0	0.011	0.036	0.046	0.057
Điện áp [V]	60	70	80	90	100
Góc [°]	0.069	0.117	0.145	0.15	0.159



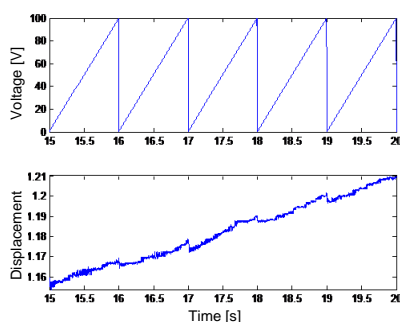
Hình 10. Mối quan hệ giữa điện áp cấp và góc chuyển động

Kết quả trên chứng minh rằng góc chuyển động của phần trung tâm là gần như trùng với kết quả mô phỏng đã được nghiên cứu trong phần 3. Tuy nhiên, chuyển động góc đã chỉ diễn ra nếu điện áp cấp lớn hơn 20V. Khi điện áp 20V cấp cho piezo thì góc quay đạt được là 0.11o. Mối quan hệ giữa điện áp và chuyển động góc có thể được xem như là tuyến tính. Góc dịch chuyển lớn nhất là 0.16o khi điện áp cung cấp là 100V.

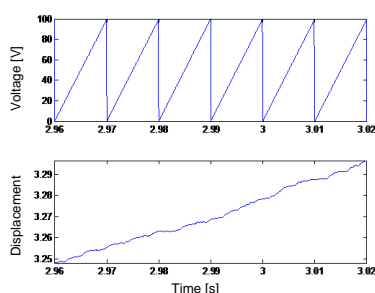
## 4.2. Đáp ứng động học

Để kiểm tra đáp ứng động học hệ thống, tín hiệu tam giác với các tần số khác nhau tại biên độ 100V được áp dụng vào các phần tử áp điện.

Hình 11 và hình 12 thể hiện dịch chuyển của nắp quay tại các tần số là 1Hz và 100Hz. Nó cho thấy rằng tại tần số thấp, chuyển động của nắp quay là không liên tục. Tại tần số cao (100Hz), nắp quay chuyển động mượt hơn. Do đó, các kết quả này đã xác thực được nguyên lý chuyển động đã được giới thiệu trong hình 4.

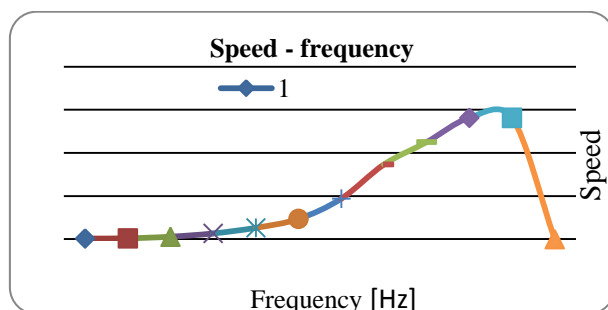


**Hình 11. Chuyển động của nắp quay tại tần số 1Hz**



**Hình 12. Chuyển động của nắp quay tại tần số 100Hz**

Để xác nhận sự ảnh hưởng của tần số đến chuyển động của nắp quay, một số tần số khác được sử dụng cho hệ thống. Đáp ứng hệ thống với các tần số được thể hiện trong hình 12. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng hệ thống có băng thông là khoảng  $0 \div 600\text{Hz}$ . Do đó, tần số phát động cho hoạt động của hệ thống sẽ không được lớn hơn 600Hz. Bên cạnh đó, kết quả từ hình 13 chỉ ra rằng tốc độ quay của nắp quay có thể được thay đổi bằng cách thay đổi tần số đầu vào.



**Hình 13. Đáp ứng tần số hệ thống**

Từ các kết quả tĩnh và động, ta có thể kết luận rằng tốc độ quay có thể được điều khiển bởi cả tần số và biên độ của tín hiệu phát động. Để có chuyển động mượt mà, tần số phát

động nên lớn hơn 50Hz. Sự kết hợp giữa tần số và biên độ của tín hiệu phát động sẽ điều khiển chính xác tốc độ và vị trí của nắp quay.

## 5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, một cơ cấu định vị chính xác cao được đề xuất. Thiết kế, mô phỏng, chế tạo và thực nghiệm đã được thực hiện và mô tả. Một thiết bị định vị 2 bậc tự do với độ phân giải cao và hành trình góc quay không giới hạn đã được phát triển. Kết quả mô phỏng của thiết bị định vị được thực hiện bởi FEM, kích thước hình học và phân bố ứng suất khá tốt đã được đưa ra. Dịch chuyển của phân tử áp điện được khuếch đại lên nhiều lần nhờ bộ khuếch đại cơ khí. Trong quá trình thực nghiệm dạng sóng đặc biệt của điện áp điều khiển được sử dụng để tạo ra sự quay SIDM. Theo cách này vận tốc góc của nắp quay có thể được điều khiển hiệu quả bằng cách thay đổi tần số điều khiển.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Paros J.M., Weisbord L., “How to Design Flexure Hinges”, Machine Design, 1965, pp. 151-156
- [2] X. Zhao, “Modeling hysteresis and its inverse model using neural network based on expanded input space method”, IEEE transaction on Control system Technology, 2008
- [3] H. Herr et al, “Cyborg technology – biomimetic orthotic and prosthetic technology”, Biologically Inspired Intelligent Robots, 2003, 103-144
- [4] K. J. Gabriel et al, “A micro rotary actuator using shape memory alloys”, Sensors and Actuators, 1988
- [5] Ing. Qiaoling Meng, “A Design Method for Flexure-Based Compliant Mechanisms on the Basis of Stiffness and Stress Characteristics”, Ph.D Thesis at Università di Bologna, 2012
- [6] Pekka Ronkanen, "Current Measurement in Control and Monitoring of Piezoelectric Actuators", PhD Thesis at Tampere University of Technology, 2008
- [7] Ruizhou Wang and Xianmin Zhang, “Design and Test of A novel Planar 3-DOF Precision Positioning Platform with A Large Magnification”, 2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), 27-31 October 2014, Taipei
- [8] Wenfeng Hou, “Analysis of Three Nodes Flexure Hinge Element in Ultra-Precision Positioning Stage”, 2014 7th International Conference on Bio-Medical Engineering and Informatics (BMEI 2014).