

Khảo sát tham số trong cấu hình động học của robot bốn bánh và sáu bánh lái trượt ảnh hưởng đến hiệu suất quay tại chỗ

Quách Xuân Nam, Đặng Nam Kiên*, Lê Đức Anh

Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 89B Lý Nam Đế, Cửa Đông, Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: dangnamkien@gmail.com

Nhận bài: 18/01/2024; Hoàn thiện: 06/3/2024; Chấp nhận đăng: 14/3/2024; Xuất bản: 01/4/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.CAPITI.2024.34-40>

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu mô hình động học của xe robot bốn bánh và sáu bánh lái trượt (SSMR), trong đó, tập trung vào chế độ quay tại chỗ (bán kính quay bằng không). Từ đó khảo sát ảnh hưởng của một số tham số trong cấu hình động học của robot đến hiệu suất quay tại chỗ khi không thay đổi động cơ truyền động của robot. Sau đó đưa ra được lựa chọn tối ưu các tham số này để nâng cao hiệu suất quay tại chỗ. Kết quả nghiên cứu được mô phỏng minh chứng trên MATLAB.

Từ khóa: Robot di động; Robot bốn bánh lái trượt; Mô hình động lực học; Quay tại chỗ.

1. MỞ ĐẦU

Trong những năm gần đây, việc sử dụng robot di động đã chứng kiến sự gia tăng đáng kể, trải rộng trên nhiều lĩnh vực khác nhau như tự động hóa công nghiệp, giám sát và thăm dò. Trong số các loại robot di động, nền tảng lái trượt đã nổi lên như một giải pháp linh hoạt và cơ động, mang lại sự linh hoạt trong việc điều hướng trong các môi trường phức tạp [1]. Động học độc đáo của robot lái trượt, được đặc trưng bởi bộ truyền động vi sai và điều khiển động cơ độc lập ở mỗi bên, tạo cơ sở cho khả năng thích ứng động nhưng cũng đặt ra thách thức trong việc tối ưu hóa hiệu suất của chúng. Có nhiều nghiên cứu đưa ra ảnh hưởng của các thông số động học như chiều dài cơ sở, chiều rộng vệt bánh xe đến khả năng di chuyển linh hoạt cũng như khả năng ổn định của xe robot [2]. Tuy nhiên, rất hiếm nghiên cứu đi sâu vào phân tích ảnh hưởng của tỉ lệ chiều dài cơ sở xe trên chiều rộng vệt bánh xe đến hiệu suất quay của xe robot. Việc phân tích tỉ lệ này rất có ý nghĩa khi tiến hành thiết kế động học xe robot lái trượt. Tùy vào không gian làm việc, yêu cầu về mức độ linh hoạt, không gian bán kính góc quay, hiệu suất quay, khả năng điều khiển của xe, các kích thước này sẽ được tính toán lựa chọn cụ thể. Bài báo tập trung vào khảo sát ảnh hưởng tỉ lệ chiều dài cơ sở xe trên chiều rộng vệt bánh xe đến hiệu suất quay tại chỗ của xe, làm cơ sở tham khảo thiết kế. Ngoài ra, bài báo cũng khảo sát đối với trường hợp xe robot sáu bánh lái trượt để so sánh hiệu suất quay giữa hai loại xe.

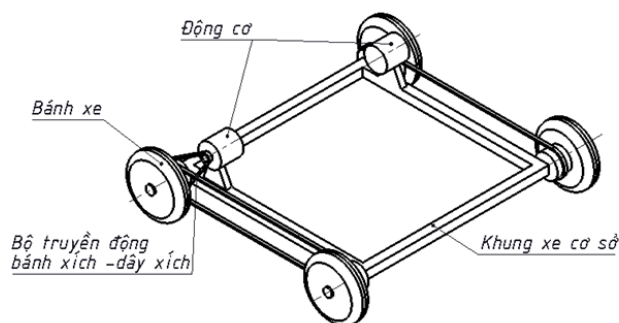
Robot lái trượt có thể điều hướng sang trái hoặc sang phải là do lực trượt được tạo ra giữa bề mặt lốp xe và mặt nền. Các lực do trượt theo phương ngang và phương dọc đặc trưng bởi hệ số ma sát trượt giữa bề mặt lốp xe và mặt nền theo phương ngang (μ_N) và theo phương dọc (μ_D). Các nghiên cứu thường xem xét trường hợp chung khi đặt hai hệ số ma sát này bằng nhau ($\mu_N = \mu_D$) [3], điều này chưa phản ánh hết sự ảnh hưởng khác nhau của chúng lên hiệu suất quay của robot. Do đó, bài báo tiến hành khảo sát ảnh hưởng của tỉ lệ hệ số ma sát trượt theo phương ngang và phương dọc (μ_N/μ_D) đến hiệu suất quay tại chỗ của xe robot bốn bánh lái trượt. Các khảo sát sẽ được thực hiện trên mô hình động học của robot bốn bánh lái trượt và sáu bánh lái trượt.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

2.1. Mô hình động học của robot bốn bánh lái trượt

Sơ đồ cơ bản của xe robot bốn bánh lái trượt được trình bày trên hình 1. Khung xe có dạng khung thép hình chữ nhật. Hai dây bánh dẫn động bên trái và bên phải được liên kết tương ứng với hai động cơ điện thông qua hệ truyền động dây xích – bánh xích. Xe có thể điều hướng được do

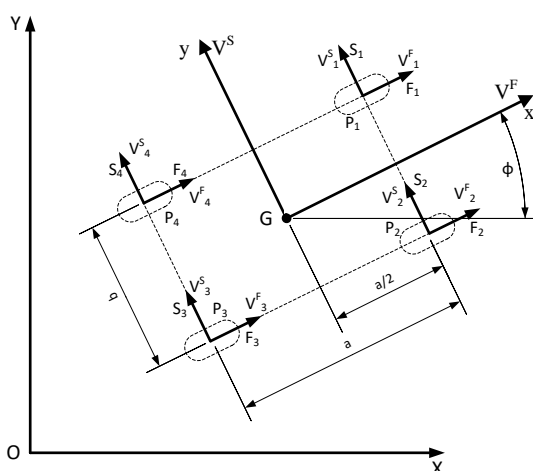
chuyển động của hai dây bánh xe độc lập với nhau.



Hình 1. Sơ đồ cơ bản xe robot bốn bánh lái trượt.

Hình 2 trình bày sơ đồ lực tác dụng lên xe robot bốn bánh lái trượt. Để thiết lập mô hình động học của xe robot bốn bánh, các giả thiết được đưa ra như sau:

- Xe robot chỉ hoạt động trên mặt nền phẳng nằm ngang, các bánh xe tiếp xúc với nền tại một điểm.



Hình 2. Sơ đồ lực tác dụng lên xe robot bốn bánh lái trượt.

- Xe có dạng đối xứng, trọng tâm G của xe nằm trùng với tâm đối xứng hình học và không thay đổi trong quá trình xe di chuyển.

- Ngoại lực đáng kể tác dụng lên xe là lực do bánh xe trượt trên mặt sàn (Lực F_i theo phương dọc và lực S_i theo phương ngang) gây ra. Các lực này tuân theo mô hình lực ma sát Coulumb [4].

Vị trí của xe so với hệ quy chiếu quán tính OXY được xác định bởi tọa độ x, y và góc di chuyển φ . Phương trình Newton- Euler cho hệ vật dưới tác dụng của các lực (F_i, S_i) như sau [5]:

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x} &= \sum_{i=1}^4 F_i \cos \varphi - \sum_{i=1}^4 S_i \sin \varphi \\
 M\ddot{y} &= \sum_{i=1}^4 F_i \sin \varphi + \sum_{i=1}^4 S_i \cos \varphi
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$J\ddot{\varphi} = (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \frac{b}{2} + (S_1 + S_2 - S_3 - S_4) \frac{a}{2}$$

Trong đó, a là chiều dài cơ sở; b là chiều rộng vệt bánh xe của xe robot;

Các lực F_i , S_i tuân theo mô hình lực ma sát Coulumb, trong đó, F_i là lực gây ra chuyển động còn S_i là lực cản chuyển động, phương trình mô tả các lực này như sau [5]:

$$\begin{aligned} F_i &= F_{i_max} \cdot \text{sign}(r\omega_i - v_i^F) \\ S_i &= S_{i_max} \cdot \text{sign}(-v_i^S) \end{aligned} \quad (2)$$

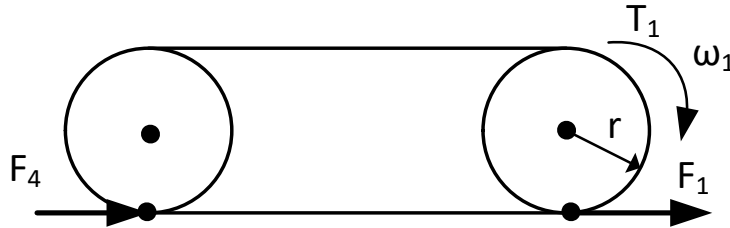
Trong đó, F_{i_max} và S_{i_max} tương ứng là các lực ma sát nghỉ cực đại theo phương dọc và phương ngang [7]:

$$\begin{aligned} F_{i_max} &= \mu_D \cdot M \cdot g / 4 \\ S_{i_max} &= \mu_N \cdot M \cdot g / 4 \end{aligned} \quad (3)$$

Ở đây, M là tổng khối lượng của xe; μ_D và μ_N lần lượt là hệ số ma sát trượt của bánh xe trên mặt nền theo phương dọc và phương ngang. Trong đó, giả định rằng các giá trị T_i lớn hơn giá trị tối thiểu:

$$|T_i| \geq r|F_1 + F_4| = r \cdot \mu_D \cdot M \cdot g / 2 \quad (4)$$

Để xác định dấu của các lực F_i , ta xét chuyển động quay của mỗi dây bánh xe. Từ hình 3 ta thấy, các mô-men xoắn tác động lên một dây bánh xe là mô-men xoắn do động cơ T_i và mô-men xoắn do lực F_i .



Hình 3. Mô-men xoắn tác dụng lên dây bánh xe.

Các phương trình mô tả chuyển động quay của từng dây bánh xe [7]:

$$\begin{aligned} 2J_w \dot{\omega}_1 &= T_1 - r (F_1 + F_4) \\ 2J_w \dot{\omega}_2 &= T_2 - r (F_2 + F_3) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó: r - Bán kính bánh xe; ω_1 - Vận tốc góc của bánh xe 1 và 4; ω_2 - Vận tốc góc của bánh xe 2 và 3; J_w - Mô-men quán tính của bánh xe.

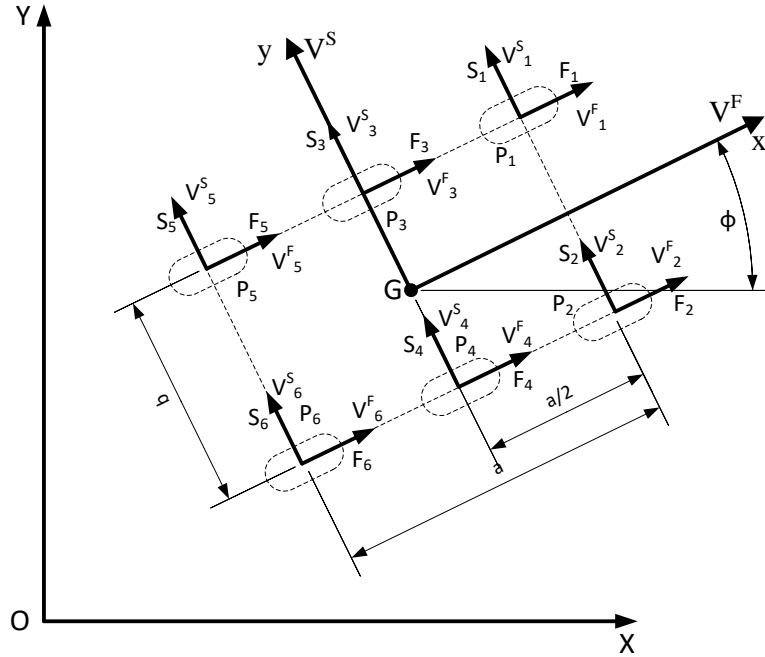
Các giá trị v^F và v^S lần lượt là vận tốc của trục bánh xe theo phương dọc và phương ngang được tính theo các phương trình sau [5]:

$$\begin{aligned} v_1^F &= v_4^F = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi - \frac{b}{2} \dot{\varphi} \\ v_2^F &= v_3^F = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi + \frac{b}{2} \dot{\varphi} \\ v_1^S &= v_2^S = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi + \frac{a}{2} \dot{\varphi} \\ v_3^S &= v_4^S = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi - \frac{a}{2} \dot{\varphi} \end{aligned} \quad (6)$$

Các phương trình (1), (2), (3), (5), (6) là phương trình động học của xe robot bốn bánh lái trượt.

2.2. Động học xe robot sáu bánh lái trượt

Mô hình động học của xe robot sáu bánh lái trượt cơ bản giống với xe robot bốn bánh lái trượt (hình 4). Chỉ khác các lực S3, S4 không gây mô-men quay so với tâm quay G.



Hình 4. Sơ đồ lực tác dụng lên xe robot sáu bánh lái trượt.

Khi đó, các phương trình (1), (2), (3), (5), (6) lần được viết lại thành:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= \sum_{i=1}^6 F_i \cos \varphi - \sum_{i=1}^6 S_i \sin \varphi \\ M\ddot{y} &= \sum_{i=1}^6 F_i \sin \varphi + \sum_{i=1}^6 S_i \cos \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

$$J\ddot{\varphi} = (-F_1 - F_3 - F_5 + F_2 + F_4 + F_6) \frac{b}{2} + (S_1 + S_2 - S_5 - S_6) \frac{a}{2}$$

$$F_i = F_{i_max} \text{sign}(r\omega_i - v_i^F) \quad (8)$$

$$S_i = S_{i_max} \text{sign}(-v_i^S)$$

$$F_{i_max} = \mu_D \cdot M \cdot g / 6 \quad (9)$$

$$S_{i_max} = \mu_N \cdot M \cdot g / 6$$

$$3J_w \ddot{\omega}_1 = T_1 - r_w (F_2 + F_4 + F_6) \quad (10)$$

$$3J_w \ddot{\omega}_2 = T_2 - r_w (F_1 + F_3 + F_5)$$

$$v_1^F = v_3^F = v_5^F = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi - \frac{b}{2} \dot{\varphi}$$

$$v_2^F = v_4^F = v_6^F = \dot{x} \cos \varphi + \dot{y} \sin \varphi + \frac{b}{2} \dot{\varphi}$$

$$v_1^S = v_2^S = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi + \frac{a}{2} \dot{\varphi} \quad (11)$$

$$v_3^S = v_6^S = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi - \frac{a}{2} \dot{\varphi}$$

$$v_5^S = v_4^S = -\dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi$$

2.3. Các ràng buộc của tham số trong cấu hình động học xe

Hiệu suất quay của xe robot được tính bằng vận tốc góc w của thân xe trên mô men truyền động của hai động cơ:

$$H = \frac{w}{2 \cdot T} \left[\frac{\text{Rad}}{\text{s} \cdot \text{N} \cdot \text{m}} \right] \quad (12)$$

Khi đó, với xe robot có vận tốc dài tối đa v_{max} hiệu suất quay tại chỗ của thân xe cần đạt được mức tương đương tại các điểm tiếp xúc mặt đường của bánh xe. Tức là:

$$H = \frac{w_{max}}{2 \cdot T} = \frac{v_{max}}{2 \cdot T \cdot R_x} \quad (13)$$

Trong đó, w_{max} là vận tốc góc tối đa yêu cầu của xe robot, R_x là bán kính quay của điểm tiếp xúc mặt đường của các bánh xe: $R_x = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2}$

Chiều dài cơ sở của xe bốn bánh lái trượt phải đảm bảo lớn hơn giá trị tối thiểu để các bánh xe trong một dãy không chạm nhau. Với xe bốn bánh lái trượt, r là bán kính của bánh xe:

$$a \geq 2 \cdot r \quad (14)$$

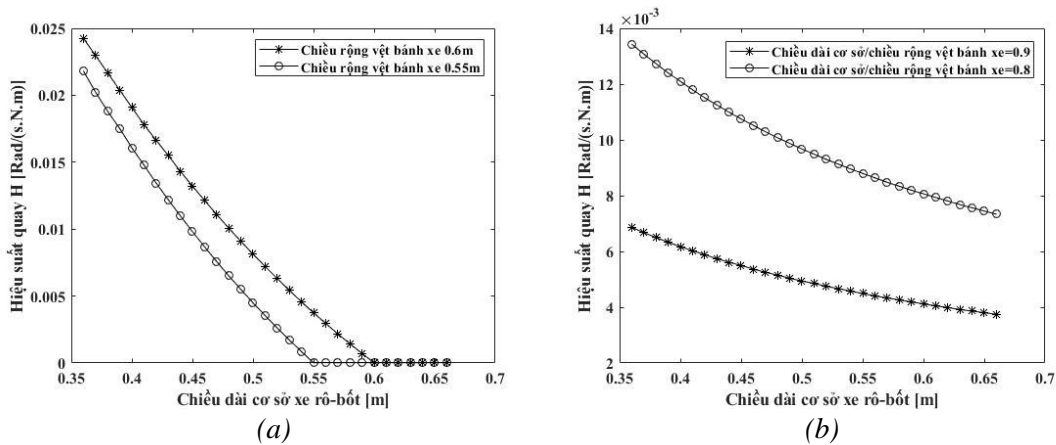
Tương tự như vậy, với xe sáu bánh lái trượt thì:

$$a \geq 4 \cdot r \quad (15)$$

3. MÔ PHỎNG, KHẢO SÁT, THẢO LUẬN

Để khảo sát khả năng quay tại chỗ của robot, ta đặt vào hai bánh xe dẫn động hai mô-men cùng độ lớn và ngược chiều nhau ($T_1=380 \text{ Nm}$; $T_2= -380 \text{ Nm}$). Để thực hiện các mô phỏng, ta đưa vào các tham số không đổi của xe như sau: $M=350\text{kg}$; $r=0.18\text{m}$; $J_w=0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ [9]. Theo (14) và (15), với xe bốn bánh lái trượt: $a_{min} = 2 \times 0.18 = 0.36 \text{ m}$; với xe sáu bánh lái trượt: $a_{min} = 4 \times 0.18 = 0.72 \text{ m}$. Để khảo sát sự ảnh hưởng của tỉ lệ chiều dài cơ sở trên chiều rộng vệt bánh xe đến góc hiệu suất quay của xe robot, hệ số ma sát trượt được cố định $\mu_D = \mu_N = 0.8$.

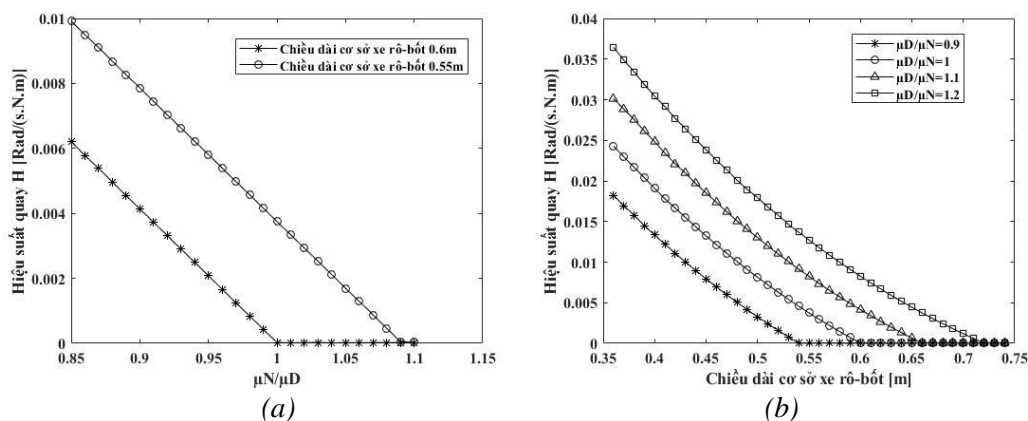
Từ đồ thị dưới ta thấy trong cùng 1 khoảng thời gian, với cùng một mô-men điều khiển đặt vào bánh xe dẫn động, hiệu suất quay tại chỗ của xe thay đổi phụ thuộc vào chiều dài cơ sở xe và chiều rộng vệt bánh xe. Hiệu suất quay tại chỗ của robot tăng khi tỉ lệ chiều dài cơ sở trên chiều rộng vệt bánh xe giảm (hình 5a). Hiệu suất quay tại chỗ của xe đạt được rất nhỏ (gần như bằng không) khi chiều dài cơ sở xe đạt đến giá trị ngưỡng a_N . Với chiều rộng vệt bánh xe 0.6 m, $a_N = 0.6 \text{ m}$; với chiều rộng vệt bánh xe 0.55 m, $a_N=0.55 \text{ m}$.



Hình 5. Ảnh hưởng của chiều dài cơ sở và chiều rộng vệt bánh xe lên hiệu suất quay tại chỗ xe robot bốn bánh lái trượt.

Hiệu suất quay tại chỗ của xe robot cũng tăng khi giảm đồng thời các kích thước chiều dài cơ sở và chiều rộng vệt bánh xe (tỉ lệ giữa hai kích thước không đổi) (hình 5b).

Để khảo sát ảnh hưởng của tỉ lệ hệ số ma sát theo phương ngang và phương dọc (μ_N/μ_D) lên hiệu suất quay của xe, chiều rộng vệt bánh xe giữ cố định bằng 0.6 m (hình 6).



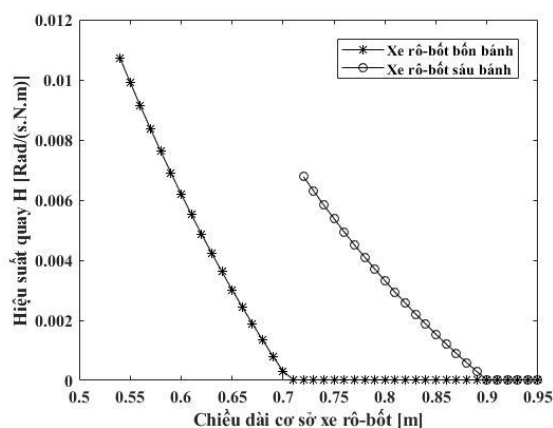
Hình 6. Ảnh hưởng của tỉ số ma sát theo phương ngang và phương dọc (μ_N/μ_D) lên hiệu suất quay tại chỗ xe robot bốn bánh lái trượt.

Như vậy, hiệu suất quay tại chỗ của robot tăng khi tỉ lệ hệ số ma sát theo phương ngang và theo phương dọc giảm (hình 6a). Trên thực tế, hệ số ma sát theo phương ngang và theo phương dọc có thể được thiết kế khác nhau, bằng cách thiết kế các cấu trúc đặc biệt của lốp xe [6, 7].

Để xác định giá trị a_N trong trường hợp tổng quát, ta tiến hành khảo sát với các tỉ lệ μ_D/μ_N khác nhau, đồng thời tỉ lệ chiều dài cơ sở xe trên chiều rộng vệt bánh xe thay đổi. Kết quả khảo sát được thể hiện trên hình 6b. Theo đó, giá trị ngưỡng của chiều dài cơ sở xe robot bốn bánh a_N phụ thuộc vào chiều rộng vệt bánh xe b và tỉ lệ μ_D/μ_N :

$$a_N = b \cdot \frac{\mu_D}{\mu_N} \quad (16)$$

Tiến hành mô phỏng đồng thời hai mô hình xe robot sáu bánh và bốn bánh lái trượt với các tham số riêng cho xe sáu bánh: $\mu_D = \mu_N = 0.8$. Tham số riêng cho xe bốn bánh: Tỉ lệ hệ số ma sát theo phương ngang và theo phương dọc tối ưu đạt được $\mu_N/\mu_D = 0.85$ [8], kết quả thu được như sau:



Hình 7. Ảnh hưởng của chiều dài cơ sở lên hiệu suất quay tại chỗ xe robot sáu bánh lái trượt và bốn bánh lái trượt (với chiều rộng vệt bánh xe 0.6 m).

Từ hình 7 nhận thấy rằng, với các tham số gần như tương đương, hiệu suất quay tại chỗ của xe sáu bánh lái trượt vượt trội so với bốn bánh lái trượt.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mô hình động học của xe robot bốn bánh lái trượt và sáu bánh lái trượt. Các kết quả khảo sát thu được như sau:

- Có thể tăng hiệu suất quay của xe bốn bánh lái trượt bằng cách giảm chiều dài cơ sở của thân xe đến mức tối thiểu.

- Khi tăng chiều dài cơ sở thân xe robot đến một giá trị ngưỡng (theo (16)), hiệu suất quay của xe rất nhỏ, gần như bằng không.

- Có thể tăng hiệu suất quay của xe bốn bánh lái trượt bằng cách giảm tỷ lệ hệ số ma sát trượt theo chiều ngang và chiều dọc thân xe.

- Việc đưa thêm 2 bánh xe vào xe bốn bánh lái trượt (để trở thành 6 bánh lái trượt) có thể mang lại hiệu suất quay tại chỗ tốt hơn đáng kể so với xe bốn bánh lái trượt.

Việc tính toán tối ưu các thông số này trong thiết kế xe robot lái trượt dẫn đến việc nâng cao hiệu suất làm việc, giảm mức tiêu thụ năng lượng và cải thiện hiệu quả tổng thể.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Campion G, "Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots," IEEE Trans. Robot. Automation, 12, pp. 47-62, (1996).
- [2]. Yao Wu *et al*, "Experimental kinematics modeling estimation for wheeled skid-steering mobile robots," IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (2013).
- [3]. Krzysztof Kozłowski, "Modeling and control of a 4-wheel skid-steering mobile robot," Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. Vol. 14, No. 4, pp. 477-496, (2004).
- [4]. Dinh Thi Hang, *et al*, "Dynamic Surface Control Tracking Algorithm for Four-wheel Differential Drive Mobile Robot," IEEE International Conference on Control, Automation and Information Sciences (2023).
- [5]. Söle, F., *et al*, "Mathematical Model of a SKID-Steered Mobile Robot for Control and Self-Localisation," In Proceedings of the 4th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles (IAV 2001), Sapporo, Japan, Volume 34, pp. 273-278, (2001).
- [6]. J.Y. Wong, Ph.D., D.Sc., Professor Emeritus, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada, "Theory of ground vehicles", John Wiley & Sons, (2001).
- [7]. R. Wade Allen, *et al*, "The Effect of Tire Characteristics on Vehicle Handling and Stability," Vol. 109, Section 6: journal of passenger cars: mechanical systems journal, pp. 1039-1051, (2000).
- [8]. Xia, D.; Liu, Q.; Lu, D., "Friction Prediction and Application to Lateral or Longitudinal Slip Force Prediction," Machines, 10, 791, (2022). <https://doi.org/10.3390/machines10090791>.
- [9]. Vũ Quốc Huy và cộng sự, "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo tổ hợp thiết bị điều khiển từ xa dò bom mìn, vật nổ và có khả năng đào, xúc, gắp ở độ sâu đến 1,5m," Báo cáo tổng hợp, đề tài cấp Bộ Quốc phòng, Hà Nội, (2023).

ABSTRACT

Investigating parameters in the dynamic configuration of four-wheeled and six-wheeled skid steering mobile robots to improve on-site rotation performance

This article studies the dynamic model of a four-wheeled and six-wheeled skid-steering mobile robot (SSMR), focusing on the on site rotation mode (zero turning radius). From there, the influence of some parameters in dynamic configuration of the robots on the rotation performance is built, without changing the robot's drive motor. Then the optimal choice of these parameters can be made to improve the robot's on-site rotation performance. The research results are simulated and demonstrated on MATLAB.

Keywords: Mobile robot; Four wheeled skid-steering mobile robot; SSMR; Dynamic model; On site rotation.