

Thiết kế và chế tạo hệ thống Mini-robot với các Micro-container dựa trên công nghệ Vi Cơ Điện tử (MEMS)

Vũ Ngọc Hùng¹, Đặng Bảo Lâm², Phạm Hồng Phúc^{2,*}

¹Viện ITIMS, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Cơ Khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 14 tháng 10 năm 2009

Tóm tắt. Bài báo trình bày công việc thiết kế và chế tạo hệ thống mini-robot (MRS) dùng để di chuyển micro-container thông qua cơ cấu thanh răng cóc và cơ cấu kích hoạt tĩnh điện kiểu răng lược (electrostatic comb actuator). Các mô đun của MRS có kích thước $6 \times 6 \text{ mm}^2$ được chế tạo bởi công nghệ Vi Cơ Điện tử (MEMS), có thể được lắp ghép để tạo thành một hệ vận tải hoàn chỉnh sử dụng cho nhiều mục đích khác nhau như hệ phân tích tổng hợp micro (μ -TAS) để vận chuyển và phân loại các vật mẫu có kích thước micromét. Các tính toán về lực trong hệ thống được tiến hành để xác định điện áp kích hoạt cần thiết. Trong phần thực nghiệm, micro-container được kích hoạt thử nghiệm với dải tần số từ 1Hz đến 40Hz. Vận tốc đo được của micro-container hoàn toàn phù hợp với kết quả tính toán lý thuyết.

Từ khóa: MEMS, cơ cấu kích hoạt tĩnh điện, kiểu răng lược, MRS...

1. Mở đầu

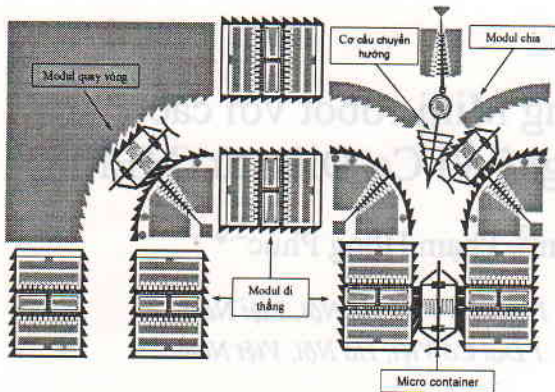
Bài báo giới thiệu một hệ thống mini-robot (MRS) được sản xuất từ vật liệu silic dùng để dẫn động những container có kích thước micro theo những quỹ đạo định sẵn, được cải tiến từ [1, 2]. Các container (với chiều rộng có thể thay đổi) được dẫn động bởi cơ cấu kích hoạt kiểu tĩnh điện kích thước micro và hệ thống thanh răng cóc. Hệ thống dẫn động tương tự đã được đề cập lần đầu tiên tại phòng thí nghiệm quốc gia Sandia, Hoa Kỳ [3]. Từ các mô đun cơ bản là mô đun đi thẳng, quay vòng và chuyển hướng, có thể lắp ghép, xây dựng nhiều phương án khác nhau của hệ thống mini-robot bằng cách kết hợp các mô đun cơ bản kể trên. Trước công trình nghiên cứu này cũng đã có những hệ

thống dùng mô tơ tuyến tính dạng sâu đo [4, 5] với cơ cấu kích hoạt tĩnh điện, tuy nhiên những hệ thống đó có nhược điểm là nguyên tắc điều khiển phức tạp và micro-object chỉ di chuyển được theo đường thẳng. Hệ MRS này có thể được sử dụng trong các hệ phân tích sinh hóa hoặc trong các hệ phân tích tổng hợp (μ -TAS) với nhiệm vụ vận chuyển, phân loại mẫu và lắp ráp...

2. Cấu tạo và nguyên lý làm việc

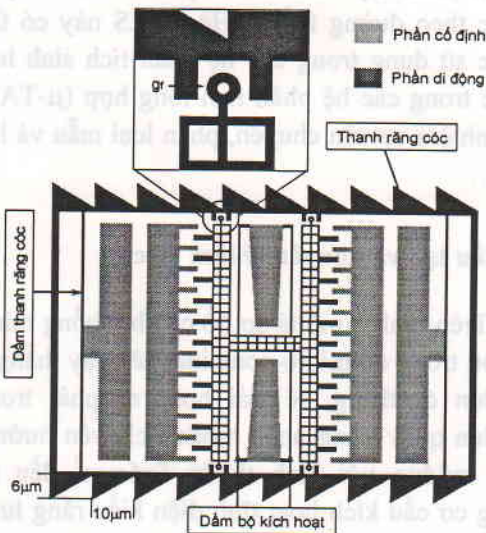
Trên hình 1 mô tả sơ đồ của hệ thống mini-robot, trong đó micro-container sẽ chạy thẳng ở mô đun đi thẳng, rẽ trái hoặc rẽ phải trong mô đun quay vòng hoặc mô đun chuyển hướng. Các mô đun với kích thước $6 \times 6 \text{ mm}^2$ đều sử dụng cơ cấu kích hoạt tĩnh điện kiểu răng lược tuyến tính hoặc xoay.

* Tác giả liên hệ. ĐT: 84-4-38680101.
E-mail: phucph-fme@mail.hut.edu.vn



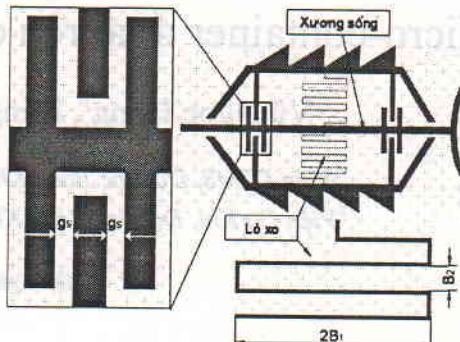
Hình 1. MRS với ba môđun cơ bản.

Hình 2 là sơ đồ cấu tạo của cơ cấu kích hoạt tuyến tính kiểu răng lược, các thanh răng cóc hai bên có dạng lưỡi cửa và có thể chuyển động thẳng nhờ chuyển động tịnh tiến qua lại của cấu trúc răng lược. Qua đó chúng có thể dẫn động micro-container đi theo một hướng và cho phép răng cóc của micro-container trượt (tự do) tương đối với răng của thanh răng cóc theo hướng ngược lại. Bước răng và chiều cao răng cóc lần lượt là $10\mu\text{m}$ và $6\mu\text{m}$. Khe hở g_f giữa phần chuyển động của cơ cấu kích hoạt và thanh răng cóc được thiết kế với mục đích tránh hiện tượng mắc kẹt giữa phần động và tĩnh của cơ cấu kích hoạt kiểu răng lược, đặc biệt trong trường hợp thanh răng cóc bị uốn cong dưới tác dụng của phản lực từ micro-container.

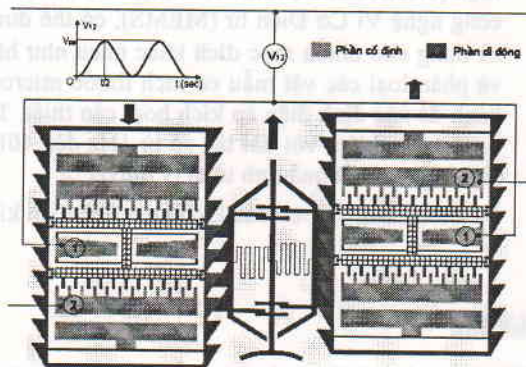


Hình 2. Cơ cấu kích hoạt kiểu răng lược.

Hình 3 và hình 4 mô tả cấu trúc và nguyên lý làm việc của micro-container trong môđun đi thẳng.



Hình 3. Micro-container.



Hình 4. Môđun đi thẳng.

Do các răng cóc trên container có hướng ngược với các răng trên thanh răng cóc nên chuyển động tịnh tiến qua lại được truyền từ cơ cấu kích hoạt qua thanh răng cóc cho phép micro-container tịnh tiến theo một hướng và trượt tự do theo chiều ngược lại. Các khe hở g_s và lò xo giúp cho micro-container có thể thay đổi chiều rộng của nó trong quá trình hoạt động (hình 3). Khi đặt một điện áp xoay chiều V_{12} giữa các bản cực tĩnh (2) và động (1), thanh răng cóc được dẫn động từ các bản cực động sẽ chuyển động tịnh tiến qua lại do tác động của lực tĩnh điện và lực đàn hồi của hệ thống dầm treo. Trên hình 4 thanh răng cóc bên phải chuyển động hướng lên phía trước kéo theo micro-container, cùng lúc đó, thanh răng cóc bên trái di chuyển theo hướng ngược lại sẽ trượt

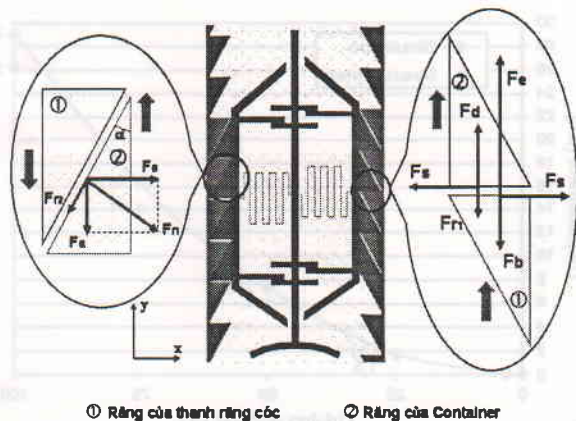
tương đối so với răng cóc của micro-container và do đó, sẽ không ảnh hưởng đến chiều chuyển động của xe. Hình 5 mô tả sơ đồ của môđun quay vòng. Với cơ cấu kích hoạt kiểu răng lược xoay, micro-container có thể rẽ phải hoặc rẽ trái.



Hình 5. Môđun quay vòng.

3. Tính toán lực cho hệ thống

Xét hệ thống ở nửa đầu chu kỳ chuyển động, khi thanh răng cóc bên phải tịnh tiến lên trước và thanh răng cóc bên trái chuyển động ngược lại. Hình 6 biểu diễn các lực tương tác giữa cơ cấu kích hoạt với micro-container.



① Răng của thanh răng cóc ② Răng của Container

Hình 6. Các lực tác động trên hệ thống.

Ở phía bên phải của micro-container ta có F_e là lực tĩnh điện tổng hợp, F_s là lực đàn hồi của lò xo micro-container, F_b là lực đàn hồi của hệ thống dầm cơ cấu kích hoạt - F_b tác động lên răng của thanh răng cóc của cơ cấu kích hoạt, F_{r1} là lực ma sát giữa micro-container và nền silic. Ta có thể xác định được lực $F_d = F_e - F_b$ sẽ chính là lực dẫn động cho micro-container.

Ở phía bên trái của micro-container, khi xe chuyển động sẽ xảy ra trượt tương đối giữa các răng của hai thanh răng cóc. Do đó ở đây sẽ xuất hiện hai lực là lực pháp tuyến F_n và lực ma sát F_{r2} giữa các răng. Tiếp theo có thể phân tích F_n thành hai lực thành phần F_a và F_s theo hai phương y,x. Dưới đây là công thức tính toán các lực nêu trên:

$$F_e = \frac{nh\varepsilon\varepsilon_0}{g} V^2 \tag{1}$$

$$F_s = k_x \cdot x = \frac{3EI_1}{B_1^3} \left[\frac{2B_1^2 + 3B_1B_2 + B_2^2}{26B_1^2 + 81B_1B_2 + 52B_2^2} \right] \cdot x \tag{2}$$

$$F_b = k_y \cdot y = \left[\frac{96EI_2}{L_1^3} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1 + 4L_2} \right) + \frac{4Ehb^3}{L^3} \right] \cdot y \tag{3}$$

$$F_{r1} = f_m mG \tag{4}$$

$$F_a = F_n \sin\alpha = F_s \tan\alpha \tag{5}$$

$$F_{r2} = f_m F_n = f_m \frac{F_s}{\cos\alpha} \tag{6}$$

Trong các phương trình từ (1) đến (6), các thông số lần lượt được chọn như sau: góc nghiêng của răng $\alpha=30^\circ$, số bản cực di động $n=100$, chiều dày của bản cực $h=30\mu\text{m}$, khoảng cách giữa hai bản cực $g=2\mu\text{m}$, ε và ε_0 lần lượt là hằng số điện môi của không khí và chân không, k_x và x là độ cứng và chuyển vị của hệ thống lò xo của micro-container theo phương x, các kích thước của lò xo lần lượt là $B_1 = 50\mu\text{m}$ và $B_2 = 10\mu\text{m}$ (hình 3), $E = 169\text{GPa}$ là modul đàn hồi của silic. I_1 và I_2 là mô men quán tính của tiết diện của lò xo xe và dầm của cơ cấu kích hoạt.

k_y và y là độ cứng và chuyển vị của hệ thống dầm theo phương y , $bw = 2.5\mu\text{m}$, $L_1 = 450\mu\text{m}$ và $L_2 = 20\mu\text{m}$ là các kích thước của dầm của cơ cấu kích hoạt. $L = 450\mu\text{m}$ và $b = 3\mu\text{m}$ lần lượt là chiều dài và chiều rộng của dầm của thanh răng cóc. Hệ số ma sát giữa silic - silic $f_m = 0.38$, m là khối lượng của xe micro-container và G là gia tốc trọng trường.

Từ hình 6, ta có thể tính được tổng lực cản F_h tác động vào micro-container theo phương trình sau:

$$F_h = F_b + F_{r1} + F_a + F_{r2} \cos \alpha \tag{7}$$

$$\Rightarrow F_h = F_b + F_{r1} + F_s \tan \alpha + f_m F_s$$

Chuyển vị tối thiểu cần thiết của cơ cấu kích hoạt để xe có thể chuyển động lên phía trước phải thỏa mãn điều kiện:

$$y \geq (g_f + 2g_s + p/2)$$

Trong đó:

- $g_f = 2\mu\text{m}$, $g_s = 2.5\mu\text{m}$ (Hình 2, 3)

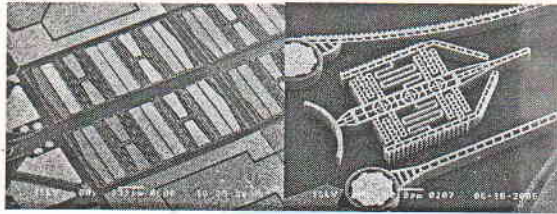
- $p = 10\mu\text{m}$ - bước răng của thanh răng

Từ đó ta tính được lực hãm F_h bằng $174.14\mu\text{N}$. Như vậy để đảm bảo chuyển động lên phía trước của xe, lực tĩnh điện F_e cần phải lớn hơn lực hãm F_h , hay nói một cách khác, qua tính toán ta thấy điện áp V cần thiết phải lớn hơn hoặc bằng $114.5(\text{V})$.

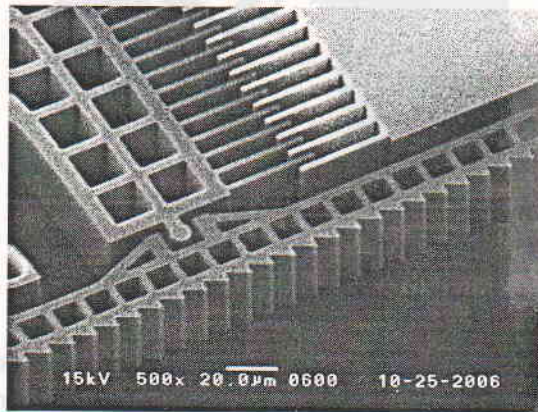
4. Chế tạo và đánh giá các đặc tính

Hệ MRS được chế tạo từ tấm silic kép (Silicon On Insulator – SOI wafer) sử dụng các công nghệ MEMS tiêu chuẩn. Sau khi thực hiện quá trình ăn mòn khô ion hoạt hóa sâu (Deep-RIE) đến độ sâu $30\mu\text{m}$ tới lớp oxit silic (SiO_2), quá trình ăn mòn bằng khí HF bay hơi sẽ được thực hiện để bóc đi lớp SiO_2 với mục tiêu tạo ra các phần chuyển động của cơ cấu kích hoạt như

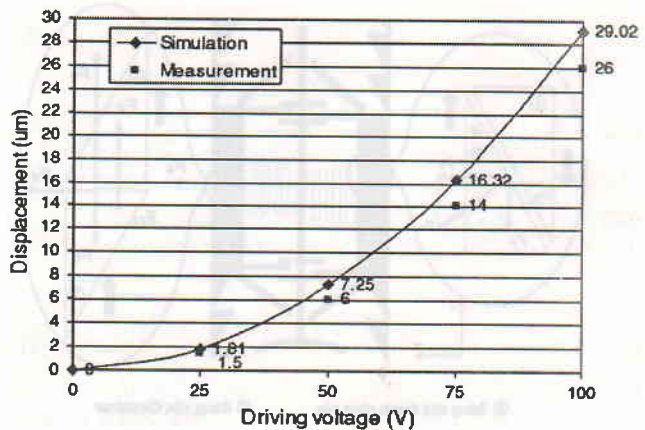
các bản cực động, dầm và thanh răng cóc. Tốc độ ăn mòn của dung dịch HF đậm đặc nồng độ 46% đạt được khoảng $0.2\mu\text{m}/\text{phút}$ tại nhiệt độ 40°C [1]. Dưới đây là ảnh chụp SEM (Scanning Electron Microscope) các kết quả đạt được:



Hình 7. Môđun đi thẳng và Micro-container.



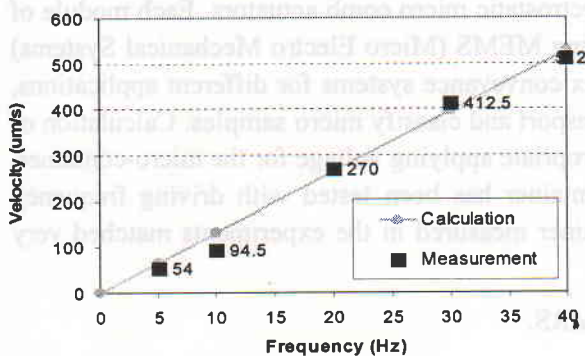
Hình 8. Cơ cấu kích hoạt kiểu răng lược và thanh răng cóc.



Hình 9. Quan hệ chuyển vị với điện áp kích hoạt.

Đồ thị trên hình 9 thể hiện kết quả đo đặc quan hệ giữa chuyển vị của bộ kích hoạt tĩnh điện và điện áp kích hoạt.

Sau khi ăn mòn bằng axit HF, hệ thống MRS đã được kiểm tra bằng cách cho micro-container chuyển động trong môđun đi thẳng ứng với những tần số khác nhau. Trong chuyển động đi thẳng, vận tốc của xe phụ thuộc vào biên độ và tần số của điện áp kích hoạt. Mỗi quan hệ đó được thể hiện ở đồ thị trên hình 10 sau đây:



Hình 10. Quan hệ tần số kích hoạt với vận tốc của micro-container.

Các kết quả thí nghiệm được đo ứng với dải tần số từ 1+40Hz và điện áp $V_{pp} = 150V$ hoàn toàn phù hợp với những kết quả tính toán lý thuyết.

5. Kết luận

Trong bài báo, các tác giả đã giải quyết bài toán tính toán, thiết kế và chế tạo hệ mini-robot MRS bằng vật liệu silic. Cơ cấu kích hoạt tĩnh điện kiểu răng lược cũng như cả hệ MRS được chế tạo bằng các công nghệ quen thuộc của ngành Vi Cơ Điện tử như quang khắc

(Photolithography), ăn mòn khô ion hoạt hóa sâu (D-RIE), ăn mòn hơi HF ... Hệ MRS sau khi chế tạo đã được đo kiểm tra các đặc tính làm việc như quan hệ chuyển vị - điện áp của bộ kích hoạt, vận tốc của xe container. Các kết quả đo đặc thu được đều phù hợp với tính toán và mô phỏng lý thuyết.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin chân thành cảm ơn Trung tâm công nghệ hệ thống Micro, trường Đại học Ritsumeikan, Nhật Bản đã giúp đỡ chế tạo và quỹ Phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) đã tài trợ cho nhóm nghiên cứu (Mã số đề tài: 107.01.26.09).

Tài liệu tham khảo

- [1] Phuc Hong Pham, *Ph.D thesis*, Ritsumeikan University, Japan, September 2007.
- [2] Phuc Hong Pham et al, Straight movement of micro containers based on ratchet mechanisms and electrostatic comb-drive actuators, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006) 2532.
- [3] Danelle M. Tanner et al, Reliability of a MEMS Torsional Ratcheting Actuator, *IEEE - 39th Annual International Reliability Physics Symposium*, Orlando, Florida, 2001, 81-90.
- [4] R. Yeh, S. Hollar and Kristofer S. J. Pister, Single Mask, Large Force, and Large Displacement Electrostatic Linear Inchworm Motors, *J. Microelectromechanical Systems*, 11 (2002) 330.
- [5] S H Kim, I H Hwang, K W Jo, E S Yoon and J H Lee, "High-resolution Inchworm Linear Motor Based on Electrostatic Twisting Microactuators", *J. Micromech. Microeng* 15 (2005) 1674.

Design and fabrication of Mini-Robot System with Micro-containers based on MEMS technology

Vu Ngoc Hung¹, Dang Bao Lam², Pham Hong Phuc^{2,*}

¹International Training Institute for Materials Science, Hanoi University of Technology,
1 Dai Co Viet, Ha Noi, Vietnam

²School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Technology, 1 Dai Co Viet, Ha Noi, Vietnam

This paper presents the design and fabrication of Mini-Robot System (MRS) with movement of micro-containers based on ratchet mechanism and electrostatic micro comb actuators. Each module of MRS has dimension of $6 \times 6 \text{ mm}^2$, is fabricated by using MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technology, can be assembled to create more complex conveyance systems for different applications, such as in micro total analysis system (μ -TAS) to transport and classify micro samples. Calculation of forces in the MRS was also carried out to find an appropriate applying voltage for the micro-container. In our experiments, the movement of the micro-container has been tested with driving frequency ranges from 1Hz to 40Hz. The velocity of the container measured in the experiments matched very well with theoretical calculation.

Keywords: MEMS, Electrostatic comb actuator, MRS.