

# Điều khiển bám quỹ đạo robot Delta ba bậc tự do sử dụng thuật toán Fuzzy-PID

## Trajectory tracking control of 3-DOF Delta robot using Fuzzy-PID algorithm

Lê Minh Thành<sup>1</sup>, Lương Hoài Thương<sup>1</sup>, Phạm Thanh Tùng<sup>1</sup>, Phạm Công Thành<sup>2</sup>  
Nguyễn Chí Ngôn<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ĐH SPKT Vĩnh Long, <sup>2</sup>ĐH CNTP TP. Hồ Chí Minh, <sup>3</sup>ĐH Cần Thơ  
Email: thanhlm@vlute.edu.vn, ncngon@ctu.edu.vn

### Abstract

The article presents an application of the Fuzzy-PID controller to control 3-DOF Delta robots. This is a parallel robot with a wide range of applications, from assembling sophisticated parts to the creation of complex movements in shaping, machining of complex profiles with high performance, high loading capacity, etc. The Fuzzy-PID algorithm is designed to control the robot trajectory in order to combine the advantages of the Fuzzy and PID algorithms. Simulation results in MATLAB/SIMULINK show that the response of the proposed controller is better compared to traditional PID controllers, without overshoot and steady-state error, and with response time about 0.11 (s).

### Keywords

Delta robot, PID, fuzzy, trajectory tracking

### Tóm tắt<sup>1</sup>

Bài báo này trình bày một ứng dụng của bộ điều khiển Fuzzy-PID để điều khiển bám quỹ đạo của robot Delta 3 bậc tự do. Đây là loại robot song song có phạm vi sử dụng khá rộng, từ lắp ráp các chi tiết tinh vi đến việc tạo các chuyển động, tạo hình và gia công các biên dạng phức tạp với hiệu suất cao, khả năng chịu tải lớn, v.v... Thuật toán Fuzzy-PID được thiết kế để điều khiển bám quỹ đạo robot Delta thông qua việc kết hợp thuật điều khiển Fuzzy và PID. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/SIMULINK cho thấy đáp ứng của bộ điều khiển đề xuất tốt hơn đáp ứng của bộ điều khiển PID truyền thống, không xảy ra sai số xác lập và vọt lố, cũng như thời gian đáp ứng đạt 0.11 giây.

### Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	Độ	Góc các chân trên của robot Delta
$E_0$		Vị trí điểm cuối
F	mm	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa nền trên
E	mm	Chiều dài cạnh tam giác đều đĩa chuyển động dưới
$r_f$	mm	Chiều dài chân trên
$r_c$	mm	Chiều dài chân dưới
$\alpha_i$	Độ	Góc chân trên
$\phi_i$	Độ	Góc tách giữa mỗi chân trên với mặt phẳng XY

### Chữ viết tắt

DOF	Degrees of Freedom
PID	Proportional Integral Derivative
DC	Direct current

### 1. Phần mở đầu

Với cơ cấu linh hoạt, ưu điểm về tốc độ, lực và độ chính xác, robot song song trở nên phổ biến và được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp [1]. Cấu trúc phức tạp của robot này làm cho chúng trở thành một trọng tâm nghiên cứu thú vị. Robot song song được đề xuất vào năm 1939, khi Pollard xây dựng một robot điều khiển vị trí của một khẩu súng phun [2]. Trong bối cảnh này, các robot khác có cùng cấu trúc đã được thực hiện. Ví dụ, một robot được đề xuất bởi Stewart với hai nền tảng đảm bảo sự ổn định cố định trong một cơ sở tĩnh [3]. Năm 1985 một loại robot song song đã được phát triển và xây dựng trong Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) gọi là robot Delta tập trung vào công việc công nghiệp [4]. Ví dụ, robot với độ chính xác cao nhưng chuyển động chậm được sử dụng rộng rãi trong các máy in 3D [5]. Trong lĩnh vực công nghiệp sự cần thiết để tối ưu hóa sản xuất là một thách thức lớn cho các công ty sản xuất robot từ những năm 80 [6].

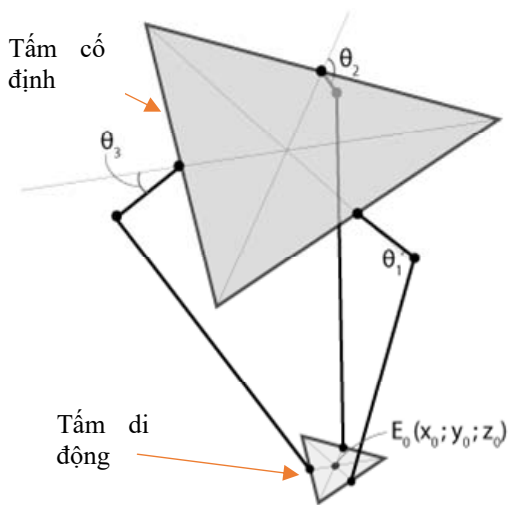
Robot song song đã được nghiên cứu và chế tạo thành công ở nhiều quốc gia [6-8]. Tuy nhiên, với giá thành cao và việc kiểm soát hoạt động của robot song song, nhất là vấn đề điều khiển bám quỹ đạo của robot luôn được quan tâm, nghiên cứu cải tiến. Một số nghiên cứu đã sử dụng các thuật toán điều khiển kinh điển như PD, LQR [9], tuy nhiên, khi tham số của robot thay đổi thì các kiểu điều khiển này không thể tự hiệu chỉnh lại bộ điều khiển.

<sup>1</sup> Ngày nhận bài: 14/01/2019; Ngày nhận bản sửa: 21/06/2019; Ngày chấp nhận: 01/08/2019; Phản biện: Lê Hoài Quốc, Lê Tiến Dũng.

Trong tiến trình nỗ lực làm chủ việc chế tạo robot song song đáp ứng nhu cầu công nghiệp, bài báo này hướng đến việc làm chủ đối tượng điều khiển. Nghiên cứu tiến hành phân tích, so sánh và đánh giá các giải thuật điều khiển Fuzzy-PID và PID kinh điển áp dụng cho robot Delta, theo tiêu chuẩn đánh giá tích phân trị tuyệt đối sai số, để có được hiệu suất tốt hơn của hệ vòng kín. Các phương pháp điều khiển này được kiểm nghiệm bằng phần mềm MATLAB /SIMULINK.

**2. Động học của robot Delta**

Động học của robot Delta được thể hiện trong H. 1 bao gồm hai hình tam giác đều bằng nhau (tâm cố định và tâm di động).



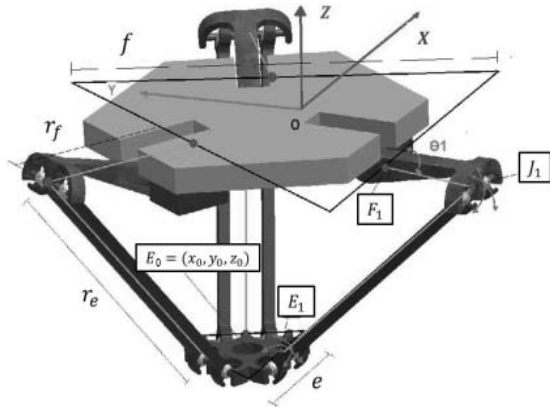
H. 1 Góc quay và vị trí robot Delta [7]

Những góc chung là  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  xác lập điểm  $E_0$  là vị trí đầu mút của cánh tay, có tọa độ  $(x_0, y_0, z_0)$ . Để tính toán động học ngược của robot Delta, chúng ta phải xác định được vị trí điểm  $E_0(x_0, y_0, z_0)$  từ đó tìm ngược lại các góc  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ . Mặc khác để tính động học thuận của robot Delta, chúng ta phải xác định được các góc rồi từ đó chúng ta tìm được vị trí điểm cuối  $E_0(x_0, y_0, z_0)$  [8].

**2.1 Động học ngược của robot Delta**

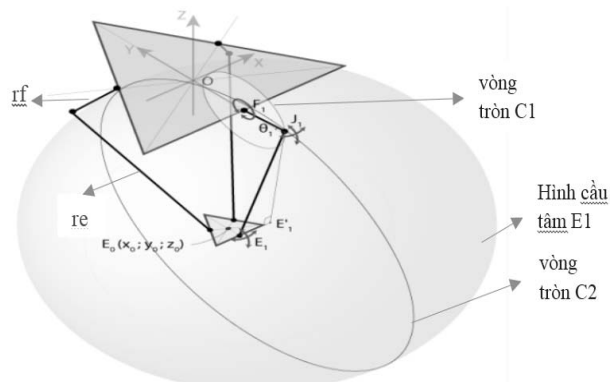
Động học ngược yêu cầu xác định được các vị trí góc mong muốn của bộ truyền động, được cho bởi một điểm cuối mong muốn của hiệu ứng trong không gian Đề các. Đây là phương pháp hình học nên trọng lượng và mômen quán tính không được xem xét trong quá trình lập mô hình. Hình học vật lý của robot Delta được biểu diễn trong H. 2 [9].

Trong H.2,  $f$  đại diện cho chiều dài cạnh tam giác đều của đĩa nền trên;  $e$  là chiều dài cạnh tam giác đều đĩa chuyển động dưới;  $r_f$  là chiều dài chân trên;  $r_e$  là chiều dài chân dưới;  $E_0(x_0, y_0, z_0)$  là tâm của đĩa chuyển động dưới;  $E_1(x_1, y_1, z_1)$  là trung điểm của cạnh tam giác đều đĩa chuyển động dưới;  $0(0,0,0)$  là tâm của đĩa nền trên. Các góc  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  là các góc truyền động và  $J_1$  là điểm giao giữa chân trên với chân dưới của robot Delta.



H. 2 Dạng hình học của robot Delta

Do kết cấu của robot Delta mà  $F_1, J_1$  chỉ có thể xoay xung quanh trục YZ tạo thành hình tròn với tâm tại điểm  $F_1$  và bán kính  $r_f$ . Ngược lại với  $F_1, J_1, E_1$  được gọi là khớp tổng hợp có nghĩa là  $E_1, J_1$  có thể quay tự do, lệ thuộc vào điểm  $E_1$  tạo thành hình cầu với tâm  $E_1$  và bán kính  $r_e$ . Sự giao nhau giữa hình cầu và hình tròn được biểu diễn ở H. 3 [7]



H. 3 Dạng hình học giao nhau giữa hình cầu và vòng tròn

Trong đó  $E'1$  là phép chiếu của điểm  $E_1$  trên mặt phẳng YZ. Điểm  $J_1$  có thể được tìm thấy như là giao điểm của hai vòng tròn  $C1$  và  $C2$  với các tâm lần lượt là  $F_1$  và  $E'1$ , và bán kính lần lượt là  $r_f$  và  $E'1, J_1$ . Nếu tìm được  $J_1$  thì chúng ta có thể tính được góc  $\theta_1$  và  $J_1$  được tìm thông qua các công thức vòng tròn.

- Phương trình vòng tròn C1

$$(y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_f^2, \text{ với điểm}$$

$$F_1 \left( 0, \frac{f}{2\sqrt{3}}, 0 \right) \text{ tìm được từ H.3, suy ra:}$$

$$\left( y_{J1} - \frac{f}{2\sqrt{3}} \right)^2 + z_{J1}^2 = r_f^2 \tag{1}$$

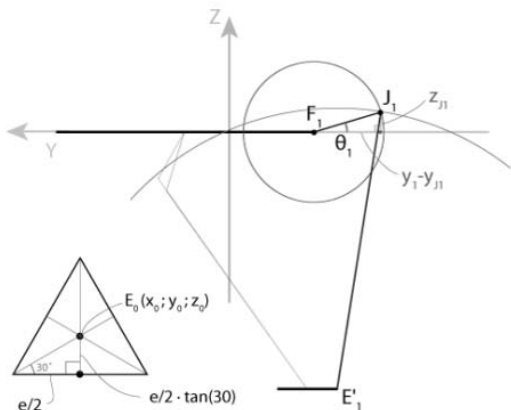
- Phương trình vòng tròn C2

$$(y_{J1} - y_{E'1})^2 + (z_{J1} - z_{E'1})^2 = (E'1, J1)^2 = r_e^2 - x_0^2$$

$$\text{với điểm } E_1 \left( x_0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0 \right), \text{ suy ra:}$$

$$\left(y_{J_1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (z_{J_1} - z_0)^2 = r_e^2 - x_0^2 \quad (2)$$

Từ hình 3 ta tính được  $F_1$ , chúng ta cần tìm điểm  $J_1(x_{J_1}, y_{J_1}, z_{J_1})$  thông qua phương trình (1) và (2) từ đó tìm được góc  $\theta_1$  từ H. 4 [7]



H. 4 Trục YZ và những kích thước cơ bản để tìm góc  $\theta_1$

Từ H.4 ta có:

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{z_{J_1}}{(y_{F_1} - y_{J_1})}\right] \quad (3)$$

Giải phương trình (1) và (2), sau đó thế vào (3) ta tìm được  $\theta_1$ . Do sự đơn giản về đại số là sự lựa chọn tốt của khung tham chiếu: khớp  $F_1, J_1$  di chuyển trong trục YZ, vì vậy chúng ta hoàn toàn có thể bỏ qua trục X. Để tận dụng lợi thế này cho phần còn lại để ta tìm góc  $\theta_2$  và  $\theta_3$  do tính đối xứng của robot Delta.

Đầu tiên chúng ta xoay tọa độ hệ thống trong mặt phẳng XY quanh trục Z qua góc  $-120^\circ$  ngược chiều kim đồng hồ như được hiển thị ở hình H.5 [7], để có được góc  $\theta_2$  và ta tiếp tục xoay tọa độ hệ thống trong mặt phẳng XY quanh trục Z qua góc  $+120^\circ$  cùng chiều kim đồng hồ như được hiển thị ở H. 5 [7] để có được góc  $\theta_3$ .

- Quay  $-120^\circ$  lúc này  $\theta_1 \rightarrow \theta_2$ ;  $F_1 \rightarrow F'_1$  và  $J_1 \rightarrow J'_1$
- Quay  $+120^\circ$  lúc này  $\theta_1 \rightarrow \theta_3$ ;  $F_1 \rightarrow F''_1$  và  $J_1 \rightarrow J''_1$

Ta có công thức đổi trục như sau:

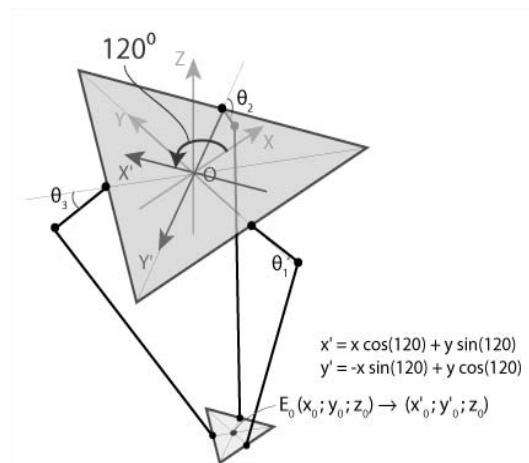
$$\begin{aligned} x_0^i &= x_0 \cos(\pm 120^\circ) \pm y_0 \sin(\pm 120^\circ) \\ y_0^i &= y_0 \sin(\pm 120^\circ) \mp x_0 \cos(\pm 120^\circ) \\ z_0^i &= z_0 \end{aligned} \quad (4)$$

với  $i = 2, 3$ .

Từ công thức đổi trục ta suy ra công thức đổi trục cho góc  $\theta_2$  như sau:

$$\begin{aligned} x_0^2 &= x_0 \cos(-120^\circ) - y_0 \sin(-120^\circ) \\ y_0^2 &= y_0 \sin(-120^\circ) + x_0 \cos(-120^\circ) \\ z_0^2 &= z_0 \end{aligned} \quad (5)$$

với  $i = 2$ .



H. 5 Sự quay đối xứng và tọa độ của robot Delta

Tương tự như tìm  $\theta_1$  ta thế (5) vào (1) và (2) rồi giải lại phương trình tìm nghiệm, sau đó thế nghiệm tìm được vào (6) ta có:

$$\theta_2 = \arctan\left[\frac{z_{J'_1}}{(y_{F'_1} - y_{J'_1})}\right] \quad (6)$$

Công thức đổi trục của cho góc  $\theta_3$  như sau:

$$\begin{aligned} x_0^3 &= x_0 \cos(120^\circ) + y_0 \sin(120^\circ) \\ y_0^3 &= y_0 \sin(120^\circ) - x_0 \cos(120^\circ) \\ z_0^3 &= z_0 \end{aligned} \quad (7)$$

với  $i = 3$

Ta thế (7) vào (1) và (2) rồi giải lại phương trình tìm nghiệm sau đó thế nghiệm vừa tìm được vào (8) ta tìm được:

$$\theta_3 = \arctan\left[\frac{z_{J''_1}}{(y_{F''_1} - y_{J''_1})}\right] \quad (8)$$

## 2.2 Động học thuận của Robot Delta

Chuyển động chuyển tiếp sử dụng để đạt được vị trí cuối bằng cách sử dụng các góc chân trên. Hình học đại diện của một chân robot được thể hiện trong H. 6 [9].

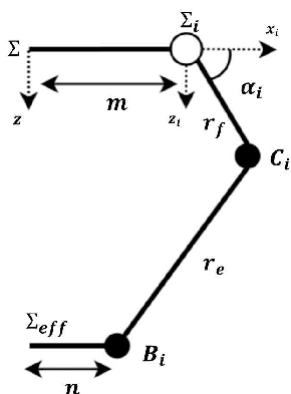
Từ hình H.6 ta có các biến sau đây.

$$\begin{aligned} \|\overline{\Sigma \Sigma_i}\| &= m, & \|\overline{\Sigma_{eff} B_i}\| &= n \\ \|\overline{B_i C_i}\| &= r_e, & \|\overline{\Sigma_i C_i}\| &= r_f \end{aligned}$$

Trong đó  $i \in \{1, 2, 3\}$  tham chiếu đến các chân trên 1, 2 và 3 và  $\Sigma$  là hệ thống tham chiếu toàn cục,  $\Sigma_i$  là hệ thống tham chiếu cho các điểm chân trên,  $\Sigma_{eff}$  là hệ thống tham chiếu cho các điểm cuối,  $C_i$  là điểm nối giữa chân trên và chân dưới,  $B_i$  là điểm nối giữa chân dưới và điểm cuối,  $\alpha_i$  là góc chân trên và  $\phi_i$  là góc tách giữa mỗi chân trên với mặt phẳng XY.

Chiều dài chân dưới có thể được tính bằng quan hệ vector sau:

$$\overline{B_i C_i} = \overline{C_i \Sigma} - \overline{B_i \Sigma} \quad (9)$$



H. 6 Tham số hình học của chân robot Delta

Phương trình (9) có thể được viết dưới dạng chiều dài hình học của robot và vị trí E<sub>1</sub> với sự tương quan đến tham chiếu Σ, như sau:

$$B_i C_i = R_{\Sigma_i} \begin{bmatrix} r_f \cos(\alpha_i) \\ 0 \\ r_f \sin(\alpha_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_n \cos(\phi_i) \\ \Delta_n \sin(\phi_i) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \quad (10)$$

Trong đó,  $\Delta_n = m - n$  và  $R_{\Sigma_i}$  là ma trận luân chuyển giữa  $\Sigma_i$  và  $\Sigma$  hệ thống tham chiếu.  $R_{\Sigma_i}$  chứa trong phương trình (10) được ràng buộc bởi chiều dài  $B_i C_i$  như sau:

$$\|B_i C_i\|^2 = r_e^2, \text{ với } i=1,2,3 \quad (11)$$

Phương trình (11) được viết lại như sau:

$$(x_B - x_i)^2 + (y_B - y_i)^2 + (z_B - z_i)^2 = r_e^2 \quad (12)$$

với  $i = 1, 2, 3$

Thay (12) vào (10) ta có được công thức sau:

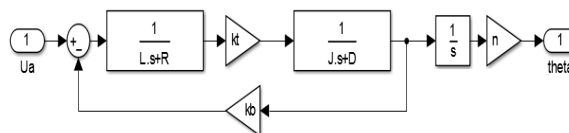
$$\begin{aligned} x_i &= (\Delta_n + r_f \cos(\alpha_i)) \times \cos(\phi_i) \\ y_i &= (\Delta_n + r_f \cos(\alpha_i)) \times \sin(\phi_i) \\ z_i &= r_f \sin(\alpha_i) \end{aligned} \quad (13)$$

Từ (13) nếu xác định được các góc  $\alpha_i$  và  $\phi_i$  thì ta sẽ tìm được vị trí điểm cuối E<sub>0</sub> (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, z<sub>0</sub>) của robot Delta.

### 3. Mô hình điều khiển của robot Delta và bộ điều khiển PID

#### 3.1 Mô hình điều khiển của robot

Chuyển động mỗi khớp của robot Delta là chuyển động quay, được điều khiển bởi một động cơ riêng. Như vậy có 3 khớp quay sẽ có 3 động cơ hoạt động đồng thời. Động cơ điều khiển chuyển động khớp quay của robot Delta là động cơ điện một chiều, với tín hiệu vào U<sub>a</sub> là điện áp đặt vào phản ứng, tín hiệu ra là góc quay θ và kích từ cho động cơ là kích từ độc lập (H.7), với thông số của động cơ là L=0.052H, R<sub>a</sub>=21.2Ω, K<sub>b</sub>=0.1433 Vs/rad, K<sub>t</sub>=0.1433kg-m/A, J=10<sup>-5</sup> kg-m s<sup>2</sup>/rad, D=10<sup>-4</sup> kg-m s/rad, n=30 [13].

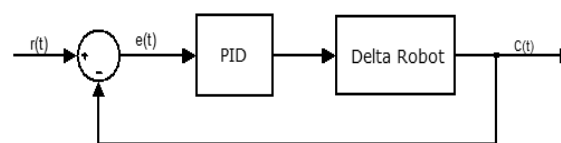


H. 7 Sơ đồ khối mô hình điều khiển động cơ của robot Delta

#### 3.2 Bộ điều khiển PID

Thuật toán điều khiển đầu tiên được áp dụng cho các bộ điều khiển chân dẫn động robot Delta là thuật toán điều khiển vi tích phân tỷ lệ PID [14-19] với lực điều khiển được tính theo công thức:

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int e(t) dt \quad (14)$$



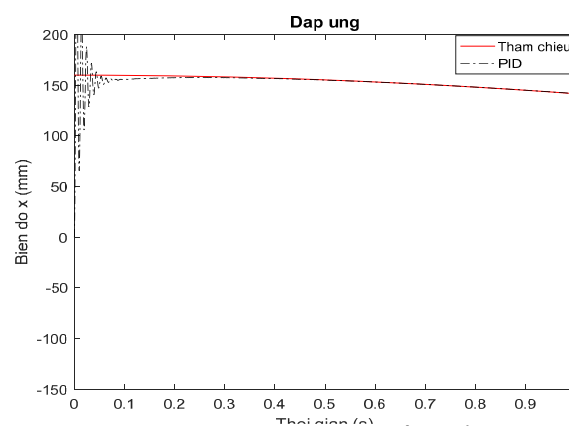
H. 8 Sơ đồ điều khiển dùng thuật toán PID

Tham số bộ điều khiển PID được tạo bởi công cụ auto-tuning [20] của MATLAB/SIMULINK với tham số cụ thể gồm: K<sub>P</sub> = 4.103; K<sub>I</sub> = 30.103; K<sub>D</sub> = 0.0503, làm cơ sở để hiệu chỉnh thông qua thực nghiệm.

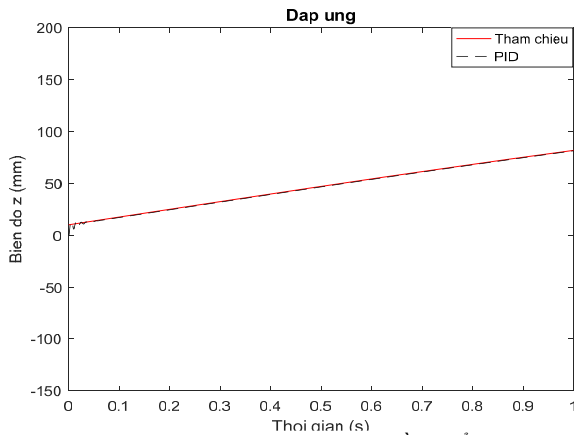
Mô phỏng bộ điều khiển PID với các sai số chuyển động của khâu chấp hành cuối theo đáp ứng vị trí và quỹ đạo cùng với đáp ứng của các chân dẫn động được trình bày từ H. 9 đến H. 12.

Kết quả khảo sát cho thấy bộ điều khiển PID có tính ổn định, chuyển động của khâu chấp hành cuối bám theo tín hiệu tham chiếu với thời gian xác lập ngắn, khoảng 0.2 (s). Các tiêu chuẩn chất lượng của bộ điều khiển PID cho thấy đáp ứng theo trục X, Y, Z có vọt lố khá lớn (POT=13.3%).

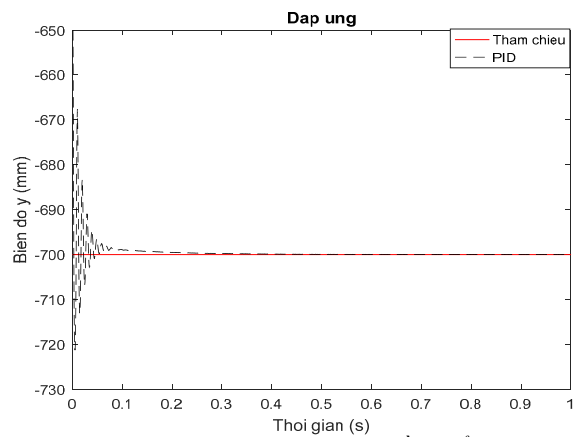
Có thể thấy rằng bộ điều khiển PID với các hệ số K<sub>P</sub>, K<sub>I</sub>, K<sub>D</sub> đã chọn có tính ổn định, các tiêu chuẩn chất lượng của hệ thống chấp nhận được nhưng vẫn cần phải cải thiện tốt hơn.



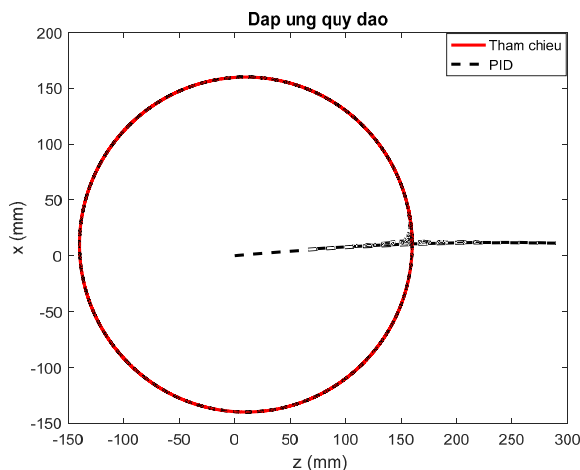
H. 9 Đáp ứng theo vị trí trục x của bộ điều khiển PID



H. 10 Đáp ứng theo vị trí trục z của bộ điều khiển PID



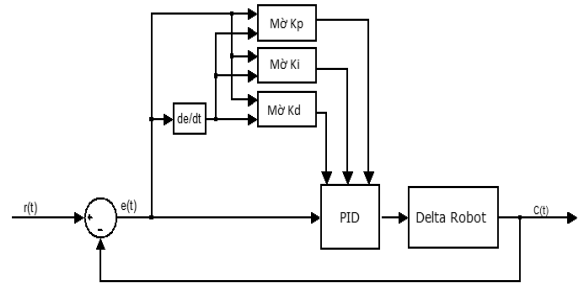
H. 11 Đáp ứng theo vị trí trục y của bộ điều khiển PID



H. 12 Đáp ứng theo quỹ đạo của bộ điều khiển PID

#### 4. Bộ điều khiển Fuzzy-PID

Một trong những hạn chế của khâu PID là các hệ số  $K_p, K_i, K_d$  không thay đổi trong quá trình điều khiển. Vì vậy, các tiêu chuẩn chất lượng của hệ thống thường không đạt kết quả tốt nhất và quá trình phối hợp giữa các chân dẫn động chưa đồng bộ. Bộ điều khiển tự chỉnh định Fuzzy-PID là một lựa chọn tốt hơn để cải thiện các hạn chế nêu trên dựa theo sự kết hợp các ưu điểm của bộ điều khiển mờ và bộ điều khiển PID. Nguyên tắc này được minh họa trên hình H.13.



H. 13 Sơ đồ điều khiển dùng thuật toán Fuzzy - PID

Thuật toán điều khiển Fuzzy được áp dụng để tự chỉnh các thông số của bộ PID đã khảo sát ở mục 3.2. Trên hình H.13, hàm truyền của bộ PID:  $G_{PID}(s) = K_p + K_i/s + K_d s$  với các tham số  $K_p, K_i, K_d$  được chỉnh định bằng 3 bộ điều khiển mờ riêng biệt, dựa theo sai lệch  $e(t)$  và đạo hàm  $de(t)$ . Nguyên tắc chung là bắt đầu với các giá trị  $K_p, K_i, K_d$  theo Ziegler-Nichols, sau đó dựa vào đáp ứng và thay đổi dần, để tìm ra hướng chỉnh định thích hợp. Ảnh hưởng của các tham số PID lên chất lượng điều khiển [16] là cơ sở để xây dựng luật điều khiển mờ (Bảng 1, 2, 3). Để rút ngắn thời gian quá độ, tín hiệu điều khiển cần đủ mạnh, do vậy, ta chọn:  $K_p, K_i$  lớn và  $K_d$  nhỏ; để hạn chế vọt lố, khi đáp ứng gần đạt đến giá trị tham khảo, ta điều chỉnh sao cho  $K_p, K_i$  nhỏ và  $K_d$  lớn; khi đáp ứng đạt giá trị xác lập, về cơ bản là không thay đổi tham số của bộ PID nữa.

Giá trị khởi tạo của bộ điều khiển PID chọn lựa để thực nghiệm được xác định theo [21-23]. Từ các giá trị này, mô hình được mô phỏng trên MATLAB/Simulink để tìm được bộ tham số  $[K_p, K_d, K_i]$ . Từ đó, nghiên cứu đã chọn ra khoảng giá trị  $[K_{min}, K_{max}]$  xung quanh bộ thông số trên. Với cách làm này, bộ điều khiển đảm bảo ổn định và có ưu điểm hơn là nó có khả năng tự điều chỉnh nhẹ xung quanh bộ giá trị  $[K_p, K_d, K_i]$  đã có, phù hợp với điều kiện thực tế, trong quá trình điều khiển. Giá trị cụ thể được xác lập gồm:  $K_{Pmin} = 1, K_{Pmax} = 5, K_{Dmin} = 0.01, K_{Dmax} = 0.05$ .

Tuyến tính hóa các hệ số  $K_p, K_d, K_i$  như mục 3.2 ta có:

$$\begin{aligned} K_p &= (K_{Pmax} - K_{Pmin}) \cdot K'_p + K_{Pmin} \\ K_d &= (K_{Dmax} - K_{Dmin}) \cdot K'_d + K_{Dmin} \\ K_i &= K_p^2 / (\beta \cdot K_d) \end{aligned} \tag{15}$$

Trong đó  $K'_p$  và  $K'_d$  được xác định từ các luật chỉnh định mờ và có giá trị chuẩn hóa trong khoảng  $K_p = [1, 5], K_d = [0.01, 0.05]$  và  $\beta = [1, 1000]$  sẽ được xác định dựa vào việc chỉnh định tham số  $K_p, K_d$ . Các hàm liên thuộc của  $e(t), \Delta e(t), K_p, K_d$  và  $\beta$  được xác định có dạng tam giác và các biến ngôn ngữ được mô tả và thử-sai thông qua mô phỏng như sau:

- $e(t) = \{ \text{âm nhiều, âm vừa, âm ít, zero, dương ít, dương vừa, dương nhiều} \}$
- $e(t) = \{ \text{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} \}$

- $\Delta e(t) = \{ \text{âm nhiều, âm vừa, âm ít, zero, dương ít, dương vừa, dương nhiều} \}$
- $\Delta e(t) = \{ \text{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB} \}$   
Chi tiết các luật hợp thành mờ hệ số  $K_p, K_D$  và  $\beta$  được trình bày trong các bảng 1, 2 và 3 bên dưới

$$\begin{aligned} x &= 10+150\cos(t) \\ y &= -700 \\ z &= 10+150\sin(t) \end{aligned} \tag{16}$$

**B. 1** Luật hợp thành mờ hệ số  $K_p$

$\Delta e(t)/e(t)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PM	PS	PT	ZE	PT	PS	PM
NM	PB	PM	PS	PT	PS	PM	PB
NS	PB	PB	PM	PS	PM	PB	PB
ZE	PB	PB	PB	PM	PB	PB	PB
PS	PB	PB	PM	PS	PM	PB	PB
PM	PB	PM	PS	PT	PS	PM	PB
PB	PM	PS	PT	ZE	PT	PS	PM

**B. 2** Luật hợp thành mờ hệ số  $K_D$

$\Delta e(t)/e(t)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PT	PS	PM	PB	PM	PS	PT
NM	ZE	PT	PS	PM	PS	PT	ZE
NS	ZE	ZE	PT	PS	PT	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	PT	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	ZE	PT	PS	PT	ZE	ZE
PM	ZE	PT	PS	PM	PS	PT	ZE
PB	PT	PS	PM	PB	PM	PS	PT

**B. 3** Luật hợp thành mờ hệ số  $\beta$

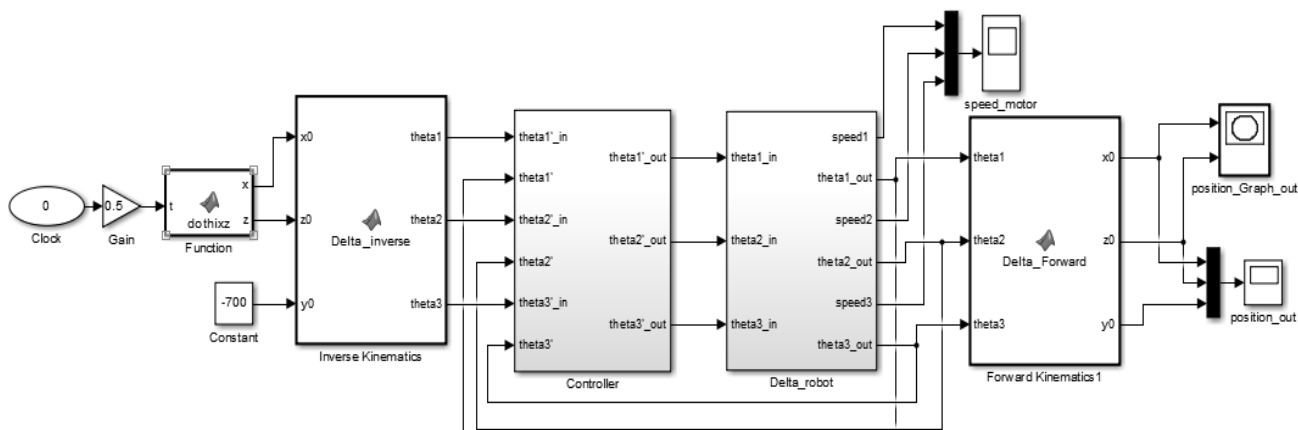
$\Delta e(t)/e(t)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PT	PS	PM	PB	PM	PS	PT
NM	ZE	PT	PS	PM	PS	PT	ZE
NS	ZE	ZE	PT	PS	PT	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	PT	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	ZE	PT	PS	PT	ZE	ZE
PM	ZE	PT	PS	PM	PS	PT	ZE
PB	PT	PS	PM	PB	PM	PS	PT

Trong bài báo này, quỹ đạo tham chiếu là đường tròn được mô tả bởi phương trình sau:

### 5. Sơ đồ và kết quả mô phỏng

#### 5.1 Sơ đồ mô phỏng

Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển Fuzzy-PID, được trình bày như H. 14. Trong đó, khối Function dùng để tạo quỹ đạo hình tròn trong hệ tọa độ x,z theo phương trình (16). Khối Inverse Kinematics là động học ngược của robot Delta được xây dựng từ phương trình (4), (5), (13) với nhiệm vụ chuyển các tọa độ xyz về các góc  $\theta_1 \theta_2 \theta_3$ . Khối Forward Kinematics là động học thuận của robot Delta được xây dựng từ phương trình (9), (10) có nhiệm vụ chuyển các góc  $\theta_1 \theta_2 \theta_3$  về tọa độ xyz ban đầu để kiểm chứng các công thức trên. Khối Delta\_robot được xây dựng từ hình 7 với 3 động cơ DC. Khối “Controller” là bộ điều khiển Fuzzy – PID với ba bộ điều khiển cho ba động cơ.



**H. 14** Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển Fuzzy-PID điều khiển Robot Delta trong MATLAB

#### 5.2 Kết quả mô phỏng trong Matlab/Simulink

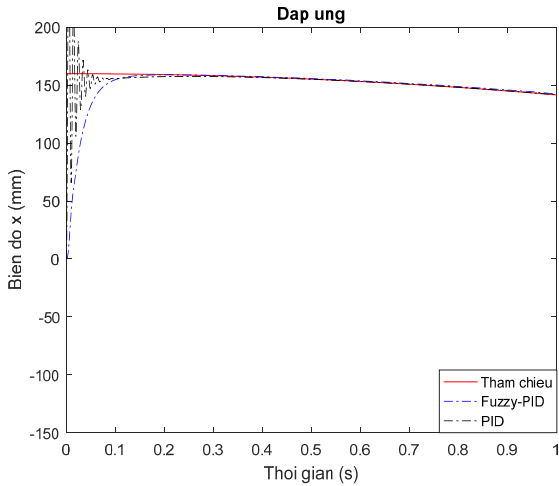
Các kết quả mô phỏng hệ thống với bộ điều khiển tự chỉnh định Fuzzy-PID từ H. 15 đến H. 20 cho thấy các đáp ứng và sai số chuyển động của khâu chấp hành cuối được cải thiện đáng kể so với trường hợp chỉ dùng bộ điều khiển PID kinh điển.

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng đáp ứng của bộ điều khiển Fuzzy-PID tốt hơn so với bộ điều khiển PID kinh điển với thời gian xác lập là 0.11 (s) và

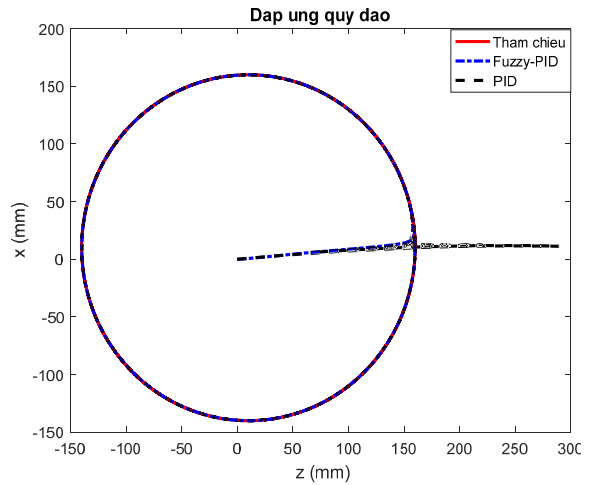
không xuất hiện vọt lô. Chi tiết chỉ tiêu chất lượng được trình bày ở bảng 4.

**B. 4** Tiêu chuẩn chất lượng hệ thống

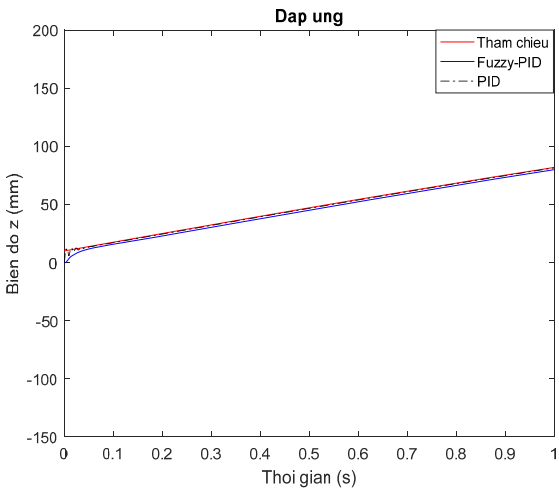
Tiêu chuẩn chất lượng	PID	Fuzzy - PID
Quá điều chỉnh (%)	13.3	0
Thời gian xác lập (s)	0.2	0.11



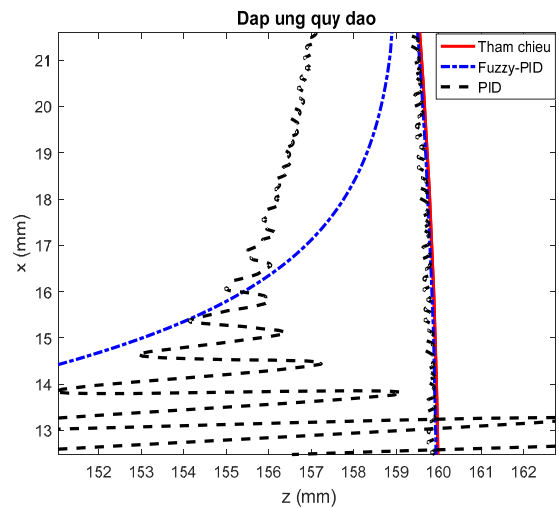
H. 15 Đáp ứng theo vị trí x của bộ điều khiển Fuzzy – PID và PID so với tham chiếu



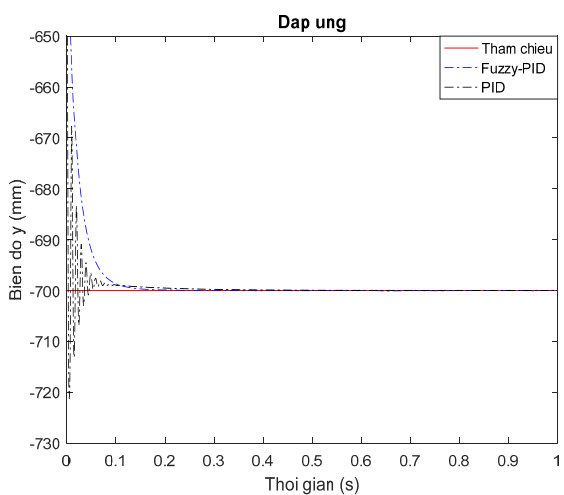
H. 18 Đáp ứng quỹ đạo của bộ điều khiển Fuzzy – PID và PID so với tham chiếu



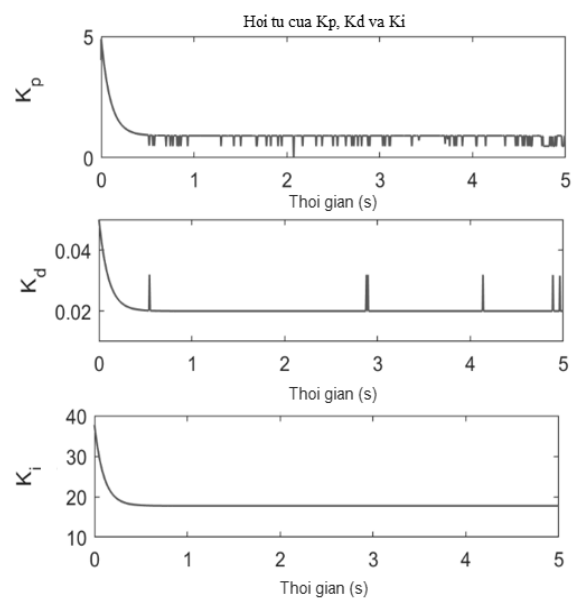
H. 16 Đáp ứng theo vị trí z của bộ điều khiển Fuzzy – PID và PID so với tham chiếu



H. 19 Hình ảnh phóng to của đáp ứng quỹ đạo



H. 17 Đáp ứng theo vị trí y của bộ điều khiển Fuzzy – PID và PID so với tham chiếu



H. 20 Minh họa sự hội tụ của các tham số của Fuzzy-PID

## 6. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất được bộ điều khiển tự chỉnh định Fuzzy-PID để điều khiển bám quỹ đạo cho tay máy robot Delta ba bậc tự do. Kết quả mô phỏng cho thấy các tiêu chuẩn chất lượng của hệ thống được cải thiện và đáp ứng tốt hơn so với bộ điều khiển PID kinh điển. Giải thuật đề xuất có tính ổn định và đáp ứng nhanh, đồng thời không xuất hiện vọt lố, cũng như sai số xác lập trong quá trình điều khiển chuyển động của robot Delta.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Merlet J (2000) *Parallel Robots*. P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers
- [2] P.W.L.V (1942) *Position-controlling apparatus*. Patent US2 286 571 A, Jun. 16, 1942
- [3] Stewart D (1966) *A Platform with Six Degrees of Freedom*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 38, no. 4, pp. 30-35
- [4] Clavel R (1991) *Conception d'un robot parallele rapide a 4 degres de liberte*. PhD Dissertation, Ecole Polytech. Federale de Lausanne, Lausanne
- [5] Bouri M, Clavel R (2010) *The linear delta: Developments and applications*. 41<sup>st</sup> Intern. Sym. on and 6<sup>th</sup> German Conference on Robotics (ROBOTIK), pp. 1-8
- [6] M-1 series, compact high-speed picking and assembly  
<http://www.fanuc.eu/ru/en/robots/robot-filter-page/m1-series> (truy cập 6/2019)
- [7] <http://hypertriangle.com/~alex/delta-robot-tutorial/> (truy cập: 6/2019)
- [8] <https://www.marginallyclever.com/other/sample-s/fk-ik-test.html> (truy cập: 6/2019)
- [9] Fabian J, Monterrey C, Canahuire R (2016) *Trajectory Tracking Control of a 3 DOF Delta Robot: a PD and LQR Comparison*. IEEE 13th Intern. Congress on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), pp. 1-5. DOI: 10.1109/INTERCON.2016.7815581
- [10] Mohsen, Mahdi, Mersad (2013) *Dynamics and Control of a Novel 3-DoF Spatial Parallel Robot*. First RSI/ISM Intern. Conf. on Robotics and Mechatronics (ICRoM), Tehran, pp. 183-188. DOI: 10.1109/ICRoM.2013.6510102
- [11] Craig JJ (2004) *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*. 3rd Edition, Pearson
- [12] Khalil W, Dombre E (2004) *Modeling, Identification and Control of Robots*. Butterworth-Heinemann, ISBN: 978-1-903996-66-9
- [13] Yu G-R, Hwang R-C (2004) *Optimal PID speed control of brush less DC motors using LQR approach*. IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics. The Hague, Netherlands, vol. 1, pp. 473-478, DOI: 10.1109/ICSMC.2004.1398343
- [14] Park J, Chung WK (2000) *Design of a robust  $sH^\infty$  PID control for industrial manipulators*. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control - Transactions of the ASME, vol. 122, no. 4, pp. 803-812
- [15] Ramirez JA, Cervantes I, Kelly R (2000) *PID regulation of robot manipulators: stability and performance*. Systems & Control Letters, vol. 41, issue 2, pp. 73-83
- [16] Aström K, Hagglund T (1995) *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. International Society of Automation Publisher, ISBN: 978-1-55617-516-9
- [17] Arimoto S, Miyazaki F (1984) *Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability*. Robotics Research, ed. by M. Brady, R. Paul, MIT Press, Cambridge, pp. 783-799
- [18] Xue D, Chen YQ, Atherton PD (2007) *Linear FeedbackControl: Analysis and Design with MATLAB*. Society for Industrial and Applied Mathematics - SIAM Publisher, ISBN 978-0-898716-38-2
- [19] Ziegler JG, Nichols NB (1942) *Optimum setting for Automatic Controllers*. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers - ASME, vol. 64, no.1, pp. 759-768
- [20] Leva A, Cox C, Ruano A (2002) *Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation*. Published in New York by IFAC - IFAC Professional Brief
- [21] Yesil E, Guzelkaya M, Eksin I (2004) *Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller*. Journal of Energy Conversion and Management, vol.45, no.3, pp. 377-390
- [22] Ahn KK, Nguyen BK (2006) *Position Control of Shape Memory Alloy Actuators Using Self Tuning Fuzzy PID Controller*. Intern. Journal of Control, Automation and Systems, vol. 4, no. 6, pp. 756-762
- [23] Zhao Z-Y, Tomizuka M, Isaka S (1993) *Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers*. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 5, pp. 1392-1398. DOI: 10.1109/21.260670