ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN TLC TRONG ĐIỀU KHIỂN ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG BA BÁNH BÁM QUỸ ĐẠO

Đường Khánh Sơn

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghệ Cần Thơ

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày phương pháp điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng ba bánh (OMR) sử dụng Trajectory Linearization Control (TLC)- một phương pháp thiết kế bộ điều khiển phi tuyến, kết hợp giữa nghịch đảo động lực học phi tuyến và ổn định hồi tiếp tuyến tính thay đổi theo thời gian, so sánh các kết quả mô phỏng trên Matlab với các bộ điều khiển PI, self-tuning fuzzy PI cho thấy ưu điểm vượt trội của TLC với đối tượng có mô hình động lực học phi tuyến cao như OMR. TLC với cấu trúc mới đã giải quyết tốt vấn đề decoupling hệ MIMO và cho hiệu quả điều khiển tốt.

***Từ khóa**: bộ điều khiển PI, bộ điều khiển mờ, TLC, robot di động đa hướng ba bánh, hệ phi tuyến.*

1. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, OMR được ứng dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực [1], [2]. Sử dụng ba bánh xe omni được điều khiển bởi ba động cơ độc lập nên robot có khả năng di chuyển một cách linh hoạt trong những không gian nhỏ, hẹp. Mô hình OMR là một hệ MIMO phi tuyến, vì thế vấn đề điều khiển OMR một cách linh hoạt bám theo các quỹ đạo phức tạp là một công việc khó khăn và nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Đa số tập trung vào phát triển cải tiến phần cứng, một số nghiên cứu phương pháp định vị, tránh vật cản và dẫn đường cho robot, số ít khác tập trung xây dựng mô hình động lực học robot và phương pháp điều khiển robot theo quỹ đạo cho trước. Bộ điều khiển Robocat [3] chỉ xét đến động học và dùng nó để thiết kế bộ điều khiển, không hề xét đến mối liên hệ phi tuyến động lực học một cách rõ ràng trong khi thiết kế bộ điều khiển, vì vậy bộ điều khiển đáp ứng chưa tốt. Trong nghiên cứu [4] mô hình động học và động lực học của OMR đã được phát triển, bao gồm cả động lực học động cơ nhưng đã bị bỏ qua mối liên hệ giữa vận tốc quay và tịnh tiến. Vì vậy mô hình động lực học ở đây chỉ đơn giản như một hệ tuyến tính. Trong [5] hai bộ điều khiển PID độc lập được thiết kế để điều khiển vị trí và hướng một cách riêng biệt dựa trên mô hình tuyến tính đơn giản.

Bài báo này gồm ba phần chính. Phần một mô hình động lực học robot dưới dạng đầy đủ bao gồm các phần tử phi tuyến và mối liên hệ phi tuyến giữa chúng. Phần hai thiết kế bộ điều khiển TLC để điều khiển OMR bám theo quỹ đạo cho trước, bên cạnh đó tác giả sử dụng thêm bộ điều khiển PI và self-tuning fuzzy PI để đánh giá hiệu quả của các phương pháp điều

Tác giả liên hệ: ThS. Đường Khánh Sơn
Email: Dkson@ctuet.edu.vn

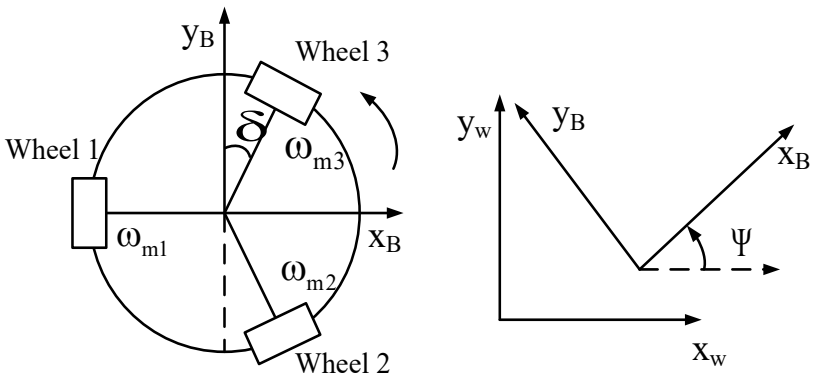
khiển đối với robot. Phần ba là các kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab nhằm đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển đã thiết kế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

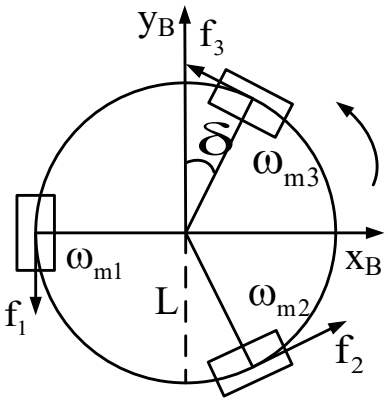
2.1. Mô hình hóa Robot di động đa hướng ba bánh

Mô hình robot được trình bày dựa trên một số giả định đơn giản [6], [7]. Giả sử rằng các bánh xe không trượt theo hướng chuyển động. Bỏ qua hằng số thời gian động cơ điện và lực ma sát không cùng hướng với lực tác dụng, xem lực ma sát trên trục động cơ và hộp số đơn giản là hệ số ma sát nhớt.

Cấu tạo thân robot được trình bày như **Hình 1**, mỗi bánh xe được đặt sao cho trục hướng vào tâm robot và các trục bánh xe hợp với nhau góc 120 độ. Sử dụng hai hệ trục tọa độ: Hệ tọa độ thân xe {B} và hệ tọa độ {W} như trên **Hình 1**. Trong đó hệ tọa độ thân xe được gắn cố định trên thân robot di chuyển với gốc tọa độ đặt tại tâm hình học của robot. Hệ tọa độ không gian robot hoạt động {W} được gắn cố định trong không gian hoạt động của robot.



Hình 1. *Hệ tọa độ thân robot {B} và hệ tọa độ {W}*



Hình 2. *Lực tác dụng lên Robot*

Trong đó:

δ : 30°;

m: Khối lượng của robot;

x, y : Vị trí của robot;

v_ψ : Vận tốc góc của robot;

I_z: Moment quán tính của robot;

v_x, v_y : Vận tốc của robot theo trục x, y;

ψ : Góc xác định hướng của robot;

L: Bán kính từ tâm robot đến bánh xe;

f_1, f_2, f_3 : Các lực tác dụng lên bánh xe 1, 2, 3;

E_1, E_2, E_3: Điện áp lên các động cơ 1, 2, 3;

$\omega_{m1}, \omega_{m2}, \omega_{m3}$: Tốc độ trục động cơ 1, 2, 3.

Phương trình động học robot được cho bởi ma trận chuyển hệ tọa độ từ hệ tọa độ thân về hệ tọa độ {W}:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Psi(t) & -\sin\Psi(t) & 0 \\ \sin\Psi(t) & \cos\Psi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\psi \end{bmatrix} \quad \textbf{(1)}$$

Động lực học của robot được xác định dựa trên phân tích các lực trong hệ tọa độ thân của robot ở **Hình 2** như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\psi v_y \\ -v_\psi v_x \\ 0 \end{bmatrix} + H.B \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2)}$$

Trong đó:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_Z} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3)}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \cos(\delta) & -\cos(\delta) \\ -1 & \sin(\delta) & \sin(\delta) \\ L & L & L \end{bmatrix}$$

Dựa trên phân tích hình học robot ta có:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\psi \end{bmatrix} = (B^T)^{-1} \frac{R}{n} \begin{bmatrix} \omega_{m1} \\ \omega_{m2} \\ \omega_{m3} \end{bmatrix} \quad \textbf{(4)}$$

Phương trình động lực học của mỗi động cơ DC như sau:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_3 \omega_m = E \quad \textbf{(5)}$$

$$J_0 \dot{\omega}_m + b_0 \omega_m + \frac{Rf}{n} = k_2 i_a \quad \textbf{(6)}$$

Với:

E: Điện áp phần ứng;

i_a: Dòng điện phần ứng;

ω_m : Tốc độ trục động cơ;

L_a: Điện cảm phần ứng;

R_a: Điện trở phần ứng;

k_3: Hệ số suất điện động;

k_2: Hệ số moment động cơ;

R: Bán kính bánh xe;

f : Lực kéo tác dụng lên bánh xe;

n: Tỉ số truyền của hộp giảm tốc;

b_0: Hệ số ma sát nhớt của động cơ, giảm tốc, bánh xe;

J_0: Quán tính kết hợp của động cơ, giảm tốc và bánh xe lên trục động cơ.

Vì hằng số thời gian điện của động cơ rất nhỏ so với hằng số thời gian cơ khí nên ta có thể bỏ qua động lực học mạch điện động cơ, vì vậy phương trình **(5)** được viết lại:

$$i_a = \frac{1}{R_a}(u - k_3 \omega_m) \quad \textbf{(7)}$$

$$J_0 \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{m1} \\ \dot{\omega}_{m2} \\ \dot{\omega}_{m3} \end{bmatrix} + b_0 \begin{bmatrix} \omega_{m1} \\ \omega_{m2} \\ \omega_{m3} \end{bmatrix} + \frac{R}{n} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} = \frac{k_2}{R_a} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} - \frac{k_2 k_3}{R_a} \begin{bmatrix} \omega_{m1} \\ \omega_{m2} \\ \omega_{m3} \end{bmatrix}$$

(8)

Kết hợp **(2)**, **(4)**, **(8)** có được mô hình động lực học của robot như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_\psi \end{bmatrix} = G^{-1} \begin{bmatrix} v_\psi v_x \\ -v_\psi v_y \\ 0 \end{bmatrix} - G^{-1} HBB^T \left(\frac{k_2 k_3}{R_a} + b_0\right) \frac{n^2}{R^2} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\psi \end{bmatrix} + G^{-1} HB \frac{k_2 n}{R.R_a} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(9)}$$

Với: $G = (I + HBB^T \frac{n^2 J_0}{R^2})$

Phương trình **(1)** và **(9)** cho thấy robot chuyển động như một hệ MIMO phi tuyến các phần tử có liên hệ động lực học với nhau.

2.2. Bộ điều khiển tích phân tỉ lệ (PI controller)

Bộ điều khiển tích phân tỉ lệ, còn gọi là bộ điều khiển PI (Proportional – Integral controller) được ứng dụng rất rộng rãi trong các hệ thống điều khiển công nghiệp vì cấu trúc đơn giản, tính hiệu quả của nó [8].

Bộ điều khiển PI có cấu trúc như **Hình 3**, trong đó:

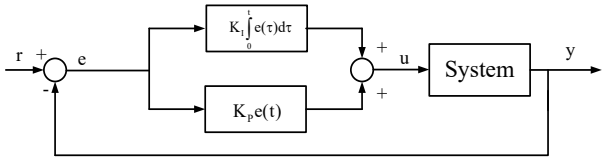
r là ngõ vào mong muốn,

u là tín hiệu điều khiển,

e là sai số giữa ngõ ra và ngõ vào mong muốn,

K_p là là độ lợi tỉ lệ,

K_I là độ lợi tích phân của bộ điều khiển.



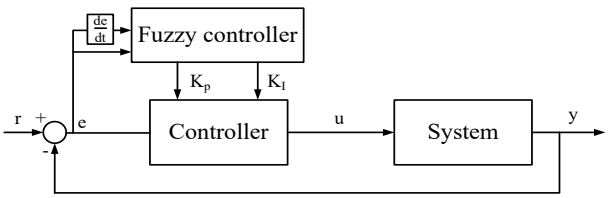
Hình 3. *Bộ điều khiển PI*

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau$$
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad \textbf{(10)}$$

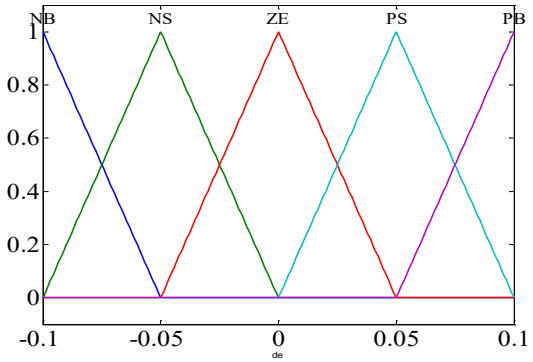
Có nhiều phương pháp chỉnh định thông số của bộ điều khiển PI, trong bài báo này sử dụng phương pháp Zeigler-Nichols.

2.3. Bộ điều khiển self-tuning Fuzzy PI

Mô hình bộ điều khiển self-tuning Fuzzy PI được trình bày như **Hình 4** [9], hai thông số K_P và K_I của bộ điều khiển PI sẽ được chỉnh định bởi bộ điều khiển Fuzzy.



Hình 4. *Bộ điều khiển Self-tuning Fuzzy PI*



Hình 5. *Hàm liên thuộc của e(t) và de(t)*

Bộ điều khiển mờ có 2 ngõ vào là e(t) và de(t), 2 ngõ ra là các giá trị K_P và K_I

Ngõ vào thứ nhất e(t) và ngõ vào thứ hai de(t) được mờ hóa bởi 5 tập mờ là {NB, NS, ZE, PS, PB}. Hàm liên thuộc được cho như **Hình 5**. Trong bài báo này, miền xác định của các biến ngõ vào là [-0.1, 0.1], các biến ngõ ra là [0.1].

Các thông số của bộ điều khiển self-tuning Fuzzy PI được sử dụng như nghiên cứu [9] với $K_{p\min} = 1, K_{p\max} = 23,\quad K_{I\min} = 1,\ K_{I\max} = 19$. Vì vậy chúng được tinh chỉnh như sau:

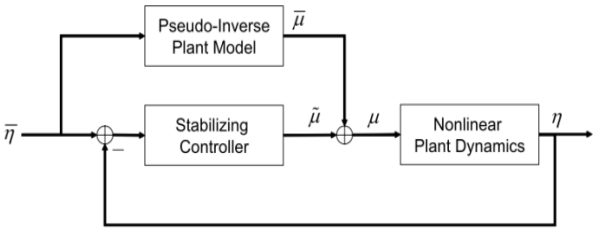
$$K'_p = \frac{K_p - K_{p\min}}{K_{p\max} - K_{I\min}} = \frac{K_p - 1}{23 - 1}$$
$$K'_I = \frac{K_I - K_{I\min}}{K_{I\max} - K_{I\min}} = \frac{K_p - 1}{19 - 1} \quad \textbf{(11)}$$

$$\Rightarrow K_p = 22K'_p + 1, K_I = 18K'_I + 1$$

2.4. Bộ điều khiển tuyến tính quỹ đạo (Trajectory Linearization Controller)

TLC là một phương pháp thiết kế bộ điều khiển phi tuyến, kết hợp giữa nghịch đảo động lực học phi tuyến và ổn định hồi tiếp tuyến tính thay đổi theo thời gian (LTV). TLC có thể đạt được ổn định hàm mũ dọc theo quỹ đạo đặt, vì vậy nó cho ta độ ổn định bền vững và chất lượng dọc theo quỹ đạo mà không cần nội suy độ lợi của bộ điều khiển [6].

Một bộ TLC bao gồm hai phần như minh họa ở **Hình 6**: giả nghịch đảo của đối tượng đưa ra tín hiệu ngõ vào điều khiển đặt $\bar{\mu}$ (điều khiển vòng hở) đặt ngõ ra hệ thống trong vùng lân cận của ngõ ra được điều khiển, và một bộ chỉnh định hồi tiếp LTV ổn định và tách riêng sai số bám động học (điều khiển vòng kín).



Hình 6. *Cấu trúc bộ điều khiển TLC*

2.4.1. Thiết kế bộ điều khiển động học (bộ điều khiển vòng ngoài)

Từ phương trình **(1)** ta có vận tốc robot đối với quỹ đạo đặt mong muốn $[\bar{x}(t) \quad \bar{y}(t) \quad \bar{\psi}(t)]^T$ là:

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_x \\ \bar{v}_y \\ \bar{v}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\bar{\psi}(t) & \sin\bar{\psi}(t) & 0 \\ -\sin\bar{\psi}(t) & \cos\bar{\psi}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ \dot{\bar{y}}(t) \\ \dot{\bar{\psi}}(t) \end{bmatrix} \quad \textbf{(12)}$$

Với $[\dot{\bar{x}}(t) \quad \dot{\bar{y}}(t) \quad \dot{\bar{\psi}}(t)]^T$ và $[\bar{x}(t) \quad \bar{y}(t) \quad \bar{\psi}(t)]^T$ được tính từ bộ vi phân giả từ tín hiệu điều khiển $[x_{com}(t) \quad y_{com}(t) \quad \psi_{com}(t)]^T$. Hàm truyền của bộ vi phân giả bậc hai như sau:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2 s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad \textbf{(13)}$$

Sai số bám:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ \bar{y}(t) \\ \bar{\psi}(t) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \tilde{v}_x \\ \tilde{v}_y \\ \tilde{v}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_\psi(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{v}_x(t) \\ \bar{v}_y(t) \\ \bar{v}_\psi(t) \end{bmatrix} \quad \textbf{(14)}$$

Tuyến tính hóa **(12)** dọc theo quỹ đạo đặt $[\bar{x}(t) \quad \bar{y}(t) \quad \bar{\psi}(t)]^T$ và ngõ vào đặt $[\bar{v}_x(t) \quad \bar{v}_y(t) \quad \bar{v}_\psi(t)]^T$ được:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\psi \end{bmatrix} = A_1(t) \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} + B_1(t) \begin{bmatrix} \tilde{v}_x \\ \tilde{v}_y \\ \tilde{v}_\psi \end{bmatrix} \quad \textbf{(15)}$$

$$A_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\bar{v}_y(t)\sin\bar{\psi}(t) - \bar{v}_x(t)\cos\bar{\psi}(t) \\ 0 & 0 & \bar{v}_y(t)\cos\bar{\psi}(t) - \bar{v}_x(t)\sin\bar{\psi}(t) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(16)

$$B_1(t) = \begin{bmatrix} \cos\bar{\psi}(t) & -\sin\bar{\psi}(t) & 0 \\ \sin\bar{\psi}(t) & \cos\bar{\psi}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \textbf{(17)}$$

Luật điều khiển hồi tiếp PI để ổn định sai số bám:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{r} \end{bmatrix} = -K_{P1} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} - K_{I1} \begin{bmatrix} \int e_x(t)dt \\ \int e_y(t)dt \\ \int e_\psi(t)dt \end{bmatrix} \quad \textbf{(18)}$$

Đặt vector sai số bám vòng ngoài như sau:

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int e_x(t)dt \\ \int e_y(t)dt \\ \int e_\psi(t)dt \\ e_x \\ e_y \\ e_\psi \end{bmatrix} \quad \textbf{(19)}$$

Phương trình trạng thái sai số bám vòng kín được trình bày lại:

$$\dot{\gamma} = A_{1c}\gamma = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ -B_1K_{I1} & A_1 - B_1K_{P1} \end{bmatrix} \gamma \quad \textbf{(20)}$$

Với O_3 là ma trận zero 3x3, I_3 là ma trận đơn vị 3x3.

Chọn K_{I1} và K_{P1} để đạt được sai số bám động lực học vòng kín mong muốn

$$A_{1c} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ diag[-a_{111} \quad -a_{121} \quad -a_{131}] & diag[-a_{112} \quad -a_{122} \quad -a_{132}] \end{bmatrix}$$

(21)

Với $a_{1j1} > 0, a_{1j2} > 0, j = 1,2,3$ là các hệ số của đa thức đặc trưng vòng kín mong muốn của mỗi kênh được cho bởi $\lambda^2 + a_{1j2}\lambda + a_{1j1}$

Từ **(20)** và **(21)** tìm được:

$$\begin{aligned} K_{I1} &= -B_1^{-1} diag\left[-a_{111} \quad -a_{121} \quad -a_{131}\right] \\ K_{P1} &= B_1^{-1}\left(A_1 - diag\left[-a_{112} \quad -a_{122} \quad -a_{132}\right]\right) \end{aligned} \quad \textbf{(22)}$$

Từ đó có được vận tốc điều khiển cho vòng trong:

$$\begin{bmatrix} u_{com} \\ v_{com} \\ r_{com} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{r} \end{bmatrix} \quad \textbf{(23)}$$

2.4.2.Thiết kế bộ điều khiển động lực học (bộ điều khiển vòng trong)

Từ **(9)** ta có điện áp ngõ vào đặt điều khiển động cơ $\left[\bar{E}_1(t) \quad \bar{E}_2(t) \quad \bar{E}_3(t)\right]^T$ đối với vận tốc đặt $\left[\bar{v}_x(t) \quad \bar{v}_y(t) \quad \bar{v}_\psi(t)\right]^T$ là:

$$\begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix} = (HB)^{-1}\frac{RR_a}{k_2 n} G \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_\psi \end{bmatrix} - (HB)^{-1}\frac{RR_a}{k_2 n}\begin{bmatrix} \bar{v}_\psi \bar{v}_x \\ -\bar{v}_\psi \bar{v}_y \\ 0 \end{bmatrix} + B^{-T}\frac{R_a n}{k_2 R}\left(\frac{k_2 k_3}{R_a} + b_0\right)\begin{bmatrix} \bar{v}_x \\ \bar{v}_y \\ \bar{v}_\psi \end{bmatrix} \quad \textbf{(24)}$$

Với $\left[\dot{\bar{u}}(t) \quad \dot{\bar{v}}(t) \quad \dot{\bar{r}}(t)\right]^T$ được tính từ $\left[\bar{u}(t) \quad \bar{r}(t) \quad \bar{r}(t)\right]^T$ dùng bộ vi phân giả như phần ***2.4.1.***

Đặt các sai số bám như sau:

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{v}_x \\ \bar{v}_y \\ \bar{v}_\psi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \\ \tilde{E}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(25)}$$

Tuyến tính hóa **(9)** dọc theo quỹ đạo đặt $\left[\bar{v}_x(t) \quad \bar{v}_y(t) \quad \bar{v}_\psi(t)\right]^T$ và ngõ vào điều khiển đặt $\left[\bar{E}_1 \quad \bar{E}_2 \quad \bar{E}_3\right]^T$ được sai số bám động lực học vòng trong:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_u \\ \dot{e}_v \\ \dot{e}_r \end{bmatrix} = A_2(t)\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} + B_2(t)\begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \\ \tilde{E}_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(26)}$$

$$A_1(t) = G^{-1}\begin{bmatrix} 0 & -\bar{v}_\psi(t) & \bar{v}_x(t) \\ -\bar{v}_\psi(t) & 0 & -\bar{v}_y(t) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - G^{-1}HBB^T\left(\frac{k_2 k_3}{R_a} + b_0\right)\frac{n^2}{R^2}$$

(27)

$$B_1(t) = G^{-1}HB\frac{k_2 n}{RR_a} \quad \textbf{(28)}$$

Thiết kế luật điều khiển hồi tiếp PI để ổn định sai số bám:

$$\begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \\ \tilde{E}_3 \end{bmatrix} = -K_{P2}\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} - K_{I2}\begin{bmatrix} \int e_u(t)dt \\ \int e_v(t)dt \\ \int e_r(t)dt \end{bmatrix} \quad \textbf{(29)}$$

Đặt vector sai số bám vòng ngoài như sau:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int e_u(t)dt \\ \int e_v(t)dt \\ \int e_r(t)dt \\ e_u \\ e_v \\ e_r \end{bmatrix} \quad \textbf{(30)}$$

Phương trình trạng thái sai số bám vòng kín được trình bày lại:

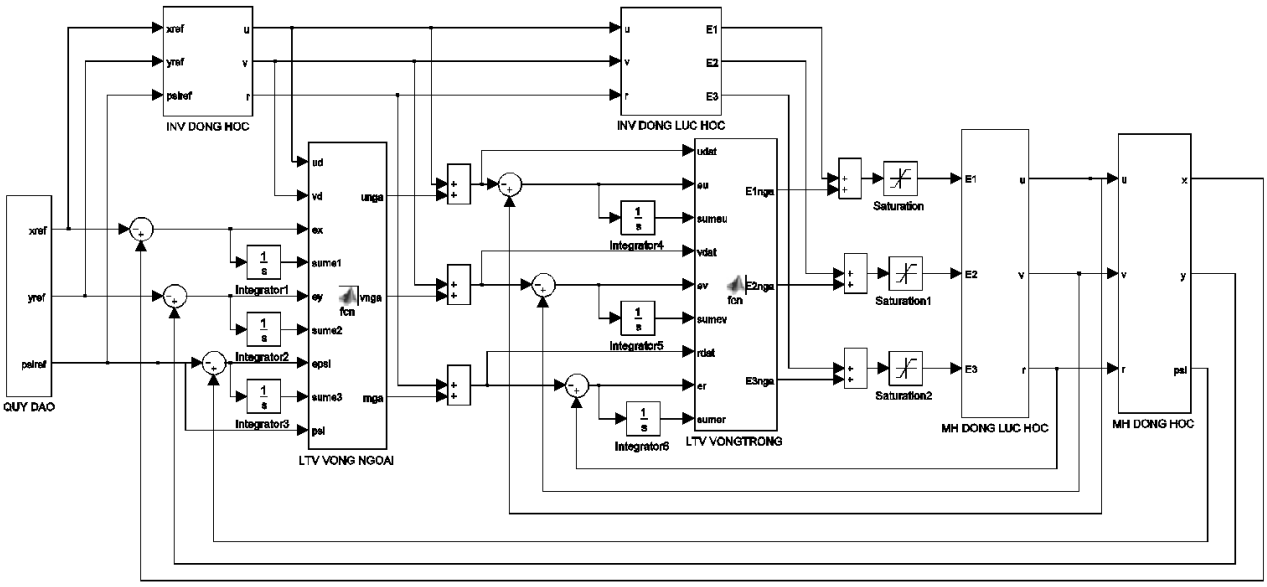
$$\dot{\eta} = A_{2c}\eta = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ -B_2K_{I2} & A_2 - B_2K_{P2} \end{bmatrix}\eta \quad \textbf{(31)}$$

Với O_3 là ma trận zero 3x3, I_3 là ma trận đơn vị 3x3.

Chọn K_{I2} và K_{P2} để đạt được sai số bám động lực học vòng kín mong muốn

$$A_{2c} = \begin{bmatrix} O_3 & I_3 \\ diag\left[-a_{211} \quad -a_{221} \quad -a_{231}\right] & diag\left[-a_{212} \quad -a_{222} \quad -a_{232}\right] \end{bmatrix}$$

(32)



Hình 7. *Sơ đồ mô phỏng bộ điều khiển TLC*

Với $a_{2j1} > 0, a_{2j2} > 0, j = 1,2,3$ là các hệ số của đa thức đặc trưng vòng kín mong muốn của mỗi kênh được cho bởi $\lambda^2 + a_{2j2}\lambda + a_{2j1}$

Từ **(31)** và **(32)** tìm được:

$$K_{I2} = -B_2^{-1} diag\left[-a_{211} \quad -a_{221} \quad -a_{231}\right]$$
$$K_{P2} = B_2^{-1}\left(A_2 - diag\left[-a_{212} \quad -a_{222} \quad -a_{232}\right]\right) \quad \textbf{(33)}$$

Từ đó có được điện áp điều khiển động cơ:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ \bar{E}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \\ \tilde{E}_3 \end{bmatrix} \quad \textbf{(34)}$$

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

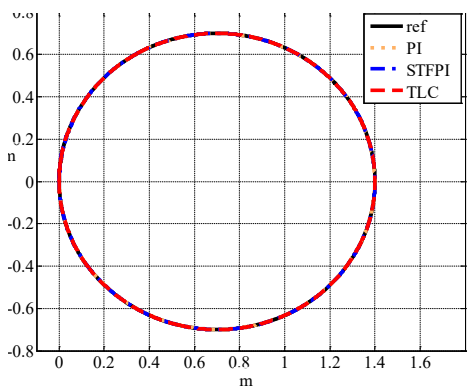
Phần này trình bày kết quả mô phỏng để đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển TLC đã thiết kế. Sơ đồ bộ TLC được thiết kế trên Matlab Simulink như trên **Hình 7**. Các thông số của robot: m=5 kg; R=0.102 m; n=20; L=0.38 m;

3.1. Mô phỏng với quỹ đạo đường tròn

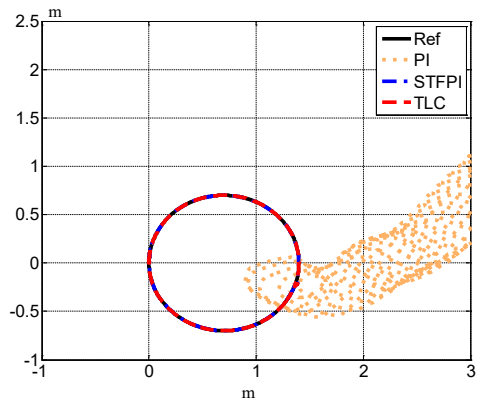
Phần này mô phỏng robot bám theo quỹ đạo là một đường tròn có đường kính 1.4 m. Vị trí ban đầu của robot tại gốc tọa độ. Robot di chuyển bám theo đường tròn trong khi vẫn phải duy trì góc $\psi = 0$, quỹ đạo được cho bởi các phương trình:

$$\begin{aligned} x &= 0.7 - 0.7\cos(0.1t) \\ y &= 0.7\sin(0.1t) \\ \psi &= 0 \end{aligned} \quad \textbf{(35)}$$

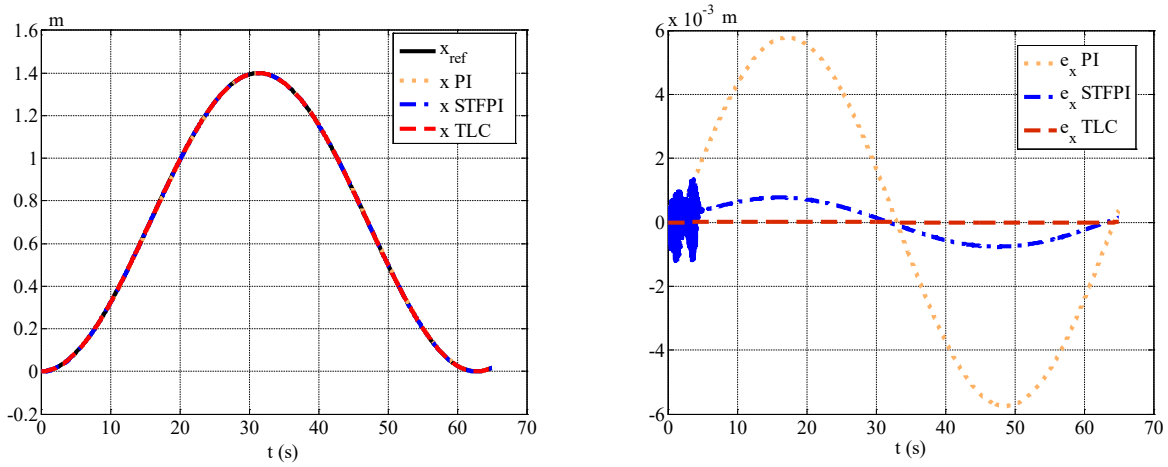
Các **Hình 8a, 9, 10** và **11** lần lượt trình bày quỹ đạo của robot, đáp ứng ngõ ra, sai số bám x, y, ψ của ba bộ điều khiển PI, STFPI, TLC.



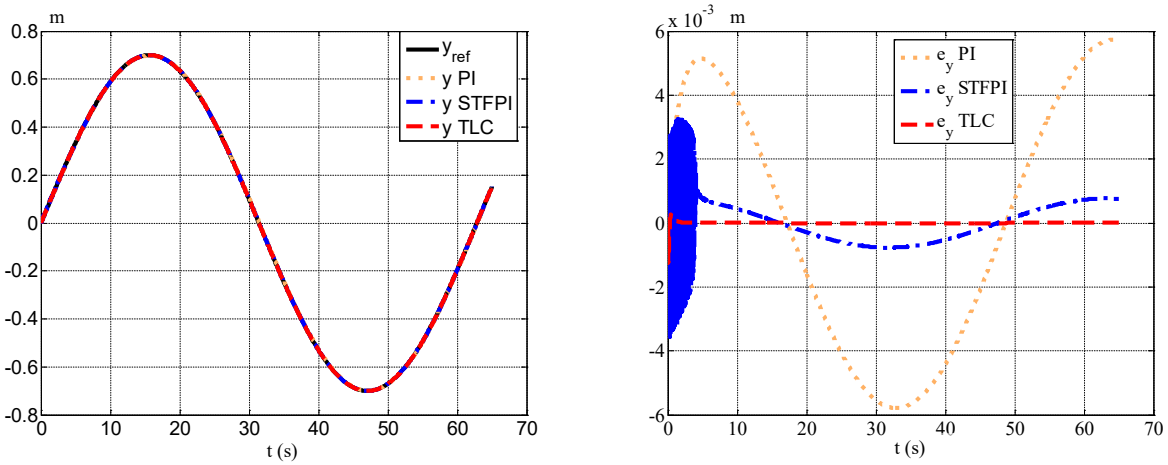
Hình 8a. *Quỹ đạo đường tròn của robot*



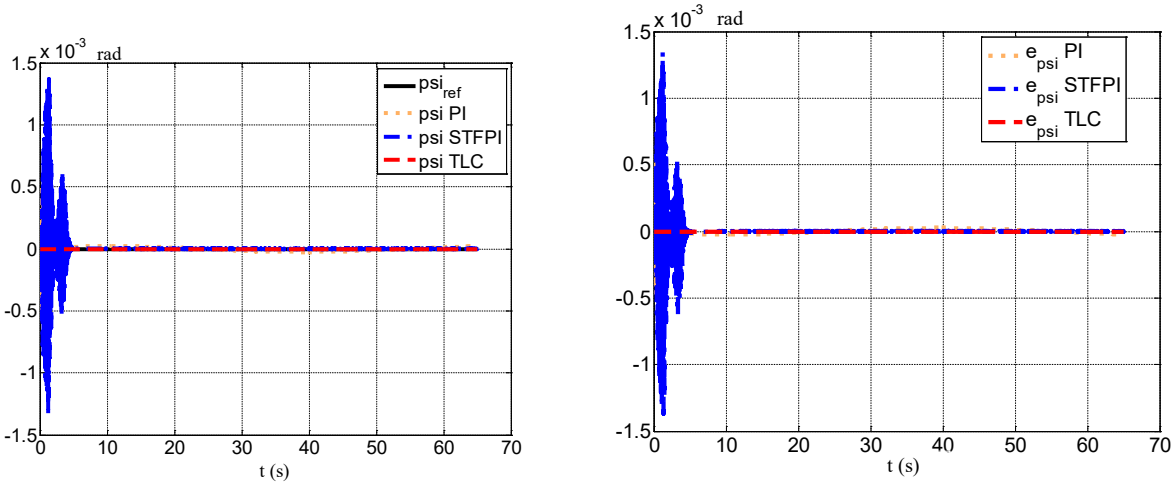
Hình 8b. *Quỹ đạo của robot khi có nhiễu*



Hình 9. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của x*



Hình 10. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của y*

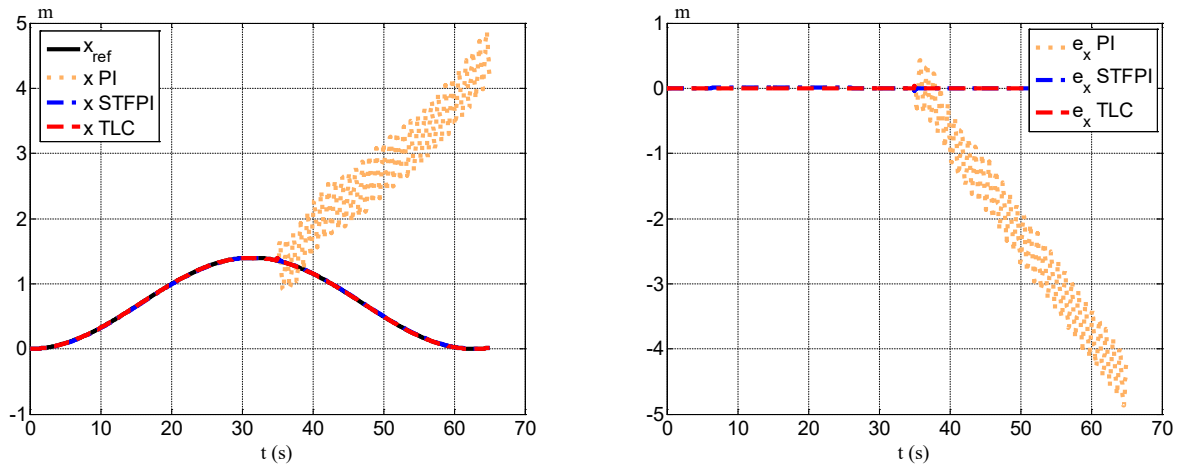


Hình 11. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của* ψ

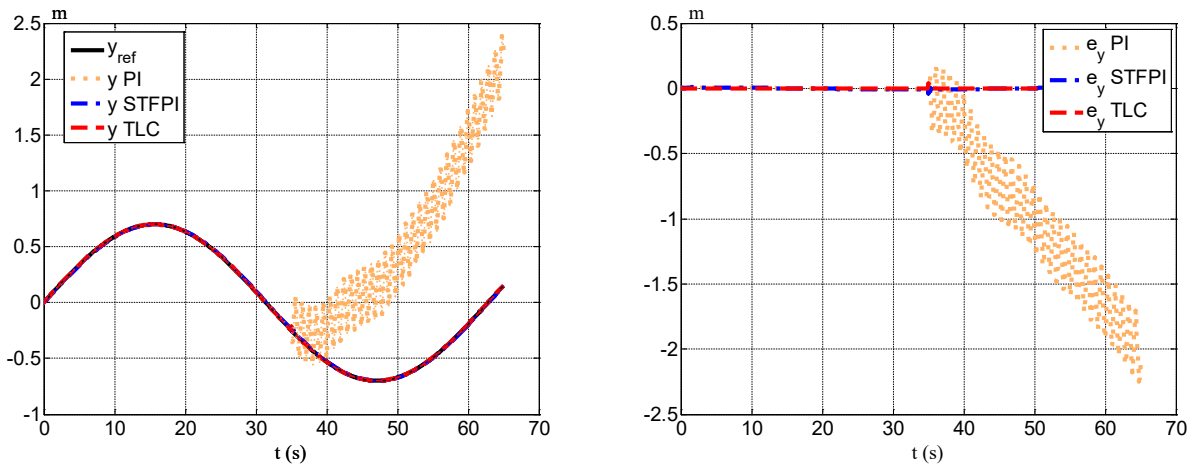
Các kết quả mô phỏng cho thấy ngõ ra của bộ điều khiển PI có vọt lố, sai số lớn (khoảng 0.0056 m), trong khi đó sai số của bộ điều khiển STFPI thấp hơn, nhưng vẫn không được triệt tiêu. Đây là nhược điểm của hai bộ điều khiển trên, phản ứng không tốt với quỹ đạo luôn thay đổi. Bộ điều khiển TLC có ưu điểm là vẫn triệt tiêu được sai số ngõ ra x và ψ. Ngõ ra y có sai số rất nhỏ (khoảng 0.00003 m) và sau đó hội tụ về 0.

3.2. Mô phỏng với ảnh hưởng của nhiễu

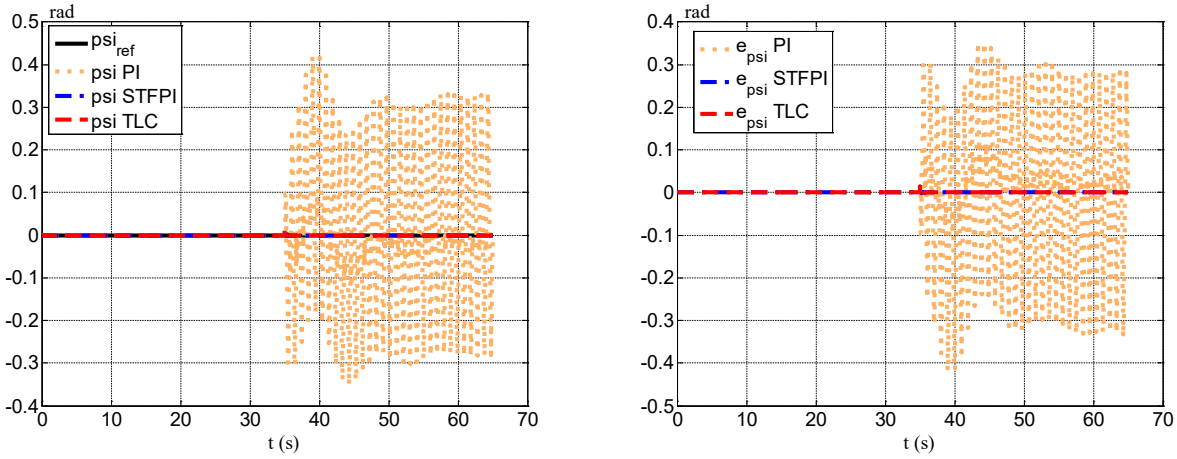
Phần này mô phỏng tác động của nhiễu lên robot khi bám theo quỹ đạo là một đường tròn với các điều kiện mô phỏng như mục **3.1**, nhiễu trắng có noise power 0.02, sample time là 35s tác động lên x, y. Các **Hình 8b, 12, 13, 14** lần lượt trình bày quỹ đạo của robot, đáp ứng ngõ ra x, y, ψ và sai số e_x, e_y, e_ψ của ba bộ điều khiển PI, STFPI, TLC.



Hình 13. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của* x



Hình 14. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của y*



Hình 15. *Đáp ứng ngõ ra và sai số bám của* ψ

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển PI phản ứng không tốt khi có nhiễu (khoảng 20%) tác động, xảy ra sai số rất lớn và không bám theo quỹ đạo được nữa, sai số của bộ điều khiển STFPI thấp hơn, vẫn bám theo quỹ đạo nhưng sai số còn lớn và không được triệt tiêu. Bộ điều khiển TLC phản ứng rất tốt khi có nhiễu tác động, robot vẫn bám theo quỹ đạo tốt, sai số nhanh chóng được triệt tiêu, ngõ ra x, y có sai số ít (khoảng 0.03m), sai số ở ngõ ra ψ rất nhỏ (khoảng 0.014 rad).

Bảng 2. *Giá trị IAE của ba bộ điều khiển theo quỹ đạo đường tròn khi có nhiễu*

IAE	PI	STFPI	TLC
x	15,359	769.7998	0.4059
y	7,663	782.9717	0.4335
ψ	493.2881	2.5553	0.1721

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày phương pháp thiết kế bộ điều khiển TLC cho OMR, đối tượng có tính phi tuyến và là hệ MIMO. Với cấu trúc đơn giản và dễ thiết kế, kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả của bộ điều khiển TLC so với hai bộ điều khiển PI và STFPI trong việc điều khiển robot bám theo các quỹ phức tạp, kể cả khi các nhiễu tác động vẫn cho chất lượng tốt, tốc độ đáp ứng nhanh. Hiệu quả của bộ điều khiển phụ thuộc vào kinh nghiệm khi chọn các hệ số ζ và ω khi tính toán hàm truyền của bộ vi phân giả bậc hai ở phương trình số (13). Tuy nhiên, không có phương pháp đặc biệt nào để tìm giá trị tối ưu của chúng. Vấn đề này có thể giải quyết bằng giải thuật di truyền (GA) hoặc sử dụng Neural Network sẽ được nghiên cứu ở các bài báo sau. Nếu có điều kiện sẽ tiến hành thực nghiệm trên mô hình thực tế để đánh giá được kết quả mô phỏng đã thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H.A. Samani, A. Abdollahi, H. Ostadi, S.Z. Rad, *Design and development of a comprehensive omni directional soccer robot*, International Journal of Advanced Robotic Systems 1 (3) (2004) 191–200.

[2] I.E. Paromtchik, U. Rembold, *A practical approach to motion generation and control for an omnidirectional mobile robot*, in: Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994, pp. 191–200.

[3] M. West, H. Asada, *Design of a holonomic omnidirectional vehicle*, in: Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992, pp. 97–103.

[4] F.G. Pin, S.M. Killough, *A new family of Omni-directional mobile robot-directional and holonomic wheeled platforms for mobile robots*, IEEE ransactions on Robotics and Automation 10 (2) (1994) 480–489.

[5] Samani, H.A., Abdollahi, A., Ostadi, H. and Rad, S.Z., 2004. *Design and development of a comprehensive omni directional soccer robot*, International Journal of Advanced Robotic Systems 1 (3):191–200.

[6] Y. Liu, X. Wu, J. Zhu, J. Lew, *"Omni directional mobile robot control by trajectory linearization"*, in, Denver, CO., 2003, pp. 3423-Proc. American Control Conference 3428.

[7] J. Wu, *Dynamic path planning of an omni-directional robot in a dynamic environment*, Ph.D. Dissertation, Ohio University, Athens, OH, 2005.

[8] Nguyễn Chí Ngôn, *Bộ điều khiển PI mờ: Từ thiết kế đến ứng dụng*. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 2011, 18a: 82-92.

[9] Đường Khánh Sơn và Từ Diệp Công Thành. *Ứng dụng bộ điều khiển Self tuning Fuzzy-PI Điều khiển Omni-directional Mobile robot*, Tạp chí khoa học & Ứng dụng, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, 2012, 20: 54-57.

TRAJECTORY TRACKING CONTROL FOR THREE-WHEELED OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT USING TLC

Duong Khanh Son

ABSTRACT

This paper presents a method of tracking control three-wheeled Omni-directional mobile robot (OMR) using Trajectory Linearization Control based on a nonlinear dynamic robot model (TLC). TLC combines nonlinear dynamic inversion and linear time-varying feedback stabilization. Besides, the paper uses some PI and self-tuning fuzzy PI (STFPI) controllers to compare the effectiveness of those methods for robot control. The many advantages of this method include simplicity to design controllers, high effectiveness for nonlinear MIMO systems. Simulation

results show that designed controllers are good performance for controlling the robot follow a command trajectory. It also exhibits the stability to the impact of noise

Keywords: *PI controller, Fuzzy controller, TLC, three-wheeled omni-directional mobile robot, nonlinear.*

Received: 25/05/2020

Revised: 08/06/2020

Accepted for publication: 12/06/2020