

MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN BẮM QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG SỬ DỤNG CƠ CẤU LÁI VỚI 3 BÁNH XE ĐA HƯỚNG

MATHEMATICAL MODEL AND TRAJECTORY TRACKING CONTROL DESIGN FOR MOBILE ROBOTS USING A DRIVE MECHANISM WITH 3 OMNIDIRECTIONAL WHEELS

PHẠM ĐÌNH BÁ*, PHAN VĂN DƯƠNG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: bapd.vck@vamaru.edu.vn

Tóm tắt

Trong nghiên cứu này, chúng tôi giới thiệu cơ chế dẫn động ba bánh đa hướng (3OWDM) cho robot di động đa hướng. Cấu trúc và cách điều hướng chuyển động của robot 3OWDM với ba bánh xe đa hướng được trình bày. Mô hình toán học được thiết lập để mô tả chuyển động của robot. Một hệ thống điều khiển được đề xuất để điều khiển chuyển động của robot trên sàn. Kết quả mô phỏng số chứng minh khả năng của 3OWDM. Một số hình ảnh thí nghiệm cũng được thể hiện để minh chứng đáp ứng điều khiển của robot.

Từ khóa: Bánh xe đa hướng, Mô hình động học, Mô hình động lực học, Robot chuyển động đa hướng, điều khiển bám quỹ đạo.

Abstract

In this study, we propose a three-omnidirectional-wheel drive mechanism (3OWDM) for an omnidirectional mobile robot. The structure and way of navigating the robot motion of the 3OWDM with the three omnidirectional wheels are presented. A mathematical model is established to describe the robot's motion. A control system is proposed to control the motion of the robot on the floor. Simulation results demonstrate the capabilities of 3OWDM. Some experimental images are also shown to demonstrate the control response of the robot.

Keywords: Omnidirectional wheel, Kinematic model, Dynamic model, Tracking trajectory control.

1. Giới thiệu chung

Robot di chuyển đa hướng là một loại robot có thể di chuyển đồng thời chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay [1]. Khác với những robot [2] sử dụng những bánh xe thông thường không thể di chuyển theo hướng khác khi cơ cấu lái chưa đổi hướng. Bằng việc khai thác robot di động đa hướng [3, 4], nó làm tăng tính cơ động trong môi trường di chuyển nhất là trong những khu vực hẹp ví dụ như khu vực với đông người,

hay những khu vực kín và khó di chuyển. Robot di động đa hướng đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi bởi khả năng cơ động [5, 6]. Tính cơ động này là được tạo lên bởi các bánh xe đa hướng. Các bánh xe đa hướng này được cấu thành từ các con lăn. Như vậy, các con lăn sẽ chuyển động một cách riêng lẻ so với chuyển động của bánh xe. Điều này tạo ra tính cơ động cao so với bánh xe truyền thống khác.

Trong hệ thống robot, điều khiển bám quỹ đạo là một chủ đề nóng. Một số lượng lớn các phương pháp tiếp cận để thực hiện việc kiểm soát bám quỹ đạo đã được đưa ra trong các báo cáo [7-9]. Trong quá trình điều khiển bám quỹ đạo, sai số của quỹ đạo và tín hiệu phản hồi được sử dụng để bộ điều khiển đưa ra tín hiệu điều khiển phù hợp.

Robot sử dụng trong nghiên cứu này là một robot di động sử dụng một cơ cấu lái với ba bánh xe đa hướng (3OWDM). Robot có thể được điều khiển để bám quỹ đạo cho trước thông qua bộ điều khiển PID.

Những nội dung chính của nghiên cứu này được liệt kê như sau. Xây dựng mô hình toán của 3OWDM; Bộ điều khiển PID được khai thác để điều khiển bám quỹ đạo của 3OWDM. Dựa trên phương pháp Ziegler-Nichols 2 các thông số của bộ điều khiển được thiết lập. Sau đó, hệ thống điều khiển vòng kín được mô phỏng trong môi trường MATLAB/ Simulink để đánh giá đáp ứng của bộ điều khiển. Từ kết quả mô phỏng cho thấy 3OWDM có thể bám quỹ đạo. Một số hình ảnh thí nghiệm cũng được thể hiện để minh chứng đáp ứng điều khiển của robot.

2. Phương thức di chuyển của cơ cấu lái ba bánh xe đa hướng

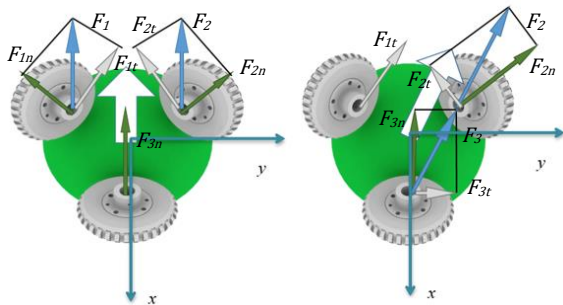
Trong phần này chúng tôi giới thiệu cách thức mà 3OWDM di chuyển. Như đã đề cập ở trên, Robot 3OWDM có cấu trúc bao gồm một thân và một cơ cấu lái gồm 3 bánh xe đa hướng đặt đều nhau một góc 120° .

Trong chuyển động tịnh tiến trên mặt sàn chuyển động của ba bánh được phối hợp như trong Hình 1 để tạo ra chuyển động tịnh tiến theo trục x (Hình 1(a)) và chuyển động tịnh tiến theo trục y (Hình 1(b)). Trong khi đó để tạo ra chuyển động quay cho robot quanh trục thẳng đứng, các bánh xe đa hướng quay cùng tốc độ và cùng chiều quay như mô tả trong Hình 2. Chiều quay của các bánh xe thay đổi sẽ thay đổi được chiều quay của robot.

3. Mô hình toán của 3OWDM

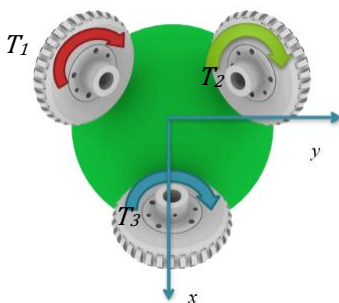
3.1. Mô hình động học

Hình 3 thể hiện bản vẽ phác thảo 3OWDM, trong đó m là khối lượng của robot, r là bán kính của bánh xe đa hướng, L là khoảng cách từ tâm robot đến tâm bánh xe. $\xi = [x \ y \ \theta]^T$ véc tơ vị trí của robot trong hệ trục tọa độ quán tính OXY , trong đó x và y tương ứng là vị trí của điểm P trong hệ trục quán tính OXY ; θ là góc quay quanh trục thẳng đứng. $\xi_r = [v \ v_n \ w]^T$ là véc tơ vận tốc trong hệ trục tọa độ của robot, nó mô tả vận tốc tuyến tính của robot tại điểm P , trong đó, v và v_n là các thành phần vận tốc vuông góc, và w là vận tốc góc của thân robot.



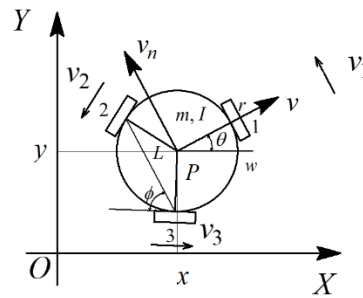
(a) Di chuyển theo trục x . (b) Di chuyển theo trục y .
 (F_i là lực tổng hợp tại mỗi bánh từ thành phần pháp F_{in} và tiếp tuyến F_{it})

Hình 1. Chuyển động tịnh tiến

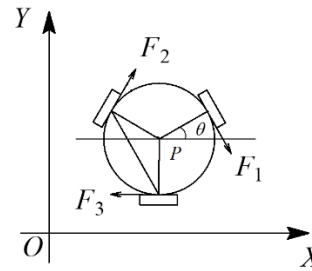


(T_1, T_2, T_3 là mô men trên các bánh xe đa hướng)

Hình 2. Chuyển động quay



Hình 3. Phác thảo 3OWDM



Hình 4. Lực tổng hợp trên các bánh xe đa hướng
Động học nghịch của robot

Bài toán động học nghịch là thể hiện mối quan hệ giữa véc tơ vận tốc của các bánh vào véc tơ vận tốc của robot trong hệ trục tọa độ quán tính. Từ Hình 3, mối liên hệ giữa tốc độ của robot trong hệ trục quán tính và tốc độ của robot trong hệ trục tọa độ gắn trên robot là:

$$\dot{x} = v \cos \theta - v_n \sin \theta, \quad (1)$$

$$\dot{y} = v \sin \theta + v_n \cos \theta, \quad (2)$$

và vận tốc góc của robot:

$$\omega = \dot{\theta}. \quad (3)$$

Viết lại các phương trình từ (1) tới (3) dạng ma trận như sau:

$$\dot{\xi} = \mathbf{R}^T \dot{\xi}_r, \quad (4)$$

trong đó \mathbf{R} là ma trận chuyển và được xác định như

$$\text{sau: } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Trong hệ trục tọa độ của robot, mối quan hệ về vận tốc của robot và vận tốc của các bánh, v_i , với $i = 1, 2, 3$, là [1].

$$[v_1 \ v_2 \ v_3]^T = \mathbf{H} \dot{\xi}_r, \quad (5)$$

$$\text{trong đó } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & L \\ -\sin \phi & -\cos \phi & L \\ \sin \phi & -\cos \phi & L \end{bmatrix}.$$

Từ (4) và (5), mối quan hệ giữa vận tốc bánh và vận tốc của 3OWDM là

$$[v_1 \ v_2 \ v_3]^T = \mathbf{H} \mathbf{R}^T \dot{\xi}, \quad (6)$$

trong đó $\mathbf{HR} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & L \\ \sin(\theta - \phi) & -\cos(\theta - \phi) & L \\ \sin(\theta + \phi) & -\cos(\theta + \phi) & L \end{bmatrix}$.

Động học thuận của robot

Để dự báo được chuyển động của 3OWDM, động học thuận của robot là được sử dụng. Động học thuận thể hiện mối quan hệ của vận tốc robot trong hệ trục tọa độ quán tính (OXY) vào vận tốc của các bánh xe đa hướng. Sự biến đổi từ vận tốc tịnh tiến của ba bánh xe đa hướng (v_i , với $i = 1, 2, 3$) sang vận tốc của 3OWDM.

$$\dot{\xi}_r = \mathbf{H}^{-1} [v_1 \ v_2 \ v_3]^T. \quad (7)$$

Vận tốc trong tọa độ của 3OWDM được chuyển sang tọa độ quán tính như sau:

$$\dot{\xi} = \mathbf{R}^{-1} \dot{\xi}_r. \quad (8)$$

Từ công thức (7) và (8), chúng ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^{-1} [v_1 \ v_2 \ v_3]^T \\ &= r \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^{-1} [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T \end{aligned} \quad (9)$$

trong đó ω_i ($i = 1, 2, 3$) là vận tốc góc của bánh i và

$$\mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}^{-1} =$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\left(\frac{\pi}{6} + \theta\right) & \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \\ \cos\theta & -\cos\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) & -\cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \\ \frac{1}{2L} & \frac{1}{2L} & \frac{1}{2L} \end{bmatrix}$$

3.2. Động lực học của robot

Trong trường hợp lăn thuần túy giữa mỗi bánh xe và mặt sàn, tổng mô-men ngoại lực của 3OWDM được tạo ra bởi ba bánh xe đa hướng (xem Hình 4):

$$I\ddot{\theta} = (F_1 + F_2 + F_3)L, \quad (10)$$

trong đó F_i ($i = 1, 2, 3$) là lực tổng hợp tác dụng lên bánh xe đa hướng thứ i (bao gồm lực do mô tơ sinh ra, lực ma sát, và lực quán tính).

Bằng việc áp dụng định luật II Newton, phương trình động lực học của robot được xác định như sau:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_1 \cos\theta - F_2 \cos(\theta - \phi) - F_3 \cos(\theta + \phi) \\ m\ddot{y} = -F_1 \sin\theta + F_2 \sin(\theta - \phi) + F_3 \sin(\theta + \phi) \end{cases} \quad (11)$$

Sau đó các phương trình động lực học được viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_\theta \end{bmatrix} = \mathbf{u}, \quad (12)$$

trong đó I làm mô men quán tính khối lượng của robot quanh trục thẳng đứng, \mathbf{u} tín hiệu điều khiển được xác định thông qua lực tổng hợp F_i ($i = 1, 2, 3$).

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\cos(\theta - \phi) & -\cos(\theta + \phi) \\ -\sin\theta & \sin(\theta - \phi) & \sin(\theta + \phi) \\ L & L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}$$

4. Thiết kế bộ điều khiển

Bộ điều khiển PID đã được sử dụng rộng rãi trong rất nhiều lĩnh vực khác nhau bởi vì tính đơn giản và hiệu quả cao của bộ điều khiển này. Trong nghiên cứu này, chúng tôi khai thác bộ điều khiển PID cho 3OWDM để bám quỹ đạo. Hình 5 thể hiện sơ đồ của bộ điều khiển PID. Biểu thức của bộ điều khiển PID được mô tả như sau:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_i \int_0^t \mathbf{e}(\tau) d\tau + \mathbf{K}_d \frac{d\mathbf{e}(t)}{dt}, \quad (13)$$

trong đó $\mathbf{K}_p = \text{diag}(k_{px}, k_{py}, k_{p\theta})$, $\mathbf{K}_d = \text{diag}(k_{dx}, k_{dy}, k_{d\theta})$, và $\mathbf{K}_i = \text{diag}(k_{ix}, k_{iy}, k_{i\theta})$ là các thông số của bộ điều khiển, $\mathbf{e}(t)$ là sai số và được định nghĩa như sau:

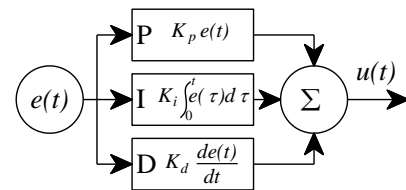
$$\mathbf{e}(t) = \xi_d(t) - \xi(t), \quad (14)$$

trong đó $\xi_d(t) = [x_d \ y_d \ \theta_d]^T$ với x_d, y_d là vị trí tham khảo theo trục OX và OY, θ_d là góc quay tham khảo.

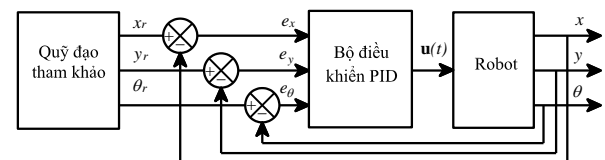
5. Kết quả mô phỏng số

Mô phỏng được thực hiện cho robot như thể hiện trong Hình 6 với các thông số như sau: $L = 180\text{mm}$, $r = 50\text{mm}$, $m = 5\text{kg}$, và $I = 0,16\text{kgm}^2$. Các thí nghiệm mô phỏng thực hiện trên MATLAB/ Simulink với khoảng thời gian lấy mẫu $T_s = 0,01\text{s}$.

Mô phỏng sẽ được thực hiện thông qua hai thí nghiệm. Thí nghiệm thứ nhất thể hiện khả năng bám quỹ đạo tròn, trong khi đó thí nghiệm thứ hai mô tả khả năng bám quỹ đạo cong bất kỳ.

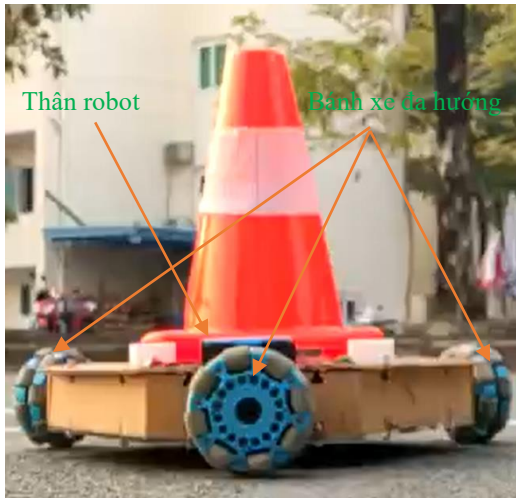


(a) Cấu trúc của bộ điều khiển PID



(b) Sơ đồ điều khiển của bài toán bám quỹ đạo

Hình 5. Sơ đồ hệ thống điều khiển cho bài toán bám quỹ đạo



Hình 6. Mô hình robot sử dụng cơ cấu lái với ba bánh xe đa hướng

Trước khi tiến hành mô phỏng số cho robot, các thông số của bộ điều khiển cần được thiết lập. Công việc này được thực hiện và trình bày trong mục 4.1.

5.1. Thiết lập các thông số của bộ điều khiển PID bằng phương pháp Ziegler-Nichols

Từ phương trình (13), lắp biến đổi Laplace với các điều kiện ban đầu đều bằng không cho từng chuyển động theo phương $OX, OY, (x(0) = y(0) = \dot{x}(0) = \dot{y}(0) = 0)$ và quay quanh trục thẳng đứng ($\theta(0) = \dot{\theta}(0) = 0$) của robot lần lượt như sau:

$$\begin{cases} \frac{X}{U_x} = \frac{Y}{U_y} = \frac{1}{ms^2} \\ \frac{\theta}{U_\theta} = \frac{1}{Is^2} \end{cases}, \quad (15)$$

trong đó X, Y, θ là biến đổi Laplace của x, y và θ ; U_x, U_y , và U_θ là biên đổi Laplace của tín hiệu điều khiển.

Từ (15) cho thấy rằng đối tượng điều khiển có dạng hàm truyền:

$$G(s) = \frac{1}{As^2}, \quad (16)$$

trong đó $A = m$ hoặc $A = I$.

Tiếp tục, lấy biến đổi Laplace cho bộ điều khiển PID (13) và biến đổi dưới dạng sau:

$$G_{ci}(s) = k_{pj} \left(1 + \frac{1}{T_{ij}s} + T_{aj}s \right), j = x, y, \theta \quad (17)$$

trong đó $k_{ij} = k_{pj}/T_{ij}$ và $k_{aj} = k_{pj}T_{aj}$.

Sử dụng phương pháp Ziegler-Nichol thứ 2 và tiêu chuẩn ổn định đại số [10] để hệ thống vòng kín ổn định cho phép xác định các thông số của hệ thống điều khiển. Các thông số của bộ điều khiển như sau:

$$\mathbf{K}_p = \text{diag}(20, 20, 10), \quad \mathbf{K}_d = \text{diag}(5, 5, 3), \quad \text{và} \quad \mathbf{K}_i = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.05).$$

Bước tiếp theo là kiểm tra lại tính ổn định của hệ thống dựa vào kết quả của các hệ số k_p, k_d và k_i của bộ điều khiển đã được thiết lập ở trên.

Sau các bước biến đổi, tính toán hàm truyền, với hệ thống điều khiển vòng kín vị trí (theo phương x và phương y) có hàm truyền hệ đóng, G_{xyd} , là:

$$G_{xyd} = \frac{5s^2 + 20s + 0.1}{5s^3 + 5s^2 + 20s + 0.1} \quad (18)$$

Xác định các điểm cực của (18) như sau:

$$\begin{aligned} s_1 &= -0.4975 + 1.9359i, \\ s_2 &= -0.4975 - 1.9359i, \\ s_3 &= -0.0050 + 0.0000i. \end{aligned}$$

Kết quả này cho thấy tất cả các điểm cực trên đều nằm bên trái mặt phẳng phức.

Cuối cùng chuyển sang hệ thống điều khiển vòng kín với hệ thống điều khiển góc quay quanh trục thẳng đứng của robot, hàm truyền đóng $G_{\theta d}$ là

$$G_{\theta d} = \frac{30s^2 + 1000s + 5}{16s^3 + 30s^2 + 1000s + 5} \quad (19)$$

Xác định các điểm cực của (19) như sau:

$$\begin{aligned} s_1 &= -0.9350 + 7.8496i, \\ s_2 &= -0.9350 - 7.8496i, \\ s_3 &= -0.0050 + 0.0000i. \end{aligned}$$

Kết quả này cho thấy các điểm cực trên đều nằm bên trái của mặt phẳng phức.

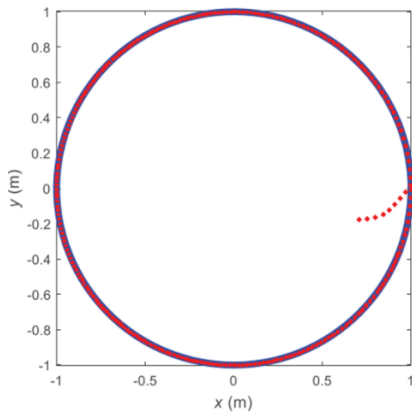
Như vậy, tất cả các điểm cực của hệ thống kín đều nằm bên trái của mặt phẳng phức, do đó hệ thống điều khiển vòng kín với bộ điều khiển PID là ổn định được tất cả các thông số của robot [10].

5.2. Điều khiển bám quỹ đạo hình tròn

Trong thí nghiệm này, quỹ đạo mong đợi $\xi_d = [x_d \ y_d \ \theta_d]^T$ yêu cầu 3OWDM bám theo có dạng:

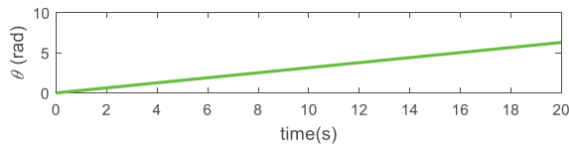
$$\begin{cases} x_d = 0.5 \cos\left(\frac{2\pi}{20}t\right), m \\ y_d = 0.5 \sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right), m \\ \theta_d = 0.315t, rad \end{cases} \quad (20)$$

Đáp ứng điều khiển được thể hiện trong các Hình 7, 8. Vị trí của robot bám quỹ đạo như mô tả trong Hình 7. Sai số giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo mong đợi là khá nhỏ và đường cong sai số này được thể hiện như trong Hình 9. Ngoài ra, hướng của robot cũng được kiểm soát và đáp ứng về hướng của robot được thể hiện trong Hình 8 trong khi đó đường cong sai số giữa hướng thực tế và hướng mong đợi như mô tả trong Hình 9.

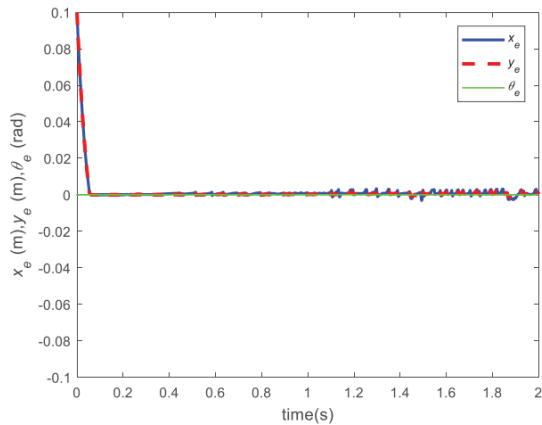


(đường màu đỏ chấm mô tả quỹ đạo thực tế của robot; đường màu xanh liền là quỹ đạo mong đợi)

Hình 7. Điều khiển bám quỹ đạo tròn



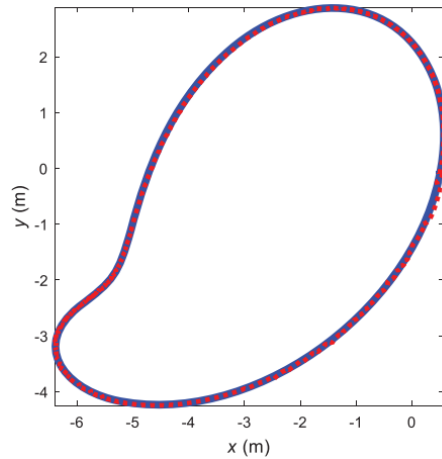
Hình 8. Hướng của robot trong điều khiển bám quỹ đạo tròn



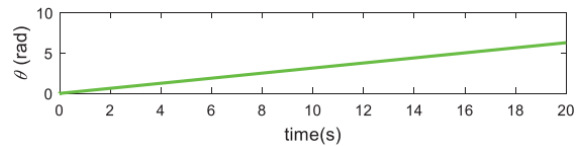
Hình 9. Sai số vị trí và hướng trong điều khiển bám quỹ đạo tròn

5.3. Điều khiển bám quỹ đạo cong bất kỳ

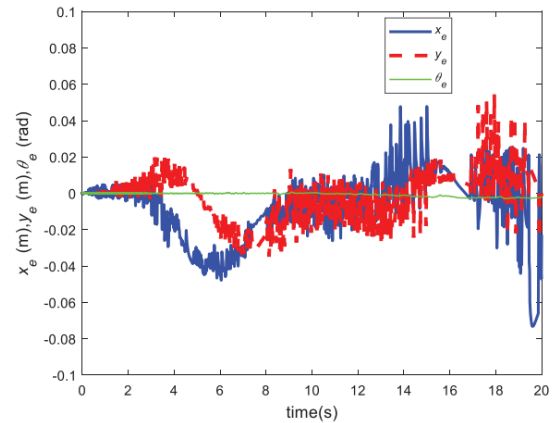
Trong thí nghiệm thứ hai, chúng tôi đưa ra một quỹ đạo cong như thể hiện (màu tím than) trong Hình 10 với thời gian di chuyển bằng 20 giây. Còn hướng mong đợi của robot là như trong thí nghiệm thứ nhất. Quỹ đạo tham khảo trong Hình 10 được đưa ra theo thứ tự các điểm (x_i, y_i) với đơn vị là mét như sau: (0,583; 0,811), (0; 2,291), (-0,960; 2,841), (-2,085; 2,807), (-3,396; 2,08), (-4,365; 0,899), (-4,787; 0), (-5,096; -0,917), (-6,276; -2,699), (-5,694; -4,133), (-2,605; -3,818), (-0,39; -2,031), (0; -1,477), (0,332; -0,718).



Hình 10. Điều khiển bám quỹ đạo bất kỳ



Hình 11. Hướng của robot trong điều khiển bám quỹ đạo bất kỳ



Hình 12. Sai số vị trí và hướng trong điều khiển bám quỹ đạo bất kỳ

Kết quả thí nghiệm được mô tả trong các Hình từ 10 đến 12. Hình 10 thể hiện quỹ đạo của robot. Hướng của robot thể hiện trong Hình 11.

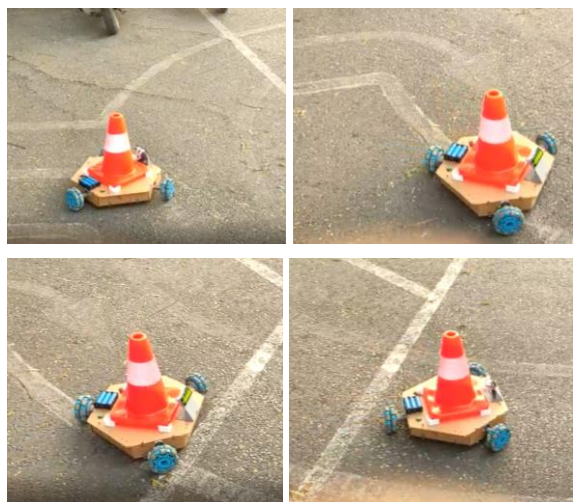
Từ kết quả sai số trong Hình 12 cho thấy sai số lớn nhất theo phương x và y tương ứng khoảng 7cm và 5cm.

6. Một số hình ảnh thí nghiệm chuyển động của 3OWDM

Ngữ cảnh thí nghiệm như mô tả trong Hình 13. Cho phép 3OWDM di chuyển dọc theo đường hình số 8 (đường hình số 8 như trong thí nghiệm lái xe máy). 3OWDM xuất phát từ vị trí vào hình số 8 sau đó bám theo quỹ đạo cong của hình số 8 để thực hiện chuyển

động. Quá trình bám quỹ đạo này, 3OWDM thực hiện cả ba chuyển động (bao gồm chuyển động theo phương x , y , và quay quanh trục thẳng đứng). Chi tiết về khả năng quay và di chuyển của 3OWDM bám theo một quỹ đạo hình số 8 được thể hiện trong video với đường link:

<https://www.youtube.com/watch?v=ilPtFAB3fQE>



Hình 13. Hình ảnh phần cứng và thí nghiệm với 3OWDM

7. Kết luận và kiến nghị

Phân tích mô hình toán học chuyển động của một robot di động sử dụng ba bánh xe đa hướng đã được đưa ra trong nghiên cứu này. Chuyển động của 3OWDM bao gồm hai chuyển động tịnh tiến dọc theo các phương x và y , và chuyển động quay quanh trục thẳng đứng. Bộ điều khiển PID được thiết kế để giải quyết bài toán bám quỹ đạo của robot, nó cho phép robot bám được quỹ đạo và hướng cho trước. Mô phỏng đã được thực hiện để minh chứng khả năng của bộ điều khiển trong việc giải quyết bài toán bám quỹ đạo. Các hình ảnh phần cứng và thực nghiệm thể hiện khả năng di chuyển đa hướng của robot.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT21-22.37.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H. Kim, and B. K. Kim, *Online Minimum-Energy Trajectory Planning and Control on a Straight-Line Path for Three-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.61, No.9, pp.4771-4779, 2014.

- [2] R. Tomorrow, *How Kiva system and warehouse Management system interact*, <https://www.roboticstomorrow.com/article/2011/12/how-kiva-systems-and-warehouse-management-systems-interact/23/>, 2011.
- [3] L. Yuan Ping, T. Zielinska, M. H. Ang *et al.*, *Wheel-ground interaction modelling and torque distribution for a redundant mobile robot*. pp. 3362-3367, 2006.
- [4] E. C. Orozco-Magdaleno, F. Gómez-Bravo, E. Castillo-Castañeda *et al.*, *Evaluation of Locomotion Performances for a Mecanum-Wheeled Hybrid Hexapod Robot*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.26, No.3, pp. 1657-1667, 2021.
- [5] D. Rotondo, V. Puig, F. Nejjari *et al.*, *A Fault-Hiding Approach for the Switching Quasi-LPV Fault-Tolerant Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.62, No.6, pp.3932-3944, 2015.
- [6] F. E. Udwardia, and R. E. Kalaba, *Explicit Equations of Motion for Mechanical Systems With Nonideal Constraints*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 68, No.3, pp.462-467, 2000.
- [7] F. Dong, D. Jin, X. Zhao *et al.*, *Adaptive Robust Constraint Following Control for Omnidirectional Mobile Robot: An Indirect Approach*, IEEE Access, Vol.9, pp.8877-8887, 2021.
- [8] J. H. Lee, C. Lin, H. Lim *et al.*, *Sliding mode control for trajectory tracking of mobile robot in the RFID sensor space*, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.7, No.3, pp.429-435, 2009/06/01, 2009.
- [9] Y. Yi, F. Mengyin, S. Changsheng *et al.*, *Control Law Design of Mobile Robot Trajectory Tracking and Development of Simulation Platform*. pp.198-202, 2007.
- [10] Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed.: Pearson India, 2015.

Ngày nhận bài:	03/12/2021
Ngày nhận bản sửa lần 01:	28/12/2021
Ngày nhận bản sửa lần 02:	04/01/2022
Ngày duyệt đăng:	14/01/2022