

Điều khiển phản hồi vị trí bộ kích hoạt tịnh tiến ứng dụng cho vi bơm kiểu xi lanh

Position Feedback Control for Linear Actuator for Microsyringe Pump Application

Nguyễn Anh Tuấn, Phạm Hồng Phúc*

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội.

Đến Tòa soạn: 24-8-2016; chấp nhận đăng: 20-12-2016

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát, đánh giá ứng dụng của bộ kích hoạt tịnh tiến ECLIA cho vi bơm kiểu xi lanh với phương pháp điều khiển phản hồi vị trí có và không sử dụng tham số điều khiển K_p . Thanh trượt với bước dịch chuyển nano mét tác động vào pittông có thể đẩy ra lượng chất lỏng với thể tích rất nhỏ (μL). Kết quả cho thấy, thể tích chất lỏng được đẩy ra ở đầu xi lanh tỉ lệ thuận với độ dịch chuyển của thanh trượt/pittông. Trong trường hợp điều khiển có tham số K_p thì mức độ tuyến tính của thể tích chất lỏng đẩy ra tốt hơn do không có sự dao động và vượt quá điểm đích xác lập của pittông. Kết quả này hướng tới các ứng dụng hiệu quả của ECLIA như một bộ kích hoạt trong các hệ vi cơ điện tử (MEMS).

Từ khóa: ECLIA, bộ kích hoạt tịnh tiến, điều khiển phản hồi vị trí, vi cơ điện tử.

Abstract

In this study, we investigate a microsyringe pump application of a linear actuator using a position feedback control with and without a tuning gain K_p . The slider pushes the microsyringe directly in step motion with nanometer resolution that repels a very small volume of liquid (μL). Experimental results show that the liquid volume was direct proportion to the slider's stroke. The repelled liquid volume was better linear when using the feedback control with the the tuning gain K_p compared to that without K_p ; it was due to no overshoot and no oscillation of the slider/piston. These results intent to a significant implementation in MEMS of the linear actuator.

Keywords: ECLIA, linear actuator, position feedback control, MEMS

1. Giới thiệu

Trong các vi hệ thống phân tích và đánh giá tổng thể/toàn diện (μTAS) việc thu nhỏ kích thước của thiết bị đồng thời với kiểm soát thể tích dung dịch cỡ pico lít (μL) rất quan trọng. Định lượng chính xác các dung dịch mẫu thử tham gia trong quá trình phản ứng hóa học sẽ làm tăng độ tin cậy của kết quả thử nghiệm. Hệ thống điều khiển vi lượng chất lỏng là sự tích hợp của vi bơm và các van. Để kích hoạt thiết bị vi bơm có thể dùng khí nén [1, 2] hoặc các bộ kích hoạt được thiết kế với ứng dụng của hiệu ứng tĩnh điện [3, 4]; hiệu ứng áp điện [5, 6], hiệu ứng từ [7, 8],...Bộ kích hoạt tịnh tiến ECLIA kết hợp hiệu ứng tĩnh điện và áp điện tạo nên chuyển vị bước nhỏ (nm), hành trình dài (mm) và lực đẩy lớn (mN) của các thanh trượt độc lập nhau [9]. Cấu tạo của ECLIA gồm phần tử kích hoạt PZT, điện cực dẫn động, điện cực giữ và các thanh trượt song song; tất cả được đặt trên một giá đỡ (Hình 1(a)). Với khả năng chuyển động vi bước của các thanh trượt cho phép làm suy giảm mật độ phổ nhằm làm đều năng lượng của các bước sóng, ECLIA được ứng dụng trong truyền dẫn quang nhiều kênh [10]. Nhờ sự kết hợp của lực hút

tĩnh điện và lực đẩy của PZT, ECLIA có thể đóng vai trò như một động cơ tuyến tính có lực đẩy lớn dẫn động cho các thiết bị ngoại vi trong những ứng dụng như vi bơm kiểu màng [11]. Để nâng cao hiệu quả của lực hút tĩnh điện nhằm tăng lực đẩy, chúng tôi đưa ra thanh trượt gồm nhiều lớp polymer và cấu trúc kiểu xương cá [12]. Hệ thống điều khiển phản hồi cũng được áp dụng hướng tới việc kiểm soát vị trí chính xác của thanh trượt. Trong nghiên cứu này chúng tôi khảo sát, đánh giá hiệu quả của việc cải tiến kết cấu thanh trượt và điều khiển phản hồi vị trí khi ứng dụng ECLIA cho vi bơm kiểu xi lanh.

2. Nguyên lý làm việc của bộ kích hoạt tịnh tiến ECLIA

Trong nghiên cứu này chúng tôi giới thiệu một ứng dụng của ECLIA dùng điều khiển phản hồi vị trí cho vi bơm kiểu xi lanh. Vì vậy trong phần này cấu tạo và nguyên lý hoạt động của ECLIA sẽ được trình bày. Bộ kích hoạt gồm các thanh trượt đặt song song trên điện cực dẫn động và điện cực giữ; nguồn dẫn động PZT gắn với điện cực dẫn động bằng keo epoxy; tất cả được đặt trên thân giá đỡ (Hình 1(a)). Sơ đồ tín hiệu điện áp cung cấp cho PZT, điện cực di động, điện cực giữ và thanh trượt được mô tả như hình vẽ 1(c). Xung điện hình thang đặt vào PZT làm

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 987751970

Email: phuc.phamhong@hust.edu.vn

cho nó giãn ra ở sườn lên và co lại ở sườn xuống. Khi cặp điện áp giữa thanh trượt và điện cực giữ /di động trái dấu sẽ sinh ra lực hút tĩnh điện, và do vậy tạo nên một cơ cấu kẹp dùng lực hút tĩnh điện, từ nay sẽ gọi tắt là cơ cấu kẹp tĩnh điện. Còn khi cặp điện áp này cùng dấu thì không còn lực hút tĩnh điện, cơ cấu kẹp tĩnh điện được giải phóng, thanh trượt có thể trượt trên bề mặt của điện cực. Sự phối hợp điện áp như trong hình 1(c) sẽ cho phép thanh trượt di chuyển một bước sau mỗi chu kỳ. Hình 1(b) mô tả bốn giai đoạn tạo nên một bước di chuyển của thanh trượt

1) Cơ cấu kẹp tĩnh điện được hình thành giữa thanh trượt và điện cực dẫn động nhờ cặp điện áp trái dấu đặt lên chúng. Trong khi đó điện áp cùng dấu tạo nên lực đẩy giữa thanh trượt và điện cực giữ.

(2) PZT giãn ra ở sườn lên của xung điện, nó đẩy điện cực dẫn động cùng với thanh trượt (nhờ cơ cấu kẹp tĩnh điện) di chuyển một bước trên bề mặt điện cực giữ.

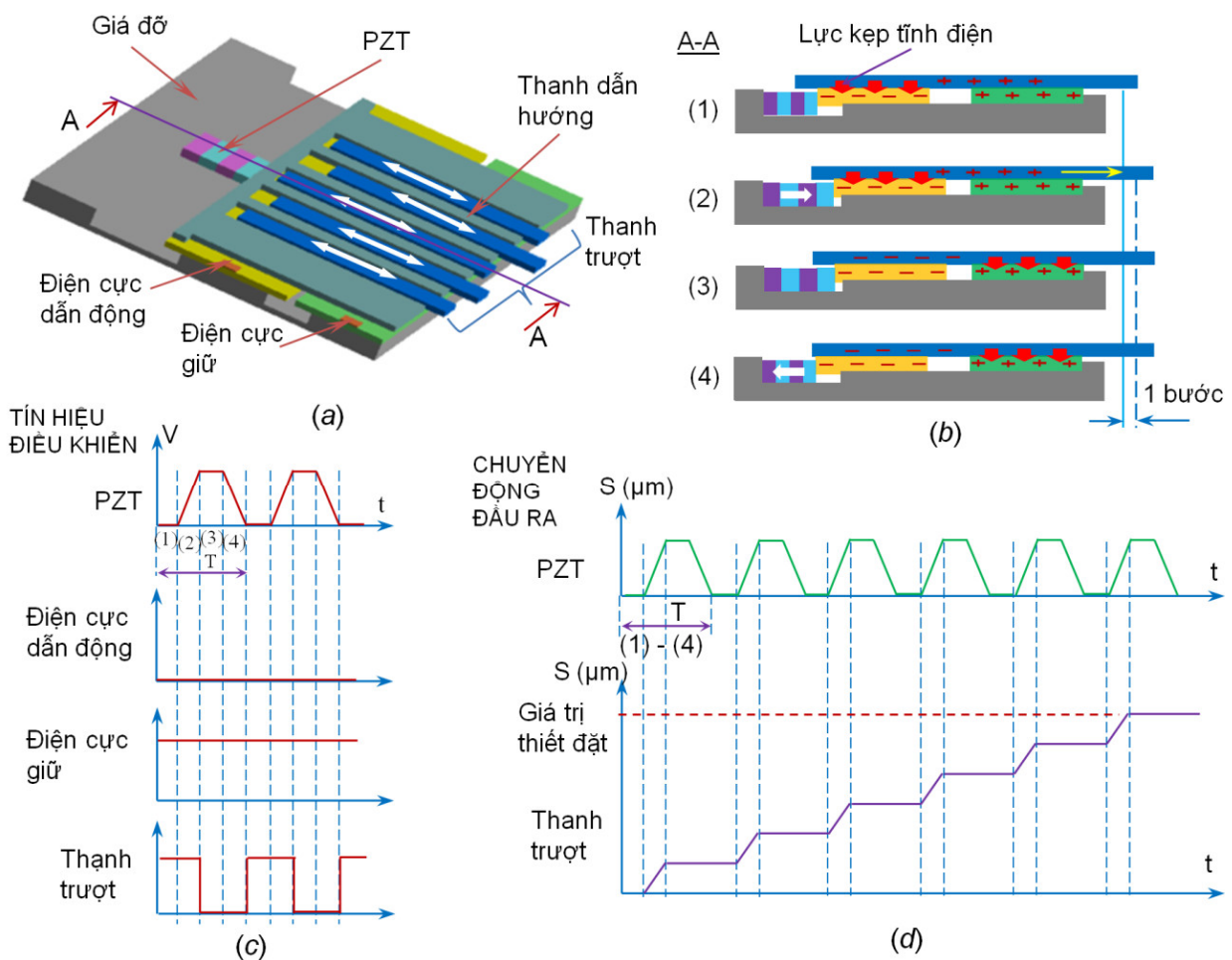
(3) Điện áp của thanh trượt đổi chiều làm cho cơ cấu kẹp tĩnh điện với điện cực dẫn động tách ra, đồng thời hình thành sự kẹp này với điện cực giữ.

(4) Ở sườn xuống của tín hiệu, PZT co lại, mang theo điện cực dẫn động trở về vị trí ban đầu trong khi đó thanh trượt vẫn được giữ yên bởi lực kẹp tĩnh điện với điện cực giữ.

Tín hiệu điều khiển được lặp lại theo chu kỳ T gồm bốn giai đoạn như đã mô tả ở trên cho phép thanh trượt di chuyển được hành trình dài như mong muốn (Hình 1(d)). Trong phần tiếp theo chúng tôi giới thiệu tóm lược kết quả điều khiển phản hồi vị trí của bộ kích hoạt tĩnh điện ECLIA.

Bảng 1. Kích thước của vi chiết áp

$L(\text{mm})$	$W(\text{mm})$	$H(\mu\text{m})$	$l(\mu\text{m})$	$w_e(\mu\text{m})$	$w_s(\mu\text{m})$	$h(\mu\text{m})$
25	5	5	3500	600	500	40



Hình 1. ECLIA: (a) sơ đồ cấu tạo, (b) tiết diện ngang A-A, (c) tín hiệu điện áp điều khiển, và (d) đồ thị mô tả chuyển động của PZT và thanh trượt

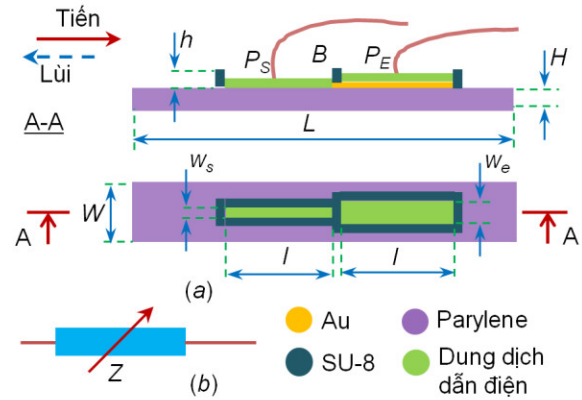
3. Điều khiển phản hồi vị trí của ECLIA

3.1. Cảm biến vị trí

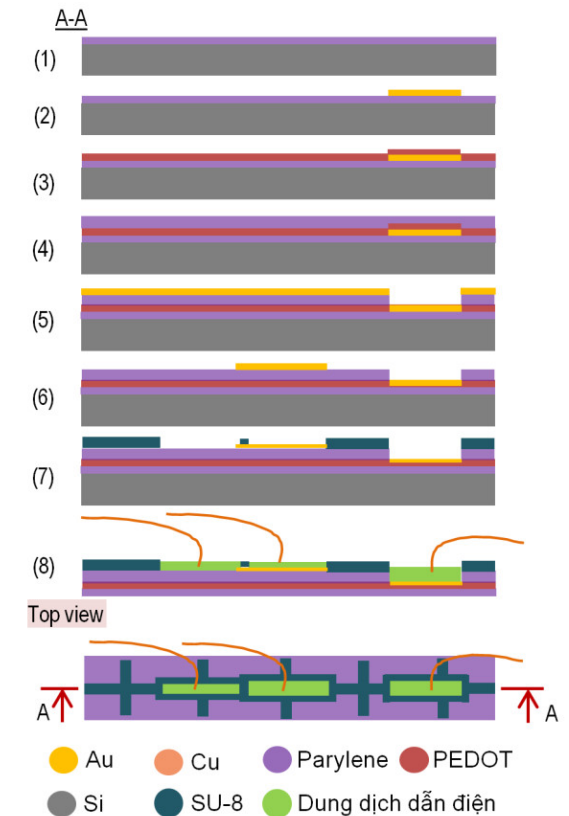
Trong điều khiển phản hồi thì thành phần cảm biến xác định vị trí của thanh trượt là một trong những bộ phận quan trọng nhất. Cảm biến không những có yêu cầu cao về độ phân giải mà còn phải ít gây trở ngại nhất có thể đến chuyển động của thanh trượt. Cảm biến đo khoảng cách laser (Micro-epsilon ILD 2200-2LL) có thể đo được sự chuyển động của đối tượng với độ chính xác lên tới nano mét và không gây cản trở cơ học đến vật thể chuyển động. Tuy nhiên nó yêu cầu phải có bề mặt phản xạ theo hướng di chuyển (mặt đầu của thanh trượt) và không gian lớn để thiết đặt hệ thống. Điều này rất khó trong việc áp dụng vào bộ kích hoạt ECLIA với nhiều thanh trượt có chiều dày nhỏ cỡ vài micro mét. Thêm nữa, trong ứng dụng cho vi bơm, đầu thanh trượt sẽ tác động đẩy pít tông. Vì vậy không thể áp dụng loại cảm biến quang học trong trường hợp này. Chúng tôi phát triển một loại vi chiết áp dùng dung dịch dẫn điện làm điện trở để định vị trí của vật thể chuyển động. Cấu tạo của vi chiết áp gồm hai mũi nhọn kim loại nhúng vào hai “vũng” (μ -pool) dung dịch dẫn điện (1-ethyl-3-methyl, conductivity: 10 mS cm^{-1}) có kết cấu được mô tả như trên Hình 2(a). Vũng thứ nhất được gọi là “cực cảm biến” được liên kết điện với vũng thứ hai có đáy là một lớp mỏng kim loại Au (120 nm) ở vị trí vách ngăn. Như vậy vũng thứ hai đóng vai trò là “cực tiếp điểm”. Sự nhúng của đầu nhọn kim loại vào vũng dung dịch này tạo nên một liên kết “mềm”. Với đặc điểm tiếp điện “mềm” này, vi chiết áp loại trừ được cản trở cơ học của liên kết cứng trong chiết áp cơ truyền thống. Chúng tôi sẽ dùng vi chiết áp này cho việc xác định vị trí của thanh trượt trong bài toán điều khiển phản hồi bộ kích hoạt ECLIA.

Cảm biến vi chiết áp đặt trên thanh trượt (Hình 2(a)); vị trí tương đối của thanh trượt được xác định bởi điện trở của cực cảm biến đo giữa hai đầu nhọn kim loại cố định. Vi chiết áp được mô hình hóa bởi một biến trở như Hình 2(b). Nếu thanh trượt chuyển động tiến hoặc lùi thì điện trở Z đo giữa hai đầu cực kim loại sẽ thay đổi tỷ lệ tương ứng với khoảng dịch chuyển. Do vậy vi chiết áp sẽ xác định được vị trí của thanh trượt với sự cản trở tối thiểu tới chuyển động của nó (chỉ có sự cản trở của dung dịch ở đầu mũi kim). Để cung cấp điện áp điều khiển cho thanh trượt chúng tôi cũng thiết kế một tiếp điểm “mềm” như trên. Hình 3 mô tả quy trình chế tạo thanh trượt được tích hợp cảm biến vi chiết áp. Thanh trượt được chế tạo từ các lớp vật liệu polymer (PEDOT-parylene) với chiều dày vài micro mét kết hợp cấu trúc xương cá để tăng hiệu quả lực hút tĩnh điện cũng như độ cứng dọc trục [12]. Điều này cho phép nâng cao lực đẩy của thanh trượt lên pít tông trong ứng dụng cho cơ cấu vi bơm của nghiên cứu này. Thanh trượt được

chế tạo với các kích thước thể hiện ở Bảng 1. Độ nhạy của cảm biến là $62 \Omega \mu\text{m}^{-1}$ tương ứng với $0.77 \text{ mV } \mu\text{m}^{-1}$, và độ phân giải là $6 \mu\text{m}$.

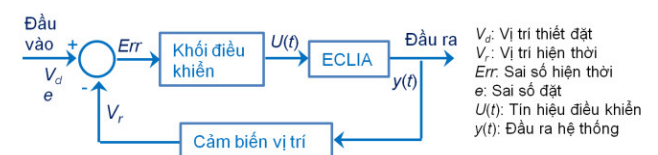


Hình 2. Vi chiết áp với tiếp điểm “mềm”: (a) sơ đồ cấu tạo và (b) mô hình hóa



Hình 3. Quy trình chế tạo thanh trượt tích hợp cảm biến vi chiết áp

3.2. Đáp ứng của hệ thống



Hình 4. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển phản hồi

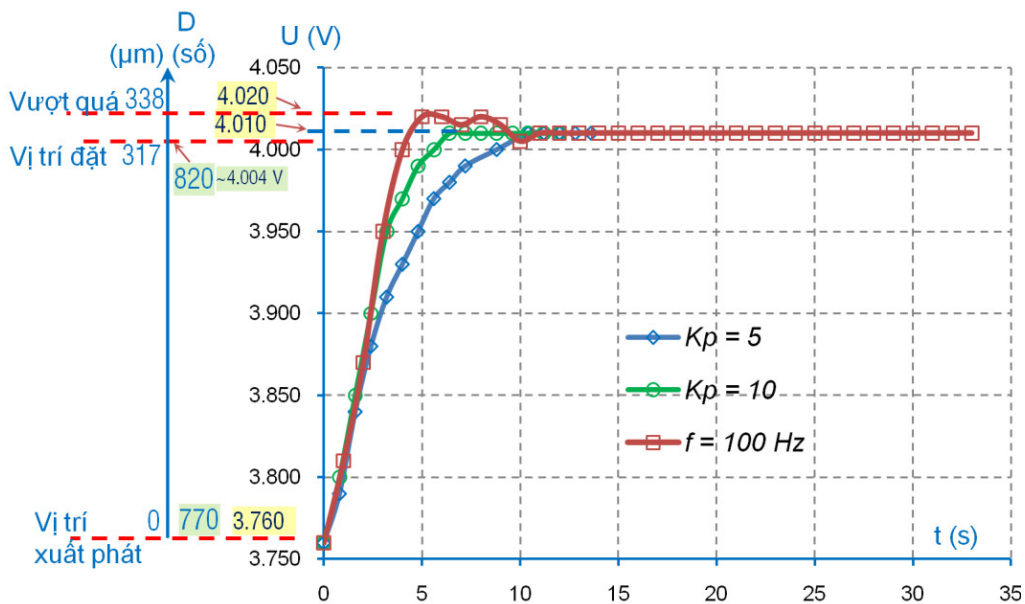
Các thanh trượt của bộ kích hoạt tĩnh tiến ECLIA được truyền động nhờ cơ cấu kẹp tĩnh điện. Cơ cấu này phụ thuộc vào lực hút tĩnh điện và ma sát của bề mặt tiếp xúc giữa thanh trượt và điện cực dẫn động/giữ. Nó có thể gây ra sự trượt tương đối của thanh trượt trong quá trình truyền động và kẹp giữ. Điều này dẫn đến độ dài các bước dịch chuyển của thanh trượt không đều nhau. Do vậy không thể dùng việc đếm các bước để tính chuyển vị được. Trong nghiên cứu này chúng tôi sẽ áp dụng điều khiển phản hồi vị trí nhằm dẫn động thanh trượt đến vị trí chính xác, ứng dụng đầy đủ lượng dung dịch mong muốn của vi bơm xi lanh.

Hình 4 mô tả sơ đồ khối của hệ thống điều khiển phản hồi. Trong cấu hình này, khối điều khiển tính toán và xuất tín hiệu điều khiển cho ECLIA. Cảm biến vị trí xác định vị trí thực của thanh trượt V_r . Sai số Err là sai khác giữa giá trị thực V_r và giá trị thiết đặt V_d . Giá trị sai số này được dùng để tính toán và xuất tín hiệu điều khiển đầu vào $U(t)$ cho hệ thống nhằm đạt tới vị trí mong muốn của thanh trượt. Phương thức điều khiển ở đây là dùng tín hiệu phản hồi để tính toán điện áp với tần số thay đổi. Nếu sai số lớn thì tần số điều khiển cao, thanh trượt chuyển động nhanh tiến về vị trí thiết đặt. Khi sai số giảm, tần số điện áp được phát ra cũng giảm dần, điều này làm cho thanh trượt tiếp cận vị trí thiết đặt một cách ổn định và chính xác. Với cách thức điều khiển này bộ kích hoạt sẽ giảm được thời gian điều khiển cũng như sự dao động và vượt quá vị trí xác lập của thanh trượt. Tham số điều khiển phụ thuộc vào bước di chuyển của thanh trượt vì sự trượt của cơ cấu kẹp tĩnh điện. Bước chuyển động càng lớn thì càng giảm

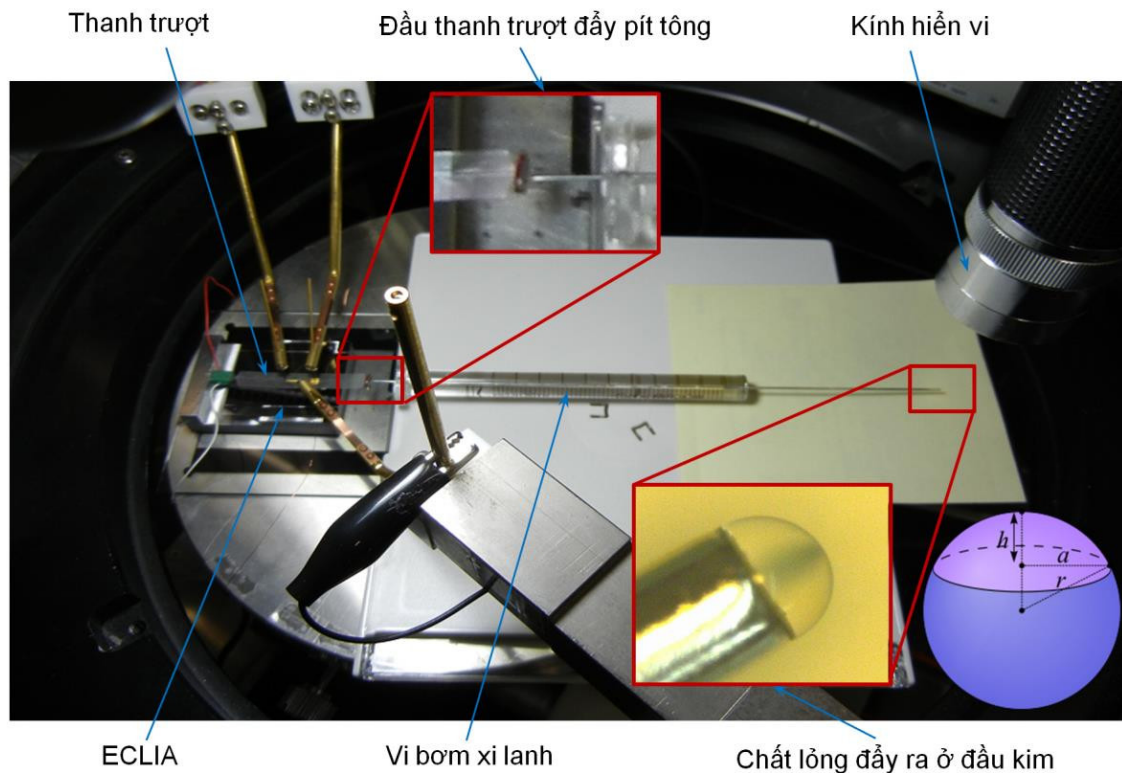
thời gian điều khiển và cho phép chọn tham số điều khiển nhỏ. Bài toán điều khiển phản hồi này đã được trình bày trong nghiên cứu trước đây của chúng tôi [13]. Để thấy được sự ảnh hưởng tích cực của tham số điều khiển K_P chúng tôi so sánh với điều khiển dùng tần số không đổi $f = 100$ Hz. Khi tần số không đổi thì vận tốc của thanh trượt cũng không thay đổi khi tiếp cận tới vị trí mong muốn. Mặt khác với tần số cao thì dẫn đến sự dao động và khó dừng chính xác tại vị trí thiết đặt của thanh trượt. Hình 5 so sánh đáp ứng của điều khiển phản hồi với tần số điện áp không đổi ở 100 Hz và có dùng các tham số điều khiển khác nhau, $K_P = 5$ và 10. Kết quả cho thấy có hiện tượng dao động và vượt quá điểm thiết đặt của thanh trượt khi tần số điện áp không đổi (100 Hz). Hiện tượng này không còn nữa với điều khiển có tham số K_P . Điều này phù hợp với những phân tích và nhận định đã đề cập ở trên. Với kết quả này chúng tôi hướng đến ứng dụng của bộ kích hoạt tĩnh tiến dùng điều khiển phản hồi có tham số K_P cho vi bơm xi lanh trong phần tiếp theo.

4. Thiết lập thí nghiệm và đánh giá kết quả

Với đặc điểm của bộ kích hoạt tĩnh tiến như đã trình bày ở các phần trên. Chuyển động tĩnh tiến của thanh trượt theo từng bước nhỏ nm, hành trình lớn mm cùng với lực đẩy cỡ mN. Vì vậy trong nghiên cứu này chúng tôi ứng dụng bộ kích hoạt tĩnh tiến với điều khiển phản hồi vị trí để đẩy pít tông cho vi bơm kiểu xi lanh. Với chuyển động từng bước nhỏ cỡ nm của pít tông cho phép đẩy lượng dung dịch cỡ pL. Điều này rất hữu ích trong các ứng dụng y tế hoặc các phản ứng hóa học.



Hình 5. Đáp ứng phản hồi của hệ thống với các tham số K_P và tại tần số không đổi $f = 100$ Hz



Hình 6. Sơ đồ thiết lập thí nghiệm

Thanh trượt của bộ kích hoạt có thể đẩy với lực vài mN. Do vậy chúng tôi lựa chọn loại vi bơm Hamilton 10 μL với cải tiến phần pít tông nhằm thỏa mãn lực đẩy yêu cầu của nó nhỏ hơn lực đẩy của thanh trượt. Loại pít tông nguyên bản có hình dạng trụ tròn nên toàn bộ bề mặt trụ ngoài của nó tiếp xúc với mặt trụ trong của xi lanh. Điều này gây nên sự ma sát tiếp xúc và yêu cầu lực đẩy pít tông lớn (25 mN). Chúng tôi thay thế bằng loại pít tông có đường kính nhỏ hơn với một cái mũ silicon ở đầu. Bằng sự cải tiến này phần tiếp xúc ma sát giữa pít tông và xi lanh giảm đi đáng kể và lực đẩy giảm đi còn 1,5 mN. Điều này cho phép thanh trượt có thể dễ dàng đẩy được pít tông.

Hình 6 mô tả sự thiết lập thí nghiệm, một đầu thanh trượt của bộ kích hoạt tiếp xúc với đầu pít tông của vi bơm, camera đặt phía trên đầu xi lanh để quan sát dung dịch sẽ được đẩy ra. Vì lượng dung dịch được đẩy ra rất nhỏ nên nó chưa đủ để tạo thành giọt mà chỉ mới hình thành nên dạng mũ cầu ở đầu ra của xi lanh. Phần thể tích của mũ cầu này được tính theo công thức:

$$V = \frac{\pi h^2}{3}(3r - h) \quad (1)$$

$$r = \frac{a^2 + h^2}{2h} \quad (2)$$

Trong đó,

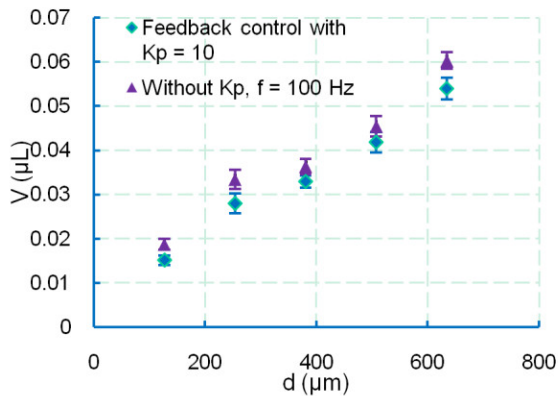
r: bán kính của khối cầu

h: chiều cao của mũ cầu

a: bán kính của vòng tròn chân mũ cầu.

Như vậy bằng việc đo kích thước a và h của chòm cầu ta tính được lượng dung dịch mà bơm đẩy ra. Trong nghiên cứu này chúng tôi dùng chất lỏng là H_2O . Quy trình thí nghiệm được thực hiện như sau:

- 1- Thiết đặt khoảng chuyển động của thanh trượt trong chương trình điều khiển. (đặt vị trí xuất phát Vr và đích đến Vd)
- 2- Đặt vi bơm vào vị trí để đầu thanh trượt tiếp xúc với đầu pít tông.
- 3- Dùng hi-scope camera chụp hình mũ cầu chất lỏng ở đầu xi lanh tại vị trí ban đầu này.
- 4- Kích hoạt chương trình điều khiển để thanh trượt đẩy pít tông đến vị trí đã thiết đặt.
- 5- Lặp lại bước 3: chụp hình mũ cầu chất lỏng sau khi pít tông đẩy ra tại vị trí cuối này.
- 6- Kích thước của phần mũ cầu được đo đạc và tính ra thể tích chất lỏng ở thời điểm ban đầu (V1) và cuối (V2) theo công thức (1). Dung tích chất lỏng được đẩy ra chính là hiệu của V2 - V1.



Hình 7. Đồ thị quan hệ giữa thể tích chất lỏng đẩy ra theo khoảng dài của thanh trượt

Chúng tôi thực hiện thí nghiệm đo thể tích chất lỏng nhiều lần với cùng một khoảng chuyển động định trước cũng như tại nhiều giá trị khác nhau của thanh trượt/pít tông. Hình 7 là đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa khoảng dịch chuyển của thanh trượt d và thể tích chất lỏng V được đẩy ra của vi bơm. Kết quả cho thấy sự tỷ lệ tuyến tính giữa V và d khi áp dụng điều khiển phản hồi vị trí. Với điều khiển phản hồi có tham số K_p thì độ tuyến tính cao hơn so với khi không dùng tham số điều khiển. Điều này là do sự không ổn định và vượt quá điểm thiết đặt của thanh trượt khi điều khiển với tần số không đổi đã đề cập ở phần 3. Đường quan hệ V - d có thể được xem như đường đặc tính của vi bơm cho phép ta xác định được chính xác lượng chất lỏng cần bơm theo khoảng chuyển động định trước của thanh trượt. Tuy nhiên giá trị thực nghiệm này nhỏ hơn khá nhiều so với giá trị tính toán lý thuyết. Điều này có thể được giải thích là do sự không kín khít giữa pít tông và xi lanh gây nên sự dò chất lỏng qua khe hở này.

5. Kết luận

Bằng việc áp dụng phản hồi vị trí cho bộ kích hoạt tịnh tiến chúng tôi đã thành công trong ứng dụng điều khiển vi bơm kiểu xi lanh. Kết quả cũng cho thấy hiệu quả của tham số điều khiển K_p trong điều khiển phản hồi. Sự tỷ lệ tuyến tính giữa V và d cho phép định lượng được chính xác thể tích chất lỏng cần bơm với sai số cỡ pL. Điều này rất hữu ích trong các ứng dụng về y tế và nâng cao hiệu suất của các phản ứng hóa học. Trong các nghiên cứu tiếp theo chúng tôi sẽ nâng cao sự kín khít giữa pít tông và xi lanh để giảm dò chất lỏng và hướng tới việc tích hợp vào trong các lĩnh vực cụ thể như đã đề cập.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2015.18.

Tài liệu tham khảo

- [1]. M. A. Unger et al (2000), Monolithic Microfabricated Valves and Pumps by Multilayer Soft Lithography, Science, Vol. 288, pp. 113–116.
- [2]. J. W. Munyan et al (2003), Electrically Actuated, Pressure-driven Microfluidic Pumps, Lab Chip, Vol. 3, pp. 217–220.
- [3]. L. J. Jin et al (2003), A Microchip-based Proteolytic Digestion System Driven by Electroosmotic Pumping, Lab Chip, Vol. 3, pp. 11–18.
- [4]. A. Brask et al (2006), AC Electroosmotic Pump With Bubble-free Palladium Electrodes and Rectifying Polymer Membrane Valves, Lab Chip, Vol. 6, pp. 280–288.
- [5]. M. Koch et al (1996), A Novel Micropump Design With Thick-film Piezoelectric Actuation, Meas. Sci. Technol., Vol. 8, pp. 49–57.
- [6]. S. Kar et al (1998), Piezoelectric mechanical pump with nanoliter per minute pulse-free flow delivery for pressure pumping in micro-channels, Analyst, Vol. 123, pp. 1435–1441.
- [7]. J. Atencia and D. J. Beebe (2004), Magnetically-driven biomimetic micro pumping using vortices, Lab Chip, Vol. 4, pp. 598–602.
- [8]. A. Hatch, et al (2001), A Ferrofluidic Magnetic Micropump, J. Microelectromech. Syst., Vol. 10, pp. 215–221.
- [9]. Konishi S, Ohno K and Munechika M (2002), Parallel linear actuator system with high accuracy and large stroke. Sens. Actuators Phys. 97–98:610–9.
- [10]. Konishi S et al (2005), Batch-fabricated high dense multi sliders for WDM spectral attenuation, Proc. of TRANSDUCERS'05 Conference (Seoul, Korea, 5-9 June 2005) Vol. 2 pp. 1242–5.
- [11]. Yokokawa R et al (2006), On-chip syringe pumps for picoliter-scale liquid manipulation, Lab Chip, Vol. 6, pp. 1062–6.
- [12]. T A Nguyen and S Konishi (2014), Characterization of sliders for efficient force generation of electrostatically controlled linear actuator, J. Micromechanics Microengineering, Vol. 24, No. 5.
- [13]. T A Nguyen and S Konishi (2014), Position feedback control for electrostatically controlled linear actuator, Microsystem Technologies, Vol, 22, Issue 1, pp. 171-179.