

NGHIÊN CỨU BỘ ĐIỀU KHIỂN PID KẾT HỢP VỚI THUẬT TOÁN NSGA-III CHO CƠ CẤU CHUYỂN ĐỘNG THẲNG CHÍNH XÁC

DESIGN OF A PID CONTROLLER COMBINED WITH NSGA-III ALGORITHM FOR A HIGH PRECISION LINEAR MECHANISM

Nguyễn Văn Khiển^{1,2}, Hồ Minh Chính³, Phạm Huy Tuân¹, Phạm Sơn Minh¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

²Trường Cao đẳng Bách Khoa Nam Sài Gòn

³Trường Cao đẳng Cao Thắng

TÓM TẮT

Cơ cấu bàn dao máy tiện gồm cơ cấu đàn hồi và cơ cấu chấp hành áp điện Piezo (PZT) chuyển vị cỡ micron là một giải pháp nâng cao độ chính xác trong gia công chi tiết cơ khí để thay thế nguyên công mài. Mô hình này đã được nhóm tác giả nghiên cứu chế tạo phần cơ khí. Bước tiếp theo để hoàn thiện cơ cấu bàn dao là điều khiển được cơ cấu chuyển vị theo vị trí mong muốn. Ziegler-Nichols là phương pháp thường được sử dụng để chỉnh định bộ điều khiển PID. Tuy nhiên, bộ điều khiển này không thể điều khiển chuyển vị mô hình bàn dao đạt được yêu cầu sai số cỡ micron. Bài báo này tập trung trình bày phương pháp thiết kế bộ PID vòng kín được tối ưu hóa bằng thuật toán di truyền NSGA-III. Thuật toán di truyền được hỗ trợ bởi phần mềm MATLAB nhằm tìm ra các thông số của bộ điều khiển PID. Kết quả được kiểm chứng bằng mô phỏng và thực nghiệm trên mô hình. Với bộ điều khiển tối ưu này, chuyển vị bàn dao đạt yêu cầu chính xác cỡ micron.

Từ khóa: Cơ cấu đàn hồi; Thuật toán di truyền; PID; Cơ cấu chấp hành piezo; Cơ cấu ăn dao.

ABSTRACT

A precision tool holder of a lathe machine consists of a compliant mechanism and a piezoelectric actuator. This suggestion aims to improve machining accuracy and can replace the final grinding process. The mechanical model has been designed and optimized by our group. The next step is to choose appropriate controllers to control the displacement to the desired position. Ziegler-Nichols is a popularly used method for tuning PID controllers. However, it cannot maintain the motion of the cutting tool holder to achieve the required error in micron resolution. This paper studies the PID and genetic algorithm optimization to find the PID parameters. They are turned by implementing the NSGA-III algorithm on the MATLAB. The fabricated model is verified by simulation and experiment. The results show that the cutting tool displacement is validated in micron resolution.

Keywords: Compliant mechanism; Genetic algorithm; PID; Piezoelectric actuators; Linear guide mechanism. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cơ cấu đàn hồi (CCĐH) ứng dụng dùng để truyền hoặc biến đổi chuyển động thông qua quá trình biến dạng đàn hồi của bản thân cơ cấu [1]. Đặc tính này khác biệt hoàn toàn so với nhóm cơ cấu khâu cứng truyền thống khi phải thông qua các bộ truyền và các khớp động. Do không tồn tại khe hở giữa các phần khác nhau của cơ cấu và thường được chế tạo nguyên khối, CCĐH có ưu điểm là có độ chính xác cao, đơn giản và dễ gia công, chế tạo. Ngày nay, CCĐH đã và đang được nghiên cứu ứng dụng rộng rãi, đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực khác nhau của kỹ thuật chính xác (precision engineering), bao gồm: các cơ cấu định vị chính xác trong gia công cơ khí [2] hoặc các loại kính hiển vi lực nguyên tử [3], cơ cấu kẹp vật và cơ cấu gấp vật siêu nhỏ [4], cơ cấu tạo và điều chỉnh lực [5], van servo để kiểm soát chất lỏng [6].

CCĐH đang là một giải pháp nâng cao độ chính xác trong gia công cơ khí để có thể thay thế các nguyên công hoàn thiện sau cùng như mài [7]. Nhóm tác giả Nguyễn Văn Khiển [8] và các cộng sự đã nghiên cứu và thiết kế một mô hình cơ cấu ăn dao dùng cơ cấu đàn hồi cho máy tiện với chuyển động cỡ micron để gia công chi tiết. Cơ cấu này dùng thiết bị chấp hành piezoelectric (PZT) để cung cấp chuyển vị siêu chính xác cho đầu vào. Tuy nhiên, chuyển vị của PZT mang đặc tính trễ theo thời gian và phi tuyến làm cho chuyển vị bàn dao cũng mang đặc tính này [9]. Bài báo này đề xuất sử dụng thuật toán PID để thiết kế bộ điều khiển cho cơ cấu ăn dao chính xác đã được chế tạo. Bộ điều khiển PID, sự kết hợp bộ tỉ lệ (P), tích phân (I) và vi phân (D), là một trong những bộ điều khiển được triển khai rộng rãi trong công nghiệp bởi tính đơn giản trong thiết kế, khả năng điều khiển hiệu quả và phạm vi ứng dụng

rộng [10, 11]. Những ứng dụng gần đây của bộ điều khiển PID: điều khiển cơ cấu định vị chính xác một bậc tự do [12], hai bậc tự do [13], ba bậc tự do [14], điều khiển chuyển sâu cắt cho cơ cấu dao tiện ứng dụng cho tiện cứng [15], điều khiển Flycam ứng dụng cho vận chuyển [16].

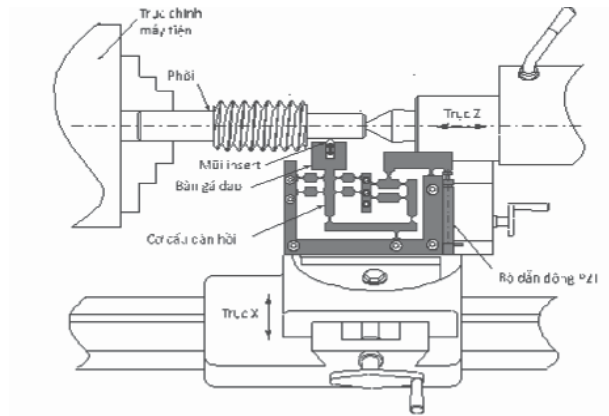
Có một số phương pháp thiết kế bộ điều khiển khác nhau phụ thuộc vào các yêu cầu thiết kế sao cho phù hợp với những ứng dụng cụ thể, trong đó bộ điều khiển PID có thể là một chọn lựa cho bộ điều khiển cơ cấu ăn dao tiện vì chi phí thiết kế, tính toán và thí nghiệm thấp. Có rất nhiều phương pháp tìm bộ thông số PID, phổ biến nhất là Ziegler Nichols (Z-N) dựa trên kết quả đo được từ đáp ứng hệ thống. Tuy nhiên, bộ điều khiển này khó đạt được kết quả điều khiển tốt, chưa đưa vào sử dụng ngay được mà cần phải trải qua quá trình tinh chỉnh bằng cách thử và sai, cách làm này tốn nhiều thời gian và công sức mà lại khó đạt được kết quả tối ưu. Có nhiều thuật toán dựa trên di truyền đã được phát triển để ứng dụng tìm nghiệm tối ưu cho bộ điều khiển như bao gồm thuật toán PSO [17], thuật toán GA [18], thuật toán DE [19], thuật toán dựa trên quá trình dạy và học TLBO [20], thuật toán con bướm đêm [21].

Jan và Deb, đã mở rộng NSGA-II [18] nổi tiếng để giải quyết vấn đề tối ưu hóa nhiều mục tiêu, sử dụng phương pháp tiếp cận điểm tham chiếu, với cơ chế sắp xếp không bị chi phối. Thuật toán mới được phát triển gọi là NSGA-III. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một cách tiếp cận dựa trên tìm kiếm nhiều mục tiêu mới bằng cách sử dụng thuật toán NSGA-III [22]. Giải thuật NSGA-III có khả năng tìm nghiệm toàn cục với bài toán tối ưu, vì vậy việc sử dụng NSGA-III trong nghiên cứu này nhằm tìm giá trị tối ưu toàn cục cho bộ điều khiển PID. Nghiên cứu này tập trung trình bày

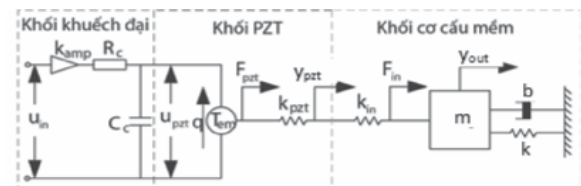
phương pháp thiết kế bộ PID vòng kín được tối ưu hóa bằng thuật toán di truyền NSGA-III. Thuật toán di truyền được hỗ trợ bởi phần mềm MATLAB nhằm tìm ra các thông số K_p , K_i , và K_d cho bộ điều khiển PID. Kết quả được kiểm chứng bằng mô phỏng và thực nghiệm trên mô hình. Với bộ điều khiển tối ưu này, chuyển vị bàn dao đạt yêu cầu chính xác cỡ micron. Trong các nghiên cứu ở trên thường sử dụng các thiết bị, các Board điều khiển và thu thập dữ liệu có giá thành rất cao. Nghiên cứu ứng dụng trong công nghiệp luôn tìm kiếm bộ điều khiển có giá thành rẻ, dễ ứng dụng và đáp ứng được độ chính xác luôn được ưu tiên tìm kiếm. Nghiên cứu này giới thiệu việc sử dụng Board điều khiển và thu thập dữ liệu STM32F407 với giá thành rẻ kết hợp với bộ điều khiển PID và NSGA-III là giải pháp tiết kiệm và hữu ích để điều khiển chính xác cơ cấu ăn dao cho máy tiện. Nội dung của nghiên cứu sẽ được trình bày thành ba phần chính bao gồm: (1) Mô tả vấn đề về phương pháp nghiên cứu, cách mô hình hóa bài toán; (2) Phương pháp thiết kế bộ điều khiển PID và tối ưu hóa bằng thuật toán NSGA-III; cuối cùng là phần (3) Thực nghiệm điều khiển, kết luận về các kết quả đã đạt được.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN

Nguyễn Văn Khiển [8] và các cộng sự đã thiết kế một cơ cấu ăn dao chính xác dùng CCDH như ở hình 1. Cơ cấu này được dẫn động bằng bộ chấp hành piezoelectric (PZT) với mục tiêu điều khiển chính xác mũi dao tiện khi gia công tinh/siêu tinh các vật liệu cơ khí. Để đảm bảo khả năng điều khiển chính xác vị trí cấp micromet khi tích hợp chung với các bộ dẫn động cơ khí hiện thời của các máy CNC, mô hình này được triển khai thử nghiệm trong điều kiện lý tưởng của phòng thí nghiệm với các yếu tố rung động và nhiễu từ môi trường xung quanh được hạn chế đến mức tối thiểu.



Hình 1. Mô hình cơ cấu ăn dao chính xác dẫn động bằng PZT [8]



Hình 2. Mô hình điều khiển cơ điện mô hình bàn dao

Mô hình điều khiển cơ cấu ăn dao như ở hình 1 với ngõ ra là chuyển vị bàn dao y_{out} và ngõ vào là điện áp cấp vào u_{in} (0-10 V) được mô hình hóa như ở hình 2 [23, 24] với 03 khối điều khiển chính:

❖ Khối khuếch đại

Áp dụng định lý Kirchhoff 2 cho khối khuếch đại, ta có phương trình sau:

$$R_c C_c \frac{du_{pzt}}{dt} + u_{pzt} = u_{in} \quad (1)$$

Trong đó: R_c , C_c , u_{in} , u_{pzt} lần lượt là điện trở, điện dung, điện áp đầu vào và điện áp đầu ra của bộ khuếch đại.

❖ Khối cơ cấu chấp hành áp điện PZT

Theo thông số chế tạo PZT từ nhà sản xuất, ta có:



$$y_0 = nd_{33}u_{pzt} \quad (2)$$

$$y_{pzt} = \frac{k_{pzt}}{k_{pzt} + k_{in}} y_0 \quad (3)$$

Trong đó: y_0 , n , d_{33} , y_{pzt} , k_{pzt} lần lượt là chuyển vị không tải, số lớp PZT, đặc tính vật liệu, chuyển vị khi có tải và độ cứng của PZT; k_{in} là độ cứng đầu vào của cơ cấu.

Kết hợp phương trình (2) và (3), sau đó biến đổi Laplace, ta có hàm truyền của PZT:

$$G_{pzt}(s) = \frac{y_{pzt}}{u_{in}(s)} = \frac{nd_{33}k_{pzt}/(k_{pzt} + k_{in})}{R_c C_c s + 1} \quad (4)$$

❖ Khối cơ cấu mềm

Theo tài liệu [8], phương trình vi phân của khối cơ cấu mềm:

$$m\ddot{y}_{out} + b\dot{y}_{out} + ky_{out} = F_{in} \quad (5)$$

$$F_{in} = k_{in}y_{pzt} \quad (6)$$

Trong đó: m , b , k và y_{out} lần lượt là khối lượng, hệ số giảm chấn, độ cứng và chuyển vị đầu ra của cơ cấu đàn hồi.

Biến đổi Laplace của phương trình (5), (6), ta có hàm truyền của cơ cấu đàn hồi như sau:

$$G_{stage}(s) = \frac{y_{out}(s)}{y_{pzt}(s)} = \frac{k_{in}}{ms^2 + bs + k} \quad (7)$$

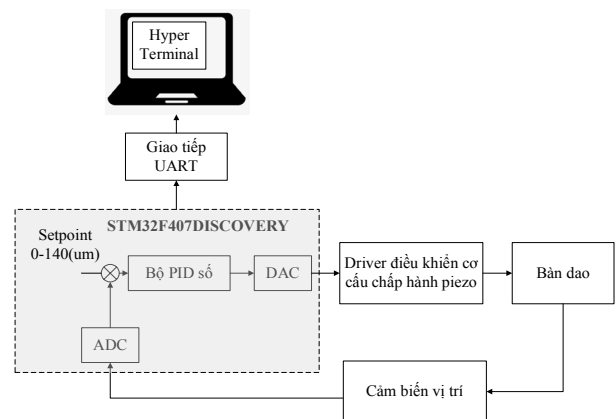
Kết hợp phương trình (4)-(7), ta có hàm truyền của hệ thống như sau:

$$G_s(s) = G_{pzt}(s) \cdot G_{stage}(s) = \frac{y_{out}(s)}{u_{in}(s)} = \frac{nd_{33}k_{amp}k_{pzt}k_{in}/(k_{pzt} + k_{in})}{(R_c C_c s + 1)(ms^2 + bs + k)} \quad (8)$$

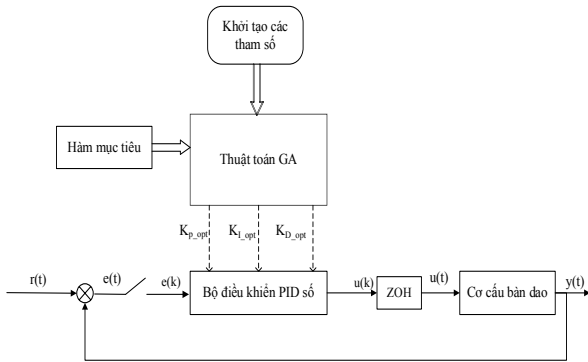
Bảng 1. Giá trị của các thông số:

Thông số	Giá trị	Đơn vị
n	10	
d_{33}	500	
k_{amp}	7.5	
k_{pzt}	60	N/μm
k_{in}	31.1	N/μm
R_c	50	Ω
C_c	18	μF
m	0.8	kg
b	0.0996	
k	10.35	N/μm

Trong mô hình toán này khâu trễ phi tuyến của cơ cấu chấp hành PZT không được đưa vào, để khắc phục vấn đề này, thuật toán PID vòng kín sẽ được sử dụng để khắc phục sai số do khâu trễ phi tuyến gây ra.



Hình 3. Sơ đồ khối mô hình điều khiển vòng kín dùng thuật toán PID.



Hình 4. Lưu đồ điều khiển cơ cấu ăn dao dùng PID tạo ra từ giải thuật NSGA-III.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VÀ TỐI ƯU HÓA BẰNG THUẬT TOÁN NSGA-III

Thiết kế và điều khiển hệ thống bằng bộ điều khiển PID được mô tả như sau [12, 25, 26]:

$$x_{pzt}^p = K_p \left[\delta x_{out}(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \delta x_{out}(\tau) d(\tau) + T_d \frac{\delta x_{out}(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

x_{pzt}^p là khi có tải, dịch chuyển đầu ra của PZT với bộ điều khiển PID.

Trong hệ điều khiển vòng kín hình 4 của cơ cấu dao tiện, gọi $e(t)$ là sai số giữa tín hiệu mong muốn $r(t)$ và tín hiệu đáp ứng $y(t)$ của hệ thống, thì:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (10)$$

Các hàm mục tiêu của quá trình tinh chỉnh bộ điều khiển, trong bài toán này, được định nghĩa như sau:

Tiêu chuẩn IAE (Integral of the Absolute Magnitude of the Error – Tích phân trị tuyệt đối biên độ sai số):

$$\min \left\{ J_1 = \int_0^\infty |e(t)| dt \right\} \quad (11)$$

Theo tiêu chuẩn ITAE (Integral of Time multiplied by the Absolute Value of the Error):

$$\min \left\{ J_2 = \int_0^\infty t |e(t)| dt \right\} \quad (12)$$

Tiêu chuẩn ISE (Integral of the Square of the Error – Tích phân của bình phương sai số):

$$\min \left\{ J_3 = \int_0^\infty e^2(t) dt \right\} \quad (13)$$

Nhiệm vụ của giải thuật NSGA-III được áp dụng là tìm kiếm các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ tối ưu của bộ điều khiển PID, mà ở đó các hàm J_i ($i=1,3$) đạt giá trị cực tiểu. Nói cách khác, hàm mục tiêu của giải thuật NSGA-III là:

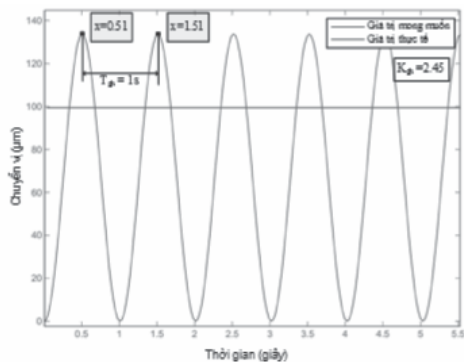
$$\min \{ J_{(i=1,2,3)} \} \quad (14)$$

Cách thức tìm bộ PID tối ưu hóa bằng giải thuật NSGA-III được đề xuất như sau (Hình 4):

Bước 1: Dùng thuật toán Ziegler Nichol 2 tìm thông số K_{p_ZN2} , K_{i_ZN2} , K_{d_ZN2} dựa trên hàm truyền (9) từ mô hình hóa hệ thống; bộ thông số này là thể hệ đầu tiên của thuật toán NSGA-III.

Theo phương pháp Ziegler Nichol 2, tăng dần giá trị K_p và quan sát đáp ứng của hệ; đến khi đáp ứng của hệ đạt dao động như hình 5; khi đó $K_{gh} = 2.45$, chu kỳ dao động của hệ là $T_{gh} = 1$ (s).





Hình 5. Đáp ứng chuyển vị với bộ điều khiển $K_p = K_{gh} = 2.45$

Theo công thức tính bộ điều khiển PID theo Ziegler Nichol 2, ta có:

$$K_{p_ZN2} = 0.6K_{gh} = 1.47 \quad (10)$$

$$T_i = 0.5T_{gh} = 0.5 \quad (11)$$

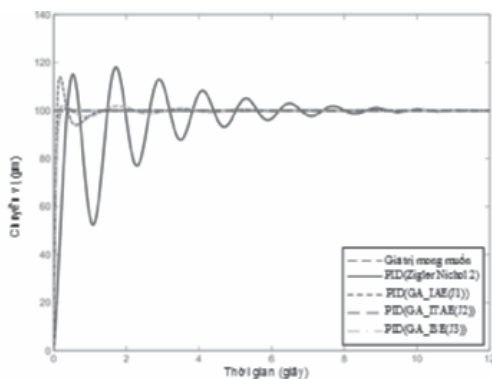
$$K_{i_ZN2} = K_{p_ZN2}T_i = 2.94 \quad (12)$$

$$T_d = 0.125T_{gh} = 0.125 \quad (13)$$

$$K_{d_ZN2} = T_d K_{p_ZN2} = 0.18375 \quad (14)$$

Bước 2: Chạy thuật toán NSGA-III trên Matlab để tìm ra bộ thông số K_{p_opt} , K_{i_opt} , K_{d_opt} tối ưu.

Với yêu cầu điều khiển chuyển vị cơ cấu bàn dao chính xác đến cỡ micron, đề tài đề xuất tìm bộ PID với hàm mục tiêu theo ba tiêu chuẩn: IAE, IAE, ISE [27].



Hình 6. Đáp ứng hàm nấc áp dụng các bộ PID lên mô hình toán.

Bảng 2. Kết quả bộ điều khiển PID sau khi chạy chương trình tìm giá trị tối ưu bằng thuật toán NSGA-III.

PID	Ziegler Nichol 2	GA_IAE (J1)	GA_ITAE (J2)	GA_ISE (J3)
K_p	1.47	0.4976	9.5540	1.4586
K_i	2.94	23.6455	27.6672	23.3189
K_d	0.18375	1.8018	1.83007	1.7973

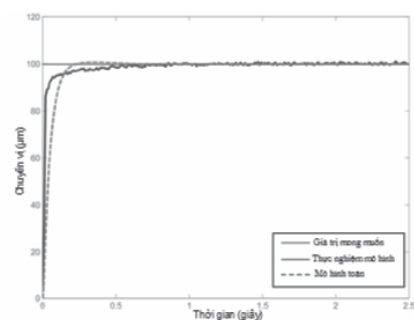
Lấy bộ thông số K_p , K_i , K_d tương ứng với ba tiêu chuẩn và chạy thử trên Matlab với hàm truyền (8).

Bảng 3. Bảng so sánh chỉ tiêu chất lượng của các bộ điều khiển

PID	PID _{Ziegler Nichol 2}	PID _{GA_IAE(J1)}	PID _{GA_ITAE(J2)}	PID _{GA_ISE(J3)}
Độ vọt lố (%)	20	1	14	2
Thời gian xác lập (s)	7.64	0.351	1.47	3.56
Thời gian tăng (s)	0.346	0.113	0.078	0.104

Dựa vào bảng 3 và yêu cầu điều khiển cần đạt sai số cỡ µm có thể thấy đối với các bộ PID_{GA_IAE} với $[K_{p_opt}, K_{i_opt}, K_{d_opt}] = [0.4976; 23.6455; 1.8018]$ cho kết quả tối ưu nhất.

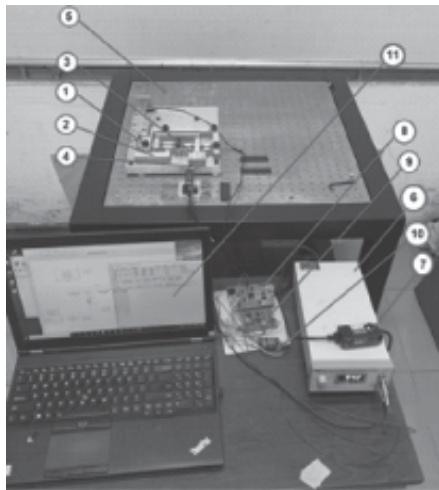
Bước 3: Lấy bộ thông số tối ưu (K_{p_opt} , K_{i_opt} , K_{d_opt}) điều khiển trên mô hình thực tế hình 8.



Hình 7. Đáp ứng chuyển vị mô hình bàn dao với bộ điều khiển PID tối ưu bằng thuật toán NSGA-III

Bộ điều khiển PID được tối ưu hóa bằng NSGA-III cho đáp ứng chuyển vị bàn dao trên mô hình thực nghiệm đạt yêu cầu chuyển vị độ phân giải micromet khi áp dụng lên mô hình thật.

4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐIỀU KHIỂN



Hình 8. Bố trí thí nghiệm khảo sát và điều khiển chuyển vị bàn dao

(1) Cơ cấu chấp hành áp điện Piezo; (2) Cơ cấu dẫn hồi/mềm; (3) Vị trí gá dao; (4) Cảm biến đo chuyển vị GT2-H12K; (5) Bàn thí nghiệm; (6) Driver điều khiển cơ cấu chấp hành áp điện Piezo MDT694A; (7) Bộ chuyển đổi cảm biến chuyển vị GT2-71 MCN; (8) Board điều khiển và thu thập dữ liệu STM32F407; (9) Mạch khuếch đại điện áp ngõ ra điều khiển 0-3 V $\rightarrow$ 0-10 V; (10) Mạch chuyển đổi dòng áp 4-20 mA $\rightarrow$ 0-10 V; (11) Máy tính.

Hình 8 biểu diễn mô hình bố trí thí nghiệm dùng để điều khiển cơ cấu ăn dao chính xác thông qua cơ cấu chấp hành PZT. Toàn bộ hệ thống có thể tách thành 03 nhóm thiết bị: (i) Các cơ cấu cơ khí (1-3,5); (ii) Thiết bị đo lường, cảm biến, điều khiển (4, 6-10); (iii) Thiết bị giám sát, thu thập dữ liệu (11).

Hình 6 thể hiện đáp ứng hàm nấc đơn vị của hệ thống tương ứng với 04 bộ điều khiển PID xác định bởi các thông số bảng 2. Từ kết quả hình 6, ta thấy thuật toán NSGA-III đã cải thiện rất tốt bộ PID so với bộ PID được xác định bằng phương pháp Ziegler Nichol 2, tất cả đều cho sai số xác lập không đáng kể. Bảng 3 thể hiện các tiêu chí đánh giá chất lượng các

bộ điều khiển, có thể thấy đối với các bộ PID tối ưu hóa bằng NSGA-III đều cho thời gian xác lập và thời gian lên được rút ngắn, độ vọt lố được giảm đáng kể. Trong đó, bộ điều khiển PID có tối ưu hóa bằng hàm mục tiêu IAE cho kết quả đáp ứng tốt nhất.

Bộ điều khiển PID ($K_p = 0.4976$; $K_i = 23.6455$; $K_d = 1.8018$) do thuật toán NSGA-III tối ưu được áp dụng lên chương trình điều khiển cơ cấu chấp hành Piezo chạy trên Board STM32F407 Discovery.

Đáp ứng của bộ điều khiển tối ưu bằng NSGA-III trên mô hình thực nghiệm thể hiện hình 7 không có vọt lố, thời gian lên ngắn 0.04 giây, thời gian xác lập nhỏ khoảng 0.54 giây, sai số xác lập không đáng kể.

So sánh đáp ứng của cùng một bộ PID tối ưu áp dụng trên mô hình toán và mô hình thực nghiệm thể hiện hình 7, có thể thấy đáp ứng chuyển vị của đối tượng trên mô hình toán và mô hình thực nghiệm tương đối giống nhau và cho chất lượng điều khiển rất tốt.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mô hình toán của cơ cấu ăn dao. Cơ cấu ăn dao này được điều khiển bằng bộ điều khiển PID kết hợp với NSGA-III. Cơ cấu ăn dao sử dụng kích động PZT tạo chuyển vị có độ chính xác rất cao và sử dụng Board điều khiển và thu thập dữ liệu STM32F407 để điều khiển cơ cấu ăn dao tiện. Kết quả điều khiển cho thấy, bộ điều khiển PID tối ưu hóa bằng NSGA-III đã đạt được yêu cầu điều khiển cơ cấu ăn dao chuyển động với độ phân giải micromet, đáp ứng tốt hơn bộ điều khiển PID tìm được bằng phương pháp Ziegler Nichol về các tiêu chí như độ vọt lố, thời gian xác lập và thời gian tăng; tiết kiệm được thời gian, công sức khi phải hiệu chỉnh bộ điều khiển bằng phương pháp thử sai dựa trên kinh



nghiệm. Các thực nghiệm được tiếp tục đi sâu nghiên cứu để đánh giá độ chính xác của bộ điều khiển cũng như khả năng ứng dụng của bộ điều khiển để điều khiển cơ cấu ăn dao gia công các biên dạng bất kỳ với các vật liệu khác nhau trên máy tiện. Các nghiên cứu này sẽ được báo cáo ở bài viết tiếp theo.

Lời cảm ơn:

Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH cấp Bộ, mã số B2021-SPK-02 được Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ kinh phí và do Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh chủ trì. ❖

Ngày nhận bài: 18/4/2023

Ngày phản biện: 25/5/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Howell, L. L., *Compliant mechanisms*, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [2]. Liang, H., *A large-stroke flexure fast tool servo with new displacement amplifier*. In 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2017. IEEE.
- [3]. Watanabe, S.T. Ando, *High-speed XYZ-nanopositioner for scanning ion conductance microscopy*, Applied Physics Letters, 111 (11) (2017) 113106.
- [4]. Chi, I.-T., T. Chanthasopeephan, D.-A. Wang, *Design of a parallel gripper based on topology synthesis and evolutionary optimization*, Journal of Mechanisms and Robotics, 14 (2) (2022) 021008.
- [5]. Pham, H.-T.D.-A. Wang, *A constant-force bistable mechanism for force regulation and overload protection*, Mechanism and Machine Theory, 46 (7) (2011) 899-909.
- [6]. Han, Y.-M., C. Han, W. H. Kim, H. Y. Seong, S.-B. Choi, *Control performances of a piezoactuator direct drive valve system at high temperatures with thermal insulation*, Smart Materials and Structures, 25 (9) (2016) 097003.
- [7]. Dongmo, J. D., *Control of an experimental piezoelectric actuators System*, Master's Thesis, CST 2010.060, (2010).
- [8]. Nguyen, V.-K., H.-T. Pham, H.-H. Pham, Q.-K. Dang, *Optimization design of a compliant linear guide for high-precision feed drive mechanisms*, Mechanism and Machine Theory, 165 (2021) 104442.
- [9]. Le, T., L. Danh, J. Jeon, *A proposal of a piezo rotary positioning device: design, modeling and experiments*, Smart Materials and Structures, 28 (11) (2019) 115032.
- [10]. Ngón, N. C., *Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền*, Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, (9) (2008) 241-248.
- [11]. Le, M.-T., H. T. Luong, T. T. Pham, C. T. Pham, C. N. Nguyen, *Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền kiểm nghiệm trên mô hình robot delta*, Measurement, Control, and Automation, 3 (2) (2022) 57-65.
- [12]. 최재성, 추이선, 안중환, *A Study on High Speed Control Mechanism of Micro-Depth Using PZT Actuator*, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35 (1) (2018) 103-109.
- [13]. Wang, W.-C., J.-W. Lee, K.-S. Chen, Y.-H. Liu, *Design and vibration control of a notch-based compliant stage for display panel inspection applications*, Journal of Sound and Vibration, 333 (10) (2014) 2701-2718.
- [14]. Al-Jodah, A., B. Shirinzadeh, M. Ghafarian, T. K. Das, J. Pinski, *Design, modeling, and control of a large range 3-DOF micropositioning stage*, Mechanism and Machine Theory, 156 (2021) 104159.
- [15]. Muqet, A., A. Israr, M. H. Zafar, M. Mansoor, N. Akhtar, *A novel optimization algorithm based PID controller design for real-time optimization of cutting depth and surface roughness in finish hard turning processes*, Results in Engineering, (2023) 101142.
- [16]. Hua, H., Y. Fang, X. Zhang, C. Qian, *Auto-tuning nonlinear PID-type controller for rotorcraft-based aggressive transportation*, Mechanical Systems and Signal Processing, 145 (2020) 106858.
- [17]. Li, Y.Q. Xu, *Design and optimization of an XYZ parallel micromanipulator with flexure hinges*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 55 (4-5) (2009) 377.
- [18]. Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, IEEE transactions on evolutionary computation, 6 (2) (2002) 182-197.
- [19]. Kaur, M.D. Singh, *Multi-modality medical image fusion technique using multi-objective differential evolution based deep neural networks*, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12 (2021) 2483-2493.
- [20]. Rao, R. V., V. J. Savsani, D. Vakharia, *Teaching-learning-based optimization: an optimization method for continuous non-linear large scale problems*, Information sciences, 183 (1) (2012) 1-15.
- [21]. Mirjalili, S., *Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm*, Knowledge-based systems, 89 (2015) 228-249.
- [22]. Deb, K.H. Jain, *An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints*, IEEE transactions on evolutionary computation, 18 (4) (2013) 577-601.
- [23]. Zhu, Z.X. Zhou, *A novel fractional order model for the dynamic hysteresis of piezoelectrically actuated fast tool servo*, Materials, 5 (12) (2012) 2465-2485.
- [24]. Ling, J., Z. Feng, X. Kang, X. Xiao, *Bandwidth enhancement in damping control for piezoelectric nanopositioning stages with load uncertainty: Design and implementation*, Journal of Vibration and Control, 27 (11-12) (2021) 1382-1394.
- [25]. Xu, Q., *Design, testing and precision control of a novel long-stroke flexure micropositioning system*, Mechanism and machine Theory, 70 (2013) 209-224.
- [26]. Yang, X., L. Zhu, S. Li, W. Zhu, C. Ji, *Development of a novel pile-up structure based nanopositioning mechanism driven by piezoelectric actuator*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 25 (2) (2020) 502-512.
- [27]. Hà, N. T. P.H. T. Hoàng, *Lý thuyết điều khiển tự động*, NXB. Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, 2005.