

## **Điều chỉnh bám quỹ đạo cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS bằng vật chuẩn**

Đặng Nam Kiên<sup>1</sup>, Nguyễn Vũ<sup>2\*</sup>, Nguyễn Thành Trung<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Viện Tự động hóa KTQS (Cửa Đông, Hoàn Kiếm, HN);

<sup>2</sup>Khoa Điện, Đại học Công Nghiệp Hà Nội (Minh Khai, Bắc Từ Liêm, HN);

<sup>3</sup>Khoa Trang bị, Bệnh viện TƯQĐ 108 (Bạch Đằng, Hai Bà Trưng, HN).

\*Email: vutudonghoa@yahoo.com.vn

Nhận bài: 15/8/2022; Hoàn thiện: 03/10/2022; Chấp nhận đăng: 02/02/2023; Xuất bản: 28/02/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.85.2023.35-44>

### **TÓM TẮT**

*Bài báo trình bày phương pháp ứng dụng thuật toán ngắm theo điểm đích ảo để điều khiển robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS bám theo đường quỹ đạo, dựa trên thông tin cung cấp về vị trí thực tế của robot bằng các vật chuẩn dọc theo quỹ đạo. Động học của robot tự hành bốn bánh lái chủ động cũng được nghiên cứu chi tiết, đảm bảo được tính ổn định của hệ thống khi vận hành với các ràng buộc vận tốc và hướng cho từng bánh xe. Quá trình tổng hợp luật điều khiển được bảo đảm toán học chặt chẽ. Mô phỏng trong Matlab thể hiện trực quan kết quả nghiên cứu.*

**Từ khóa:** Robot tự hành; 4wd4ws; Bốn bánh lái chủ động; Ngắm theo điểm đích ảo.

### **1. MỞ ĐẦU**

Với mỗi bánh xe được dẫn động độc lập bằng động cơ điện, robot bốn bánh và bốn lái (4WD4WS) có khả năng điều khiển linh hoạt và cơ động cao, và do đó trở thành một kiến trúc xe đầy hứa hẹn [4, 5]. Robot 4WD4WS có hai ưu điểm chính. Thứ nhất, hiệu suất lực kéo, phanh và lái có thể được cải thiện đáng kể, ngay cả trong những điều kiện lái xe khắc nghiệt, nhờ vào sự dư dẫn động của cơ cấu truyền động. Thứ hai, độ ổn định của góc nghiêng có thể được tăng cường một cách hiệu quả, vì bốn mô-tơ điện có thể được điều khiển độc lập, có thể tạo ra mô-men xoắn thông qua sự chênh lệch mô-men xoắn giữa các mô-tơ ở cả hai bên xe [4], đồng thời, góc trượt bên có thể được duy trì ổn định hơn trong vùng an toàn. Do vậy, robot bốn bánh và bốn lái được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như robot phục vụ nông nghiệp, robot làm vườn, robot kiểm tra chất lượng mặt cầu,...

Trong bài toán điều khiển robot tự hành vấn đề bám điểm, bám đường và điều khiển đề robot có mặt tại các điểm công tác đúng tư thế, đúng thời điểm là bài toán nổi bật được nghiên cứu rất nhiều hiện nay. Bản đồ hóa và định vị (SLAM) là điều cần thiết cho nhiều ứng dụng, chẳng hạn như tái tạo cảnh, khám phá bằng robot và lái xe tự động [1, 2]. Các phương pháp SLAM sử dụng LiDAR đã thu hút được nhiều sự chú ý từ cộng đồng nghiên cứu do độ chính xác và độ tin cậy của chúng trong các phép đo phạm vi. Tuy nhiên, các phương pháp dựa trên LiDAR thường bị thừa thớt dữ liệu và giới hạn trường nhìn dọc (FOV) trong các ứng dụng thế giới thực [2]. Ví dụ: các điểm của LiDAR có mật độ thấp, tạo ra một khối lượng lớn các vùng trống giữa hai lần quét gần đó. Đặc tính này thường khiến ước lượng trạng thái bị suy giảm trong môi trường không có cấu trúc, chẳng hạn như hành lang và cầu thang hẹp [1]. Ngoài ra, thiết bị LiDAR cũng có giá thành tương đối cao, có thể không phù hợp trong nhiều ứng dụng.

Có 2 nhóm sai số khi thực thi bài toán bám quỹ đạo cho robot tự hành hay gặp phải là sai số hệ thống (từ nội tại hệ thống) và nhiễu ngoại sinh [3, 6]. Trong khi sai số hệ thống với robot tự hành được xác định chủ yếu xuất phát từ 2 nguyên nhân chính: sự bất định của bán kính bánh xe và chiều dài cơ sở xe (khoảng cách ngang giữa 2 bánh). Đặc điểm này là không thể tránh khỏi do việc sử dụng bánh dẫn hồi (bánh hơi) và không thể dễ dàng xác định được điểm tiếp xúc hiệu quả của bánh xe, vấn đề sẽ càng phức tạp hơn nếu xe có tải thay đổi cả về khối lượng và điểm đặt

trên thân xe. Vấn đề sai số hệ thống có thể được xử lý tốt bằng cách hiệu chỉnh theo phương pháp UMBmark [3, 6].

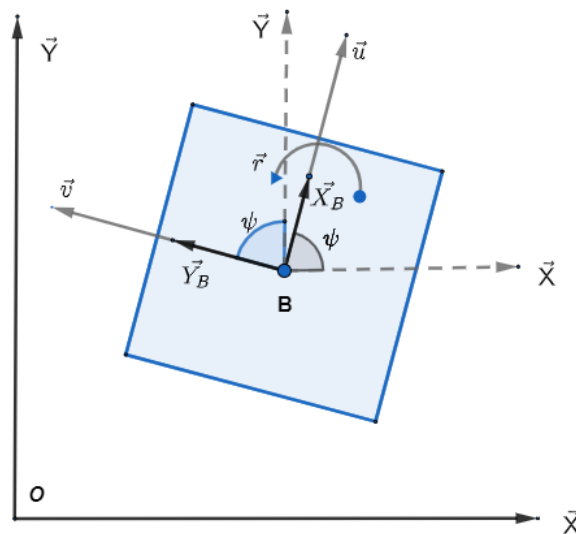
Do đó, với việc sử dụng Odometer như là một giải pháp đo lường duy nhất trong bám quỹ đạo sẽ cần xử lý được nhiều ngoại sinh vốn được sinh ra từ sự không đồng nhất của bề mặt vận động của robot tự hành. Sai số phát sinh từ nhiều ngoại sinh này sẽ không có quy luật nên giải pháp đơn giản và hiệu quả là hiệu chỉnh theo giai đoạn. Hiện tại các nghiên cứu trong nước có sử dụng các biện pháp điều chỉnh để xử lý nhiều ngoại sinh không nhiều, trong đó, [7] thực hiện với robot vi sai với tốc độ di động rất thấp (0.5 m/s). Ngoài ra, có các nghiên cứu [8] và [9] có sử dụng các cảm biến hình ảnh để điều chỉnh việc bám quỹ đạo của robot tự hành, tuy nhiên lại không đề xuất một thuật toán điều khiển đầy đủ mà thay vào đó là trình bày chi tiết việc triển khai trên thiết bị thực. Bài báo này sẽ trình bày một phương pháp sử dụng vật chuẩn để hiệu chỉnh sai số theo giai đoạn trên cơ sở bám quỹ đạo bằng phản hồi Odometer áp dụng cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động dạng 4wd4ws với tốc độ dịch chuyển tương đối nhanh (2 m/s) trên cơ sở một thuật toán điều khiển tường minh.

## 2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

### 2.1. Động học robot tự hành bốn bánh lái chủ động

#### 2.1.1. Động học thân xe

Với 2 hệ tọa độ quán tính (OXY) và hệ tọa độ thân xe (B X<sub>B</sub>Y<sub>B</sub>) biểu diễn các vector  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{r}$  theo thứ tự là vận tốc của xe dọc theo  $\vec{X}_B$ ,  $\vec{Y}_B$  và vận tốc góc quay quanh trục thẳng đứng. Trong đó, tọa độ xác định vị trí và trạng thái của xe là  $\eta = [x, y, \psi]^T$  tương ứng với đạo hàm của chúng là  $\dot{\eta} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{\psi}]^T$ .



**Hình 1.** Các vector vận tốc trong hệ tọa độ quán tính và hệ tọa độ thân xe.

Khi đó, với hình chiếu của 2 vector  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  lên hệ tọa độ quán tính ta thu được mối liên hệ:

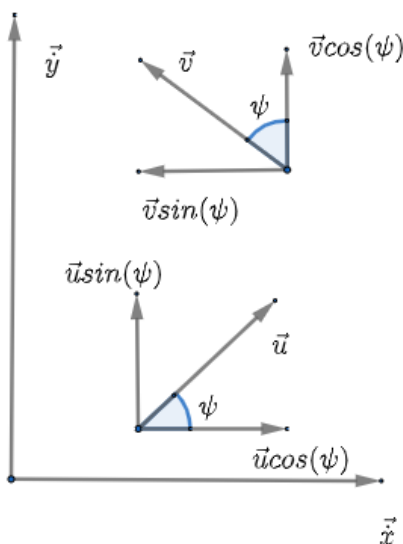
$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \end{cases} \quad (1)$$

Trong khi đó, do hai hệ tọa độ có chung trục thẳng đứng nên:

$$\dot{\psi} = r \quad (2)$$

Từ (1) và (2) ta có thể viết được hệ sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (3)$$



**Hình 2.** Chiếu 2 vector vận tốc theo hai hướng của hệ tọa độ quán tính.

Hay:

$$\dot{\eta} = R * \zeta, \text{ với } \zeta = [u, v, r]^T \quad (4.a)$$

Do  $R = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  là khả nghịch nên ta cũng có:

$$\zeta = R^{-1} * \dot{\eta} \quad (4.b)$$

Hệ phương trình (3) có thể coi là phương trình động hình học của thân xe.

### 2.1.2. Động học bánh xe

Trên thân xe giả sử  $l$  và  $d$  lần lượt là khoảng cách từ tâm B của thân xe đến bánh theo 2 trục  $X_B$  và  $Y_B$ . Khi đó, với điều kiện không có hiện tượng trượt giữa bánh xe và mặt đường với vận tốc thân xe  $\zeta$  thì các bánh xe phải đảm bảo được ràng buộc về vận tốc và hướng theo các phương trình động học dưới đây.

Gọi  $v_i$  là vận tốc của lớp xe thứ  $i$  :

$$v_i = \omega_i R_B \quad (5)$$

Với  $R_B$  là bán kính bánh xe,  $\omega_i$  là vận tốc góc của bánh xe.

Gọi  $\theta_i$  là góc hướng của bánh xe thứ  $i$ , khi đó ta có:

$$\begin{cases} v_{ix} = u - rl = v_i \cos(\theta_i) \\ v_{iy} = v + rd = v_i \sin(\theta_i) \end{cases} \quad (6)$$

Khi đó, ta có thể thu được  $V_i$  và  $\theta_i$ :

$$\theta_i = \text{atan}(v_{iy}/v_{ix}) \quad (7)$$

$$v_i = \sqrt{v_{ix}^2 + v_{iy}^2} = v_{iy} / \sin(\theta_i) \quad (8)$$

Tương tự như ta xây dựng được hệ phương trình cho tất cả 4 bánh, chú ý rằng tọa độ của các bánh trong hệ tọa độ gắn liền được xác định theo hình 3 dưới đây:

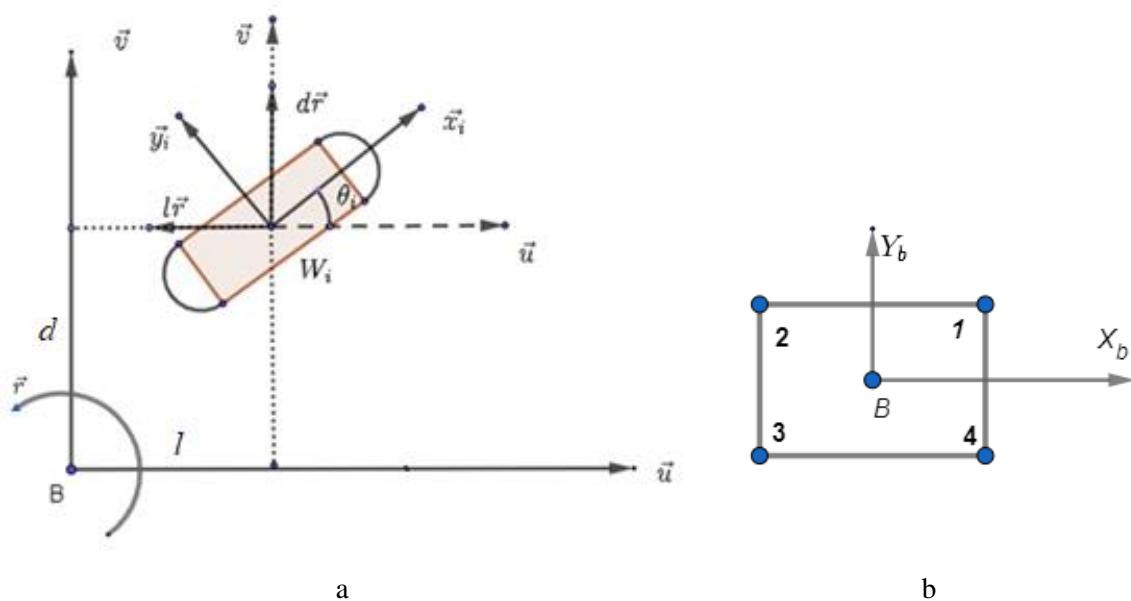
$$\begin{bmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{2x} \\ v_{2y} \\ v_{3x} \\ v_{3y} \\ v_{4x} \\ v_{4y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & d \\ 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & -d \\ 1 & 0 & l \\ 0 & 1 & -d \\ 1 & 0 & l \\ 0 & 1 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad (9)$$

Hay có thể viết thành dạng:

$$V = W * \zeta \quad (10)$$

Từ (4.b) và (10) ta có:

$$V = W * R^{-1} * \dot{\eta} \quad (11)$$



Hình 3. a, Động hình học của một bánh xe  $W_i$ ; b, Bố trí thứ tự các bánh trên thân xe.

Từ (9) nhận thấy tồn tại một số ràng buộc về vận tốc và hướng của các bánh xe để đảm bảo các bánh xe không bị trượt trên đường:

$$\begin{aligned} v_{2x} &= v_{1x} \\ v_{4x} &= v_{3x} \\ v_{4y} &= v_{1y} \\ v_{3y} &= v_{2y} \\ v_{3x} &= v_{1x} + \frac{v_{1y} - v_{2y}}{d} * l \end{aligned} \quad (12)$$

Đặt  $v_l = [v_{1x} \ v_{1y} \ v_{2y}]^T$ , khi đó,  $v_f = [v_{2x} \ v_{3x} \ v_{3y} \ v_{4x} \ v_{4y}]^T$  và  $v_f$  xác định như sau:

$$\mathbf{v}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{l}{d} & -\frac{l}{d} \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & \frac{l}{d} & -\frac{l}{d} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{2y} \end{bmatrix} = W_2 \cdot \mathbf{v}_l \quad (13)$$

Đồng thời:

$$\mathbf{v}_l = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \\ 0 & 1 & d \\ 0 & 1 & -d \end{bmatrix} \boldsymbol{\zeta} = W_1 \cdot \boldsymbol{\zeta} \quad (14)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = RW_1^{-1}\mathbf{v}_l \quad (15)$$

Như vậy, từ giá trị yêu cầu  $\dot{\boldsymbol{\eta}}$  với các thông số hệ thống đã biết ( $R, W_{inv}$ ) ta hoàn toàn có thể tìm được  $\mathbf{V}$  từ đó tìm được các góc quay  $\theta_i$  và  $v_i$  của từng bánh. Ngược lại khi biết  $v_{1x}, v_{1y}, v_{2y}$  thì các thành phần khác của vận tốc dài các bánh được xác định theo (13), khi đó, vận tốc của xe trong hệ tọa độ quán tính được xác định theo (15).

Để thuận tiện cho quá trình điều khiển vận tốc và hướng của từng bánh, các phương trình trên được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2}; \\ v_2 &= \sqrt{v_{1x}^2 + v_{2y}^2}; \\ \theta_1 &= \text{atan}\left(\frac{v_{1y}}{v_{1x}}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

Nếu cho trước  $v_1, v_2$  và  $\theta_1$  với  $|v_2| > |v_1 \cos(\theta_1)|$ , vận tốc và góc hướng của các bánh xe còn lại được xác định như sau.

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_2 &= \text{atan} \frac{\sqrt{v_2^2 - (v_1 \cos(\theta_1))^2}}{v_1 \sin(\theta_1)} \\ v_3 &= \sqrt{(v_1 \cos(\theta_1) + (v_1 \sin(\theta_1) - v_2 \sin(\theta_2)) \frac{l}{d})^2 + (v_2 \sin(\theta_2))^2} \\ \theta_3 &= \text{atan} \frac{v_2 \sin(\theta_2)}{v_1 \cos(\theta_1) + (v_1 \sin(\theta_1) - v_2 \sin(\theta_2)) \frac{l}{d}} \\ v_4 &= \sqrt{(v_1 \cos(\theta_1) + (v_1 \sin(\theta_1) - v_2 \sin(\theta_2)) \frac{l}{d})^2 + (v_1 \sin(\theta_1))^2} \\ \theta_4 &= \text{atan} \frac{v_1 \sin(\theta_1)}{v_1 \cos(\theta_1) + (v_1 \sin(\theta_1) - v_2 \sin(\theta_2)) \frac{l}{d}} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

## 2.2. Điều chỉnh bám quỹ đạo cho robot tự hành 4WD4WS

Để xác định tọa độ của robot trong hệ tọa độ quán tính, sử dụng công thức (15) với giả thiết trong quá trình điều khiển vận tốc và hướng của các bánh xe phụ thuộc được duy trì chính xác theo điều kiện ràng buộc (17), còn vận tốc và hướng của bánh xe số 1 và vận tốc của bánh xe số 2 do được. Như vậy, (14) là phương trình quan sát.

Giả sử robot phải bám theo đường quỹ đạo nhưng vị trí của nó không phụ thuộc vào thời gian. Hệ thống điều khiển bao gồm hai vòng điều khiển, vòng điều khiển dẫn đường xác định góc hướng mong muốn của robot và vòng điều khiển hướng, điều khiển robot bám theo hướng đã được vòng điều khiển dẫn đường xác định. Vận tốc của robot là  $u=v_c, v=0, r$  thay đổi, là biến

điều khiển để cho hướng của robot bám theo hướng mà vòng điều khiển dẫn đường đưa ra. Khi đó, mô hình động học của hệ thống điều khiển bám theo đường của robot car có dạng như sau:

- Vòng dẫn đường:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_b = v_c \sin(\psi) \\ \dot{\phi} = \dot{\psi} = r = \frac{v_c}{d \sin(\theta_1) + l \cos(\theta_1)} \end{array} \right\} \quad (18)$$

Ở đây,  $y_b$  là sai số ngang hay là khoảng cách từ robot car đến đường quỹ đạo;  $\phi$  là góc giữa trục của robot car với đường quỹ đạo. Áp dụng thuật toán ngắm theo điểm đích ảo. Khi đó

$$\phi_d = -atan \frac{y}{b} \quad (19)$$

với  $b$  là tham số đặc trưng của điểm đích ảo.

Khi chọn  $v_c = const$ , vận tốc của bánh xe được xác định như sau:

$$v_1 = \frac{v_c}{\cos(\theta_1)} \quad (20)$$

Như vậy, với ràng buộc vận tốc dài của robot car không đổi, vận tốc dài của các bánh có giới hạn thì góc  $\theta_1$  cũng có giới hạn:

$$\theta_{1max} = \arccos\left(\frac{v_c}{v_{1max}}\right) \quad (21)$$

Giả sử  $|\theta_{1max}| = \pi/4$ .

- Vòng điều khiển góc lái:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\phi} = \dot{\psi} = \frac{v_c}{d \sin(\theta_1) + l \cos(\theta_1)} \\ \dot{\theta}_1 = u_1 \end{array} \right\}, |\theta_{1max}| = \frac{\pi}{4}, \tan(\theta_{1max}) = 1 \quad (22)$$

Với giá trị mong muốn  $\phi_d = -atan \frac{y}{b}$  được xác định từ vòng dẫn đường. Để hệ thống hoạt động ổn định,  $|\dot{\phi}_{dmax}| \leq \frac{2v_c}{(l-d)\sqrt{2}}$ .

$$\text{Đặt } k_{yc} = \frac{2}{(l-d)\sqrt{2}}$$

Tính đạo hàm của  $\phi_d$  trong trường hợp vòng điều khiển góc lái đảm bảo  $\phi = \phi_d$

$$\dot{\phi}_d = \frac{1}{1 + (y/b)^2} * \frac{1}{b} * v_c \sin(\phi_d) = \frac{b^2}{b(b^2 + y^2)} v_c \sin(\phi_d)$$

$$\text{Để } |\dot{\phi}_d| \leq \frac{2v_c}{(l-d)\sqrt{2}} \text{ thì } \frac{b^2}{b(b^2 + y^2)} \sin(\phi_d) \leq k_{yc} \text{ hay } \frac{1}{k_{yc}} b \sin(\phi_d) \leq b^2 + y^2 \quad (23)$$

Điều kiện (22) xảy ra khi  $b \geq \frac{1}{k_{yc}}$ . Để đảm bảo tốc độ tiếp cận đường quỹ đạo chọn  $b = 10 > \frac{1}{k_{yc}} = 0.0707$ , với  $l = 0.3$  m và  $d = 0.2$  m.

Hệ (22) là hệ tích phân kép. Để điều khiển hệ này chọn bộ điều khiển tỷ lệ có hệ số khuếch đại lớn. Tuy nhiên, vì  $\theta_1$  có giới hạn nên viết lại hệ (21) thành hệ bậc nhất điều khiển theo  $\theta_1$ . Giá trị mong muốn của góc  $\theta_1$  được xác định bằng hàm atan để đảm bảo không vượt quá mức  $\pi/4$ :

$$\theta_{1d} = \frac{1}{2} \arctan[\beta(\phi_d - \phi)] \quad (24)$$

Trong đó,  $\beta$  là tham số tùy chọn.

Khi đó, lệnh điều khiển  $u$  được xác định như sau:

$$u_1 = k_u(\theta_{1d} - \theta_1) + \dot{\theta}_{1d} \quad (25)$$

Vì  $u$  cũng bị giới hạn bởi giá trị  $u_{max}$  nên thực chất lệnh điều khiển  $u$  là khâu giới hạn.

Kết hợp thuật toán dẫn đường với thuật toán điều khiển góc lái, nhận được lệnh điều khiển của bánh lái 1:

$$u_1 = k_u \left( \frac{1}{2} \text{atan}[\beta(\phi_d - \phi)] - \theta_1 \right) + \frac{1}{2(1+(\beta(\phi_d - \phi))^2)} \beta(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) \quad (26)$$

Các góc lái khác cũng được điều khiển tương tự theo hệ phương trình dẫn đường như sau:

$$\dot{\phi} = \frac{v_c}{d \sin(\theta_1) + l \cos(\theta_1)} = \frac{v_c}{-d \sin(\theta_2) + l \cos(\theta_2)} = \frac{v_c}{d \sin(\theta_3) + l \cos(\theta_3)} = \frac{v_c}{-d \sin(\theta_4) + l \cos(\theta_4)} \quad (27)$$

Đồng thời các góc hướng của các bánh xe và vận tốc của nó phải đáp ứng ràng buộc (12) với:

$$\begin{cases} v_{1x} = v_c - lr = v_c - l\dot{\phi} \\ v_{1y} = v_c + dr = v_c + d\dot{\phi} \\ v_{2y} = v_c - dr = v_c - d\dot{\phi} \end{cases} \quad (28)$$

### 3. MÔ PHỎNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

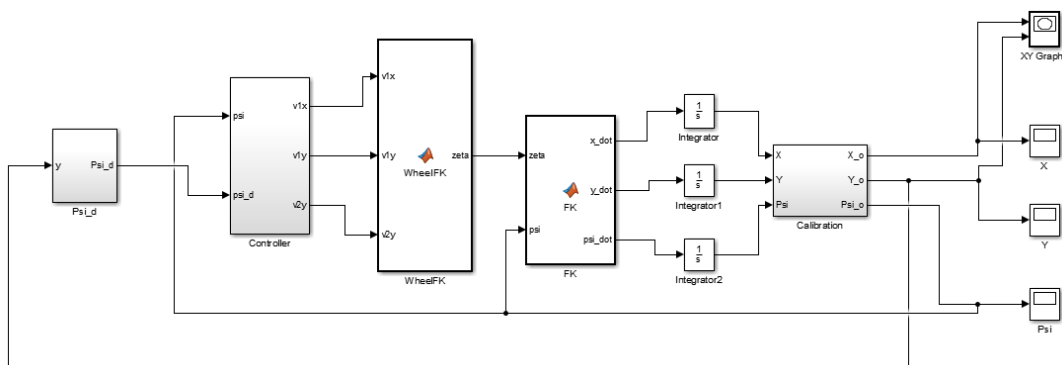
Bài báo chọn mô phỏng cho quỹ đạo thẳng với hướng dịch chuyển trùng với trục X của không gian quán tính với tốc độ  $v_c=2\text{m/s}$ , như vậy, ta có đầu vào như sau:

$$\begin{bmatrix} x_d = 2t \\ y_d = 0 \\ \psi_d = 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Điều kiện ban đầu, robot ở vị trí có tọa độ là

$$\begin{bmatrix} x_0 = 0 \\ y_0 = 10 \\ \psi_0 = 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Sai số vị trí là một hàm ngẫu nhiên được xác định tại điểm checkpoint.



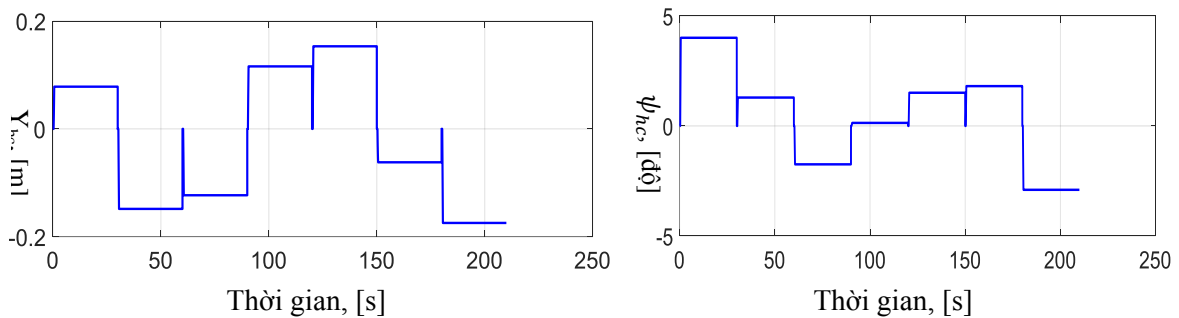
**Hình 4.** Sơ đồ mô phỏng hệ thống điều khiển theo đích ngắm ảo.

Các khối trong mô hình mô phỏng như sau:

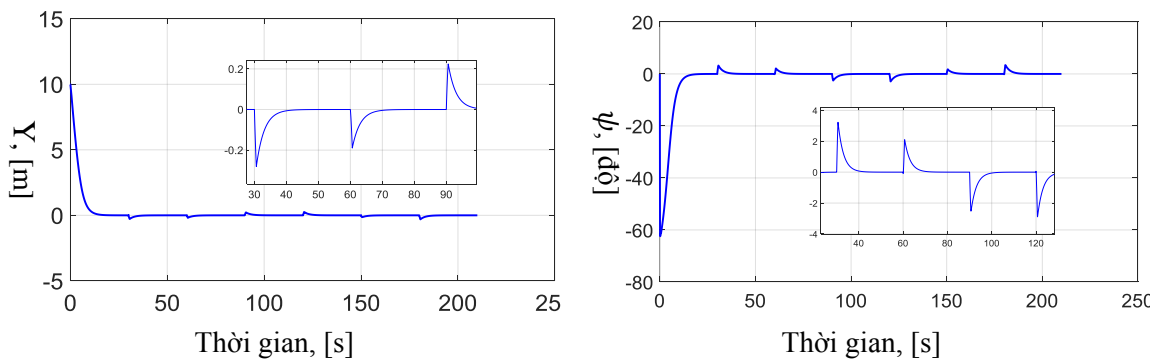
- + Khối 1 Psi\_d: tạo ra góc hướng yêu cầu từ phản hồi độ lệch theo trục y;
- + Khối 2 Controller: tính  $u_1$  từ phương trình (26), tính  $\theta_1$  theo hệ phương trình (22), tính  $\dot{\phi}$  theo (27) và tính  $v_{1x}$ ,  $v_{1y}$ ,  $v_{2y}$  theo (28);
- + Khối 3 WheelFK: tính  $v_f$  theo ràng buộc (13), tính  $v_i$  theo (16), (17), và tính  $\zeta$  theo (14) và (15);
- + Khối 4 FK: tính  $\dot{\eta}$  theo (15);
- + Khối 5 Calibration: giả lập điều chỉnh sai số do nhiễu ngoại sinh sau mỗi khoảng cách dịch

chuyển 60 m. Trong đó, đầu ra sai lệch theo chiều y lại được phản hồi về khối 1, đầu ra góc hướng cũng được phản hồi về khối 2 và khối 4 để thực hiện các bước tính toán. Hình 4 thể hiện sơ đồ hệ thống điều khiển của robot.

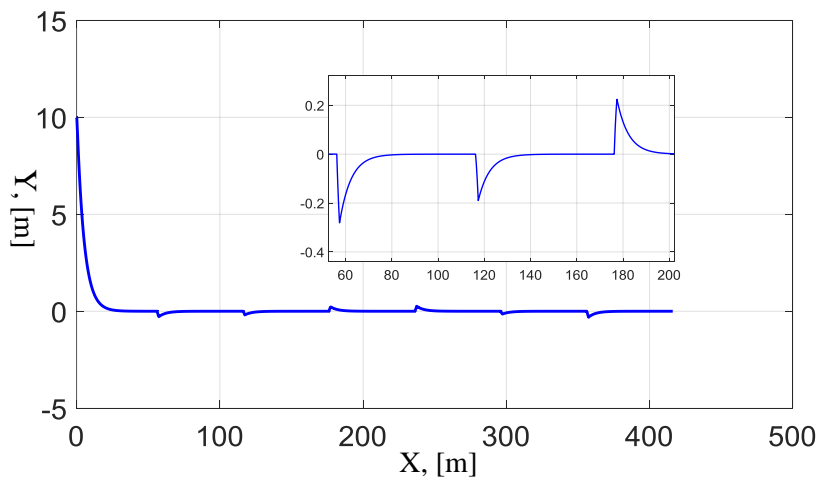
Kết quả thu được thể hiện trong những hình 5, hình 6 và hình 7. Trên hình 5 thể hiện tín hiệu hiệu chỉnh giả lập cho vị trí và hướng của robot. Các tín hiệu hiệu chỉnh này được cộng vào giá trị của vị trí và hướng mà robot ước tính trước đó để trả về giá trị vị trí và hướng thực tế của robot. Thời điểm thực hiện các hiệu chỉnh này là sau mỗi 30 s, với vận tốc không đổi 2 m/s tương ứng với 60 m đường đi của robot. Theo đó, sai lệch về vị trí theo trục Y của robot không vượt quá 0.2 m và sai lệch góc không vượt quá 5 độ phù hợp với thực tế được kiểm chứng sau khi đã áp dụng phương pháp hiệu chỉnh với sai số hệ thống [3].



Hình 5. Tín hiệu hiệu chỉnh giả lập cho vị trí (trục Y) và hướng của robot.



Hình 6. Vị trí (trục Y) và hướng của robot sau hiệu chỉnh.



Hình 7. Vị trí của robot sau hiệu chỉnh.

Hình 6 và hình 7 thể hiện tác động của bộ điều khiển lên quỹ đạo của robot sau mỗi lần hiệu chỉnh, trong đó do không đánh giá sự dịch chuyển của robot dọc theo trục X nên chỉ kiểm tra khả năng lấy lại giá trị thực sau hiệu chỉnh của trục Y và hướng của robot. Nhận thấy rằng, với khoảng cách 60 m một lần hiệu chỉnh thì robot hoàn toàn có thể lấy lại được quỹ đạo yêu cầu trong thời gian ngắn hơn 30 s đáp ứng được quỹ đạo yêu cầu. Hình 7 thể hiện được quỹ đạo của robot trong toàn thời gian mô phỏng, trong đó, các tác động của bộ điều khiển giúp robot lấy lại được quỹ đạo yêu cầu và bám theo đường quỹ đạo là rất rõ ràng.

Kết quả mô phỏng thể hiện rõ khả năng của robot sau hiệu chỉnh lấy lại được quỹ đạo mong muốn trong thời gian ngắn, đáp ứng được yêu cầu bám theo đường quỹ đạo.

#### **4. KẾT LUẬN**

Bài báo đã trình bày một cách ứng dụng thuật toán điều khiển ngầm theo điểm đích ảo khi xem xét bài toán bám quỹ đạo cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS, theo đó, nhiều ngoại sinh có thể được xác định hoàn toàn và được hấp thụ trong thời gian ngắn đảm bảo được đường đi thực tế của robot ít bị sai lệch so với đường đi mong muốn. Trong đó, tốc độ dịch chuyển của robot tự hành được nghiên cứu ở mức 2 m/s cao hơn nhiều so với phần lớn các nghiên cứu trước đây. Với kết quả đó, phương pháp này có thể ứng dụng cho các loại robot tự hành với giá thành thấp mà vẫn đảm bảo được hiệu quả cao khi sử dụng. Kết quả nghiên cứu được chứng minh toán học chặt chẽ và mô phỏng trực quan.

*Lời cảm ơn:* Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của phòng Robot & TĐH linh hoạt, Viện Tự động hóa KTQS trong đề tài mã số ĐTVCN.02.21/TĐHKTQS.

#### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. H. Ye, Y. Chen, and M. Liu, “Tightly coupled 3d lidar inertial odometry and mapping,” in 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2019).
- [2]. Jianhao Jiao, Haoyang Ye, Yilong Zhu, and Ming Liu, “Robust Odometry and Mapping for Multi-LiDAR Systems with Online Extrinsic Calibration”, IEEE Transactions on Robotics, Volume: 38, Issue: 1, (2022).
- [3]. Bei Xuying, Ping Xueliang, Gao Wenyan, “Calibration of Systematic Errors for Wheeled Mobile Robots“, International Journal of Scientific Engineering and Science, Volume 1, Issue 9, pp. 14-16, (2017).
- [4]. Rongrong Wang, Chuan Hu, Zejiang Wang, Fengjun Yan, Nan Chen, “Integrated optimal dynamics control of 4WD4WS electric ground vehicle with tire-road frictional coefficient estimation”, Mechanical Systems and Signal Processing 60-61, pp. 727–741, (2015).
- [5]. Hao Yang, Vincent Cocquempot, and Bin Jiang, “Optimal Fault-Tolerant Path-Tracking Control for 4WS4WD Electric Vehicles”, IEEE transactions on intelligent transportation systems, vol. 11, No. 1, (2010).
- [6]. J. Borenstein and L. Feng, “Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, issue 6, pp. 869-880, (1996).
- [7]. Lê Bá Yên, Chu Văn Hoạt, Lê Văn Tuấn, Vũ Xuân Vượng, “Phương pháp điều hướng xe tự hành AGV dùng cảm biến quán tính và đường dẫn đảo, phục vụ vận chuyển hàng trong các môi trường đặc thù”, Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự, Số Đặc san Hội thảo quốc gia FEE, tr.57-65, (2020).
- [8]. Pizarro, D.; Mazo, M.; Santiso, E.; Marron, M.; Jimenez, D.; Cobrecas, S.; Losada, C. *Localization of Mobile Robots Using Odometry and an External Vision Sensor*. Sensors, 10, 3655-3680, (2010). <https://doi.org/10.3390/s100403655>
- [9]. Adrian Korodi, Toma L. Dragomir, “Correcting Odometry Errors for Mobile Robots Using Image Processing”, Proceedings of The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, pp1040-1045, (2010).

**ABSTRACT**

**Path following calibration for four-wheel-drive/four-wheel-steer mobile robot (4WD4WS) by reference objects**

*In this paper, a method of applying the virtual target targeting algorithm to control the four-wheel-drive/four-wheel-steer mobile robot (4WD4WS) to follow the trajectory, based on information about the actual position of the robot by reference objects along the trajectory is presented. The kinematic of four-wheel-drive/four-wheel-steer mobile robot were also studied in detail, ensuring the system's stability when operating with speed and direction constraints for each wheel. The process of synthesizing control laws is strictly mathematically guaranteed. The simulation in Matlab shows the research results visually.*

**Keywords:** Mobile robot; Path following; Four-wheel-drive/four-wheel-steer; 4WD4WS.