

Điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS bằng phương pháp lái độc lập phía trước và phía sau

Đặng Nam Kiên¹, Nguyễn Vũ^{2*}

¹Viện Tự động hóa KTQS, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;

²Khoa Điện, Đại học Công Nghiệp Hà Nội.

*Email: vutudonghoa@yahoo.com.vn

Nhận bài: 13/9/2023; Hoàn thiện: 10/11/2023; Chấp nhận đăng: 15/11/2023; Xuất bản: 10/12/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.FEE.2023.21-28>

TÓM TẮT

Phần lớn các các nghiên cứu bám quỹ đạo cho robot bốn bánh lái chủ động 4WD4WS là tiến hành với những đặc tính động học của các loại cấu hình đơn giản hơn, làm giảm tính cơ động và sự linh hoạt của robot. Bài báo đề xuất một phương pháp điều khiển động hình học cho robot với khả năng tận dụng tốt hơn đặc tính động học ưu việt của 4WD4WS robot, đó là tính độc lập của các bánh phía trước với các bánh phía sau. 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 khoá: Robot tự hành; 4wd4ws; Bốn bánh lái chủ động; Ngắm theo điểm đích ảo.

1. MỞ ĐẦU

Robot bốn bánh truyền động độc lập và bốn bánh lái độc lập 4WD4WS (gọi tắt là robot bốn bánh lái chủ động) là một hệ thống dẫn động, có độ linh hoạt và tính cơ động vượt trội với 8 động cơ (4 động cơ truyền động và 4 động cơ lái) nên ngày càng được sử dụng nhiều hơn. Ngoài ra, với khả năng bám đường và hiệu suất hoạt động cao, 4WD4WS cũng còn được dùng trong những điều kiện khắc nghiệt như các xe công cụ phục vụ nông nghiệp. Trên hình 1 là một robot 4WD4WS được dùng nhiều trong các phòng thí nghiệm.



Hình 1. Robot 4WD4WS dùng trong phòng thí nghiệm (Robot Seekur).

Trong bài toán điều khiển robot tự hành vấn đề bám đường cho robot là một bài toán phổ biến, đảm bảo cho robot có thể được ứng dụng trong thực tế. Với 4WD4WS, một số tác giả xây dựng bộ điều khiển trên mô hình động lực học với những giả định thiếu thực tế về khả năng đáp ứng của hệ thống [8], khi robot thực tế là một hệ thống phi mô men mặc dù dư dẫn động. [9] là một trong những nghiên cứu rất chi tiết với việc đưa ra 2 vòng điều khiển riêng biệt, trong đó vòng lái hướng cũng đưa ra góc lái hướng phía trước và sau độc lập. Tuy nhiên, với việc áp đặt 2 bánh trước và 2 bánh sau chung một góc lái [9, 10] thì tác giả đã tạo ra góc trượt ngang tại các bánh dẫn động trong mọi trường hợp vận hành.

Một số tác giả nghiên cứu các phương pháp lái hình học và Pure Pursuit là một trong số các phương pháp lái được sử dụng rộng rãi, được phát triển nhiều [3-5], tuy nhiên, ứng dụng với

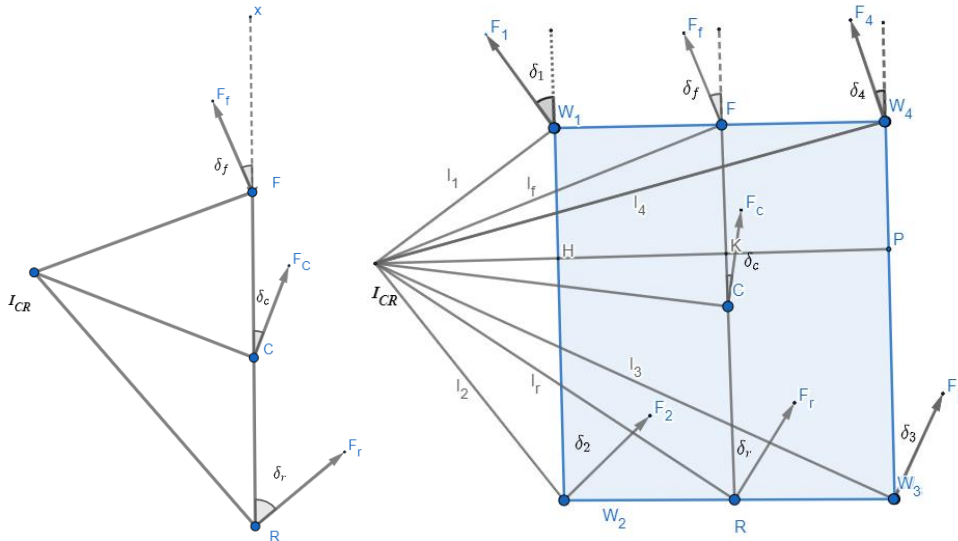
4WD4WS thì không nhiều. Ngoài ra, còn có phương pháp ngắm theo điểm đích ảo [1, 2] được tác giả áp dụng với robot 4WD4WS, tuy nhiên, việc ràng buộc các góc lái phía trước với phía sau làm giảm đi tính cơ động và sự linh hoạt của robot.

Hiện tại, việc ứng dụng xử lý ảnh một cách phổ biến đã mang đến nhiều kết quả thuận lợi cho bài toán điều khiển, trong đó có nhiều nghiên cứu sử dụng camera và các hệ thống thị giác máy tính xác định được khoảng cách vật thể [6, 7]. Do đó, với việc sử dụng 2 camera, để xác định độ lệch ngang thân xe, tác giả đề xuất phương pháp lái độc lập đối với bánh lái trước và sau trong mô hình xe đạp của robot 4WD4WS.

2. NỘI DUNG CẦN GIẢI QUYẾT

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

Mô hình động học hình học phổ biến cho robot 4WD4WS được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng là mô hình giản lược xe đạp 2 bánh. Trong đó, các góc lái của từng bánh lái thực cũng như các bánh lái ảo F và R (như hình 2) được xác định thông qua phương pháp lái Ackermann với tâm quay tức thời I_{CR} .



Hình 2. Mô hình động học giản lược dạng xe đạp 2 bánh.

$$\tan(\delta_f) = \frac{\frac{l}{2} + R * \sin(\delta_c)}{R * \cos(\delta_c)} \quad (1)$$

$$\tan(\delta_r) = \frac{-\frac{l}{2} + R * \sin(\delta_c)}{R * \cos(\delta_c)} \quad (2)$$

Trong đó: $\delta_f, \delta_r, \delta_c$ là các góc lái ảo tại các điểm F, R, C. Và chiều dài thân xe $l = 2 * l_f = 2 * l_r$, d là chiều ngang thân xe. R là bán kính của quỹ đạo, như trên hình 2: $R = I_{CR}C$

Ngược lại, nếu cho trước δ_f, δ_r cũng hoàn toàn tìm được R và δ_c theo các phương trình dưới đây:

$$\delta_c = \tan^{-1} \frac{\tan(\delta_f) + \tan(\delta_r)}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{l}{\cos(\delta_c) * (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r))} \quad (4)$$

Trong khi đó, với giả định lái theo phương pháp Ackermann thì các lực ma sát sẽ triệt tiêu các chuyển động ngang thân xe và sự trượt không xảy ra, đồng thời xe chuyển động ở một vận tốc không đổi v . Khi đó, vận tốc góc của thân xe được tính bởi:

$$\dot{\psi} = \omega = \frac{v}{R} \quad (5)$$

Chiều vector vận tốc v lên hai chiều hệ tọa độ mặt đất cố định:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \end{cases} \quad (6)$$

Kết hợp (3), (4), (5), (6) ta có phương trình động học của robot 4WD4WS:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi \\ \dot{y} = v \sin \psi \\ \dot{\psi} = \frac{v}{R} \\ R = \frac{v}{\cos(\delta_c) * (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r))} \\ \delta_c = \tan^{-1} \frac{\tan(\delta_f) + \tan(\delta_r)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Với đầu vào điều khiển là các góc δ_f và δ_r .

2.2. Điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành 4WD4WS bằng phương pháp lái độc lập bánh trước và sau

Trong tự (6) có thể mô tả khoảng cách từ các điểm giữa hai bánh trước và 2 bánh sau (F, R trên hình 2) đến đường quỹ đạo được xác định theo phương trình vi phân sau:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = v * \sin(\psi_p - \psi_f) \\ \dot{e}_r = v * \sin(\psi_p - \psi_r) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó: ψ_p là góc của đường quỹ đạo yêu cầu; ψ_f, ψ_r lần lượt là góc của bánh xe ảo ở điểm F và R. Khi đó góc của bánh xe được xác định theo góc của thân xe và góc lái như sau:

$$\begin{cases} \psi_f = \psi + \delta_f \\ \psi_r = \psi + \delta_r \end{cases} \quad (9)$$

Như vậy, (8) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = v * \sin(\psi_p - \psi - \delta_f) \\ \dot{e}_r = v * \sin(\psi_p - \psi - \delta_r) \end{cases} \quad (10)$$

Để (8) ổn định tiệm cận, sử dụng phương pháp ngắm theo điểm đích ảo có khoảng cách lần lượt là β_f, β_r khi đó, góc hướng mong muốn của bánh xe được xác định như sau:

$$\begin{cases} \psi_{fd} = \psi_p + \text{atan} \frac{e_f}{\beta_f} \\ \psi_{rd} = \psi_p + \text{atan} \frac{e_r}{\beta_r} \end{cases} \quad (11)$$

Khi đó, góc lái mong muốn sẽ là:

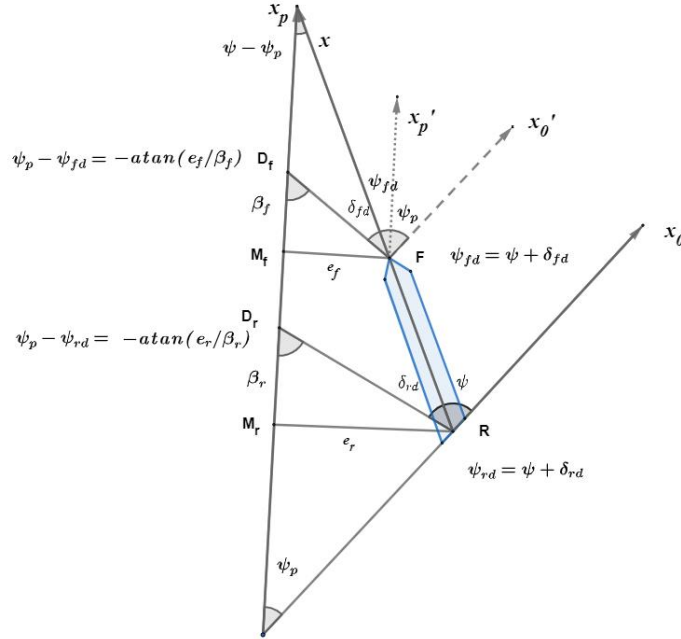
$$\begin{cases} \delta_{fd} = \psi_{fd} - \psi \\ \delta_{rd} = \psi_{rd} - \psi \end{cases} \quad (12)$$

Kết hợp (8), (11) và (12) ta có:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = v * \sin(-\text{atan} \frac{e_f}{\beta_f}) \\ \dot{e}_r = v * \sin(-\text{atan} \frac{e_r}{\beta_r}) \end{cases} \quad (13)$$

Với các giá trị e_f, e_r đủ nhỏ tương đối so với β_f, β_r , đặc biệt là khi xe đang chuyển động xung quanh quỹ đạo, (13) có thể được tuyến tính hóa thành:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = -v * \frac{e_f}{\beta_f} \\ \dot{e}_r = -v * \frac{e_r}{\beta_r} \end{cases} \quad (14)$$



Hình 3. Phương pháp lái độc lập bánh trước và sau.

Phương trình (14) cho thấy hệ ổn định tiệm cận, để hệ (8) ổn định trong thời gian hữu hạn, chọn góc hướng của bánh xe có thành phần hàm mũ của $\frac{e_f}{\beta_f}$ và $\frac{e_r}{\beta_r}$ cụ thể như sau:

$$\begin{cases} \psi_{f,d} = \psi_p + \operatorname{atan}\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}} \\ \psi_{r,d} = \psi_p + \operatorname{atan}\left(\frac{e_r}{\beta_r}\right)^{\frac{p}{q}} \end{cases} \quad (15)$$

Với p, q là các số lẻ sao cho $p < q < 2p$.

Khi đó, hệ (8) trở thành:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = v * \sin\left(-\operatorname{atan}\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}}\right) \\ \dot{e}_r = v * \sin\left(-\operatorname{atan}\left(\frac{e_r}{\beta_r}\right)^{\frac{p}{q}}\right) \end{cases} \quad (16)$$

Sau khi tuyến tính hóa quanh điểm $\frac{\bar{e}_f}{\beta_f} = 0, \frac{\bar{e}_r}{\beta_r} = 0$ nhận được:

$$\begin{cases} \dot{e}_f = -v * \left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}} \\ \dot{e}_r = -v * \left(\frac{e_r}{\beta_r}\right)^{\frac{p}{q}} \end{cases} \quad (17)$$

Khi đó, có thể viết lại (17) dưới dạng:

$$\begin{cases} \frac{\dot{e}_f}{\beta_f} = -\frac{v}{\beta_f} * \left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}} \\ \frac{\dot{e}_r}{\beta_r} = -\frac{v}{\beta_r} * \left(\frac{e_r}{\beta_r}\right)^{\frac{p}{q}} \end{cases} \quad (18)$$

Biến đổi (18) ta có:

$$\frac{d\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)}{\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}}} = -\frac{v}{\beta_f} dt \quad (19)$$

Tích phân 2 vế theo $\frac{e_f}{\beta_f}$ và t nhận được :

$$\int_{\frac{e_{f0}}{\beta_f}}^0 \frac{d\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)}{\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}}} = -\int_{t_0}^{t_0+t_{sf}} \frac{v}{\beta_f} dt \quad (20)$$

Trong đó: $\frac{e_{f0}}{\beta_f}$, t_0 là các giá trị ban đầu, t_{sf} là thời gian để đưa $\frac{e_{f0}}{\beta_f}$ về không.

Khi đó, (20) trở thành:

$$\frac{q}{q-p} \left(\frac{e_{f0}}{\beta_f}\right)^{\frac{q-p}{q}} = \frac{v}{\beta_f} t_{sf} \quad (21)$$

Hay:

$$t_{sf} = \frac{\beta_f^{\frac{p}{q}}}{v} \frac{q}{q-p} e_{f0}^{\frac{q-p}{q}} \quad (22)$$

Tương tự như vậy, ta có:

$$t_{sr} = \frac{\beta_r^{\frac{p}{q}}}{v} \frac{q}{q-p} e_{r0}^{\frac{q-p}{q}} \quad (23)$$

Như vậy, thời gian để cho điểm trước và sau (F và R) của xe tiến tới đường quỹ đạo là hữu hạn.

Để thời gian cho điểm trước và điểm sau tiến tới đường quỹ đạo là bằng nhau, chọn khoảng cách đến điểm ngắm ảo của điểm sau theo giá trị khoảng cách đến điểm ngắm ảo của điểm trước và các giá trị sai lệch ban đầu:

$$\beta_r^{\frac{p}{q}} = \beta_f^{\frac{p}{q}} \left(\frac{e_{f0}}{e_{r0}}\right)^{\frac{q-p}{q}} \quad (24)$$

$$\text{Hay: } \beta_r = \beta_f \left(\frac{e_{f0}}{e_{r0}}\right)^{\frac{q-p}{p}} \quad (25)$$

Như vậy, với các góc hướng mong muốn của cặp bánh trước và bánh sau được xác định theo

(15), với β_r được xác định theo (25) thì sau khoảng thời gian $t_{sf} = \frac{\beta_f^{\frac{p}{q}}}{v} \frac{q}{q-p} e_{f0}^{\frac{q-p}{q}}$ độ lệch của bánh trước và bánh sau đến đường quỹ đạo sẽ tiến tới không.

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống ta chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2}(e_f^2 + e_r^2) \quad (26)$$

Khi đó, đạo hàm của hàm Lyapunov: $\dot{V} = e_f \dot{e}_f + e_r \dot{e}_r$ (27)

Kết hợp với (16) ta có:

$$\dot{V} = e_f v * \sin\left(-\text{atan}\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}}\right) + e_r v * \sin\left(-\text{atan}\left(\frac{e_r}{\beta_r}\right)^{\frac{p}{q}}\right) = \dot{V}_f + \dot{V}_r \quad (28)$$

Xét riêng từng số hạng trong \dot{V} :

$$\dot{V}_f = e_f v * \sin\left(-\text{atan}\left(\frac{e_f}{\beta_f}\right)^{\frac{p}{q}}\right) \quad (29)$$

Do p, q là các số lẻ còn v, β_f luôn dương và e_f là một giá trị nhỏ, nằm tại lân cận của 0, nên $\dot{V}_f \leq 0$, tương tự thì ta cũng có $\dot{V}_r \leq 0$, dấu bằng xảy ra khi và chỉ khi:

$$e_f = e_r = 0 \quad (30)$$

Như vậy, hệ thống đã cho ổn định theo Lyapunov.

3. MÔ PHÒNG, TÍNH TOÁN, THẢO LUẬN

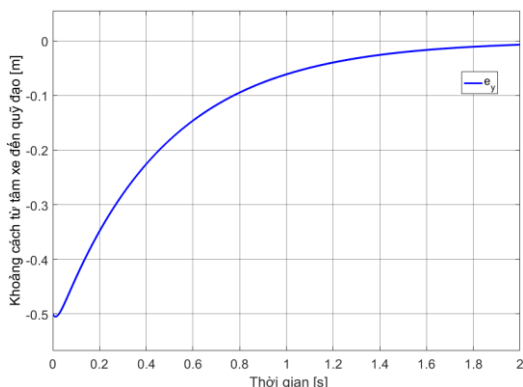
Bài báo chọn mô phỏng cho quỹ đạo thẳng trên phần mềm Matlab – Simulink với các điều kiện ban đầu như nhau cho ba phương pháp điều khiển: Ackermann đối xứng, độc lập bánh trước và sau, độc lập bánh trước và sau sử dụng hàm mũ.

Các tham số mô phỏng và điều kiện ban đầu :

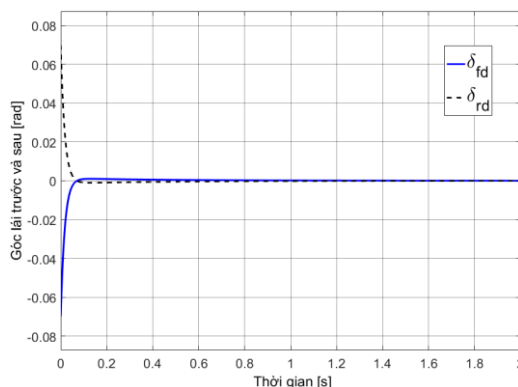
$$\begin{cases} \beta_f = 10 \\ x_0 = 0 \text{ m} \\ y_0 = 0.5 \text{ m} \\ \psi_0 = -2 \text{ độ} \\ v = 30 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$t_{sf} = \frac{p}{v} \frac{q}{q-p} e_{f0}^{\frac{q-p}{q}} = \frac{10^9}{30} * \frac{9}{9-5} * (-0.535)^{\frac{9-5}{9}} = 0.2041 \text{ s} \quad (31)$$

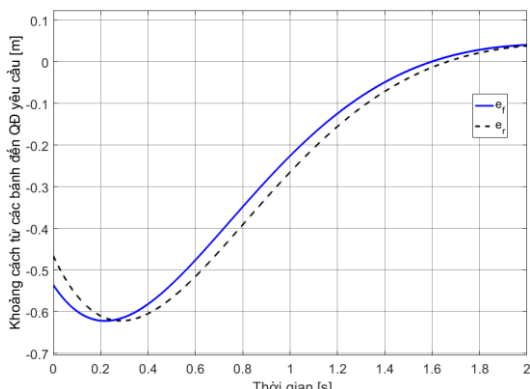
Kết quả mô phỏng được thể hiện trên các hình 4 – hình 10. Trong đó, có thể nhận thấy sai số theo phương ngang của thân xe của phương pháp điều khiển độc lập bánh trước và sau không nhanh bằng phương pháp điều khiển Ackermann đối xứng, tuy nhiên, phương pháp điều khiển độc lập bánh trước và sau sử dụng hàm mũ lại có tốc độ bám quỹ đạo vượt trội.



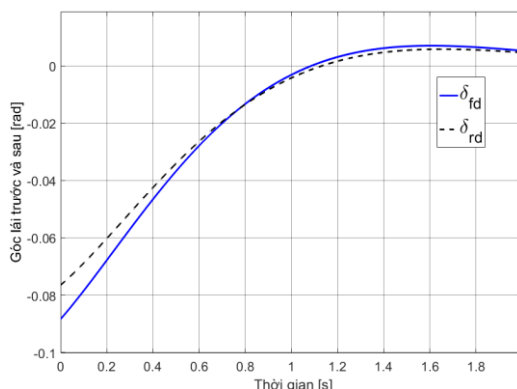
Hình 4. Khoảng cách từ tâm xe đến đường quỹ đạo (PP điều khiển Ackermann đối xứng).



Hình 5. Góc lái bánh trước và sau (PP điều khiển Ackermann đối xứng).



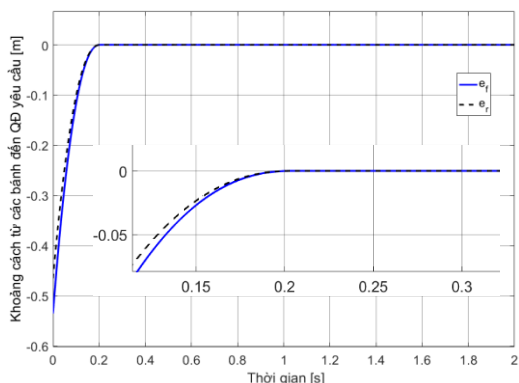
Hình 6. Khoảng cách từ bánh trước và sau đến đường quỹ đạo (PP ĐK độc lập bánh trước, sau).



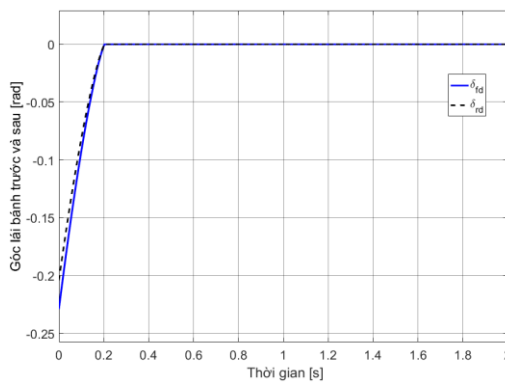
Hình 7. Góc lái bánh trước và sau (PP ĐK độc lập bánh trước, sau).

Ngoài ra, theo (31) thời gian hội tụ thực tế của hệ thống cũng tuân thủ chặt chẽ như công thức (22) với chỉ 0.2 s. Kết quả này có thể thấy rõ trên hình 8 và hình 9 khi sai số khoảng cách đến đường quỹ đạo của cả bánh trước và bánh sau đều tiến về không rất nhanh, đồng thời các góc lái bánh trước và bánh sau cũng có xu hướng này. Trong khi đó, với cả hai phương pháp điều khiển Ackermann đối xứng và điều khiển độc lập bánh trước và sau (không có hàm mũ) thì sau 2s xe robot 4WD4WS vẫn chưa hoàn toàn bám được đường quỹ đạo yêu cầu.

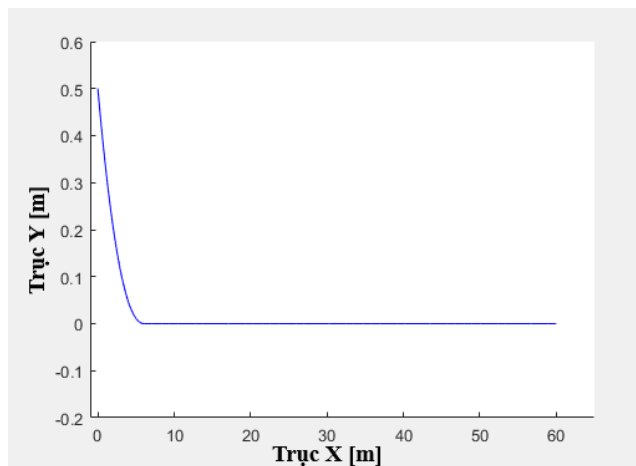
Sự khác biệt của các phương pháp điều khiển cũng có thể thấy rõ trên các hình 5, hình 7 và hình 9, khi phương pháp điều khiển Ackermann đối xứng có các góc lái đối nhau và tiến về không theo hai hướng ngược nhau, trong khi phương pháp điều khiển độc lập lại có các góc lái trước và sau xấp xỉ bằng nhau và cùng tiến về không theo một hướng.



Hình 8. Khoảng cách từ bánh trước và sau đến đường quỹ đạo (PP ĐK độc lập hàm mũ).



Hình 9. Góc lái bánh trước và sau (PP ĐK độc lập bánh trước, sau sử dụng hàm mũ).



Hình 10. Quỹ đạo thực của robot 4WD4WS chạy trong 2 s (PP ĐK độc lập bánh trước, sau sử dụng hàm mũ).

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một thuật toán điều khiển độc lập bánh lái trước và sau sử dụng hàm mũ khi xem xét bài toán bám quỹ đạo cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS, theo đó, chất lượng bám quỹ đạo được cải thiện so với các phương pháp có sẵn đồng thời đảm bảo được tính cơ động và sự linh hoạt của robot dư dẫn động. Với kết quả đó, phương pháp này có thể ứng dụng cho các loại robot tự hành với cấu hình động học tương tự 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đặng Nam Kiên, Nguyễn Vũ, Nguyễn Thành Trung, “Điều chỉnh bám quỹ đạo cho robot tự hành bốn bánh lái chủ động 4WD4WS bằng vật chuẩn”, Tạp chí Nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự, Vol. 85 (2023).
- [2]. Nam Kien Dang, Vu Nguyen, “Dynamic virtual target guidance algorithm for path following control of a 4WD4WS mobile robot”, International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation, E-ISSN 2582-7138, Vol. 4, Issue. 4, pp. 896-902, (2023), DOI: <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2023.4.4.896-902>
- [3]. Zhao Z.G., Zhou L.J., Zhu Q., “Preview Distance Adaptive Optimization for the Path Tracking Control of Unmanned Vehicle”, J. Mech. Eng., 54 (24) 180–187, (2018), 10.3901/JME.2018.24.166.
- [4]. H. Wang, X. Chen, Y. Chen, B. Li and Z. Miao, “Trajectory Tracking and Speed Control of Cleaning Vehicle Based on Improved Pure Pursuit Algorithm,” 2019 Chinese Control Conference (CCC), Guangzhou, China, pp. 4348-4353, (2019), doi: 10.23919/ChiCC.2019.8865255
- [5]. W. J. Wang, T. M. Hsu and T. S. Wu, “The improved pure pursuit algorithm for autonomous driving advanced system,” 2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA), Hiroshima, Japan, pp. 33-38, (2017), doi: 10.1109/IWCIA.2017.8203557.
- [6]. Ming-Chih Lu, Wei-Yen Wang and Chun-Yen Chu, “Image-based distance and area measuring systems,” in IEEE Sensors Journal, vol. 6, no. 2, pp. 495-503, (2006), doi: 10.1109/JSEN.2005.858434.
- [7]. Chen-Chien Hsu, Ming-Chih Lu and Ke-Wei Chin, “Distance measurement based on pixel variation of CCD images,” 2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, Wellington, New Zealand, pp. 324-329, (2009), doi: 10.1109/ICARA.2000.4803985.
- [8]. Lee Ming-Han and Tzue-Hseng S. Li. “Kinematics, dynamics and control design of 4WIS4WID mobile robots.” The Journal of Engineering 2015: 6-16, (2015).
- [9]. Penglei Dai & Jay Katupitiya, “Force control for path following of a 4WS4WD vehicle by the integration of PSO and SMC”, Vehicle System Dynamics, 56:11, 1682-1716, (2018), DOI: 10.1080/00423114.2018.1435888.
- [10]. Zhonghua Zhang, Caijin Yang, Weihua Zhang, Yanhai Xu, Yiqiang Peng, Maoru Chi, “Motion Control of a 4WS4WD Path-Following Vehicle: Dynamics-Based Steering and Driving Models”, Shock and Vibration, vol. 2021, Article ID 8861159, 13 pages, (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/8861159>.

ABSTRACT

Path following control for four-wheel-drive/four-wheel-steer mobile robot (4WD4WS) by front and rear independent driving method.

The majority of traction studies for 4WD4WS active four-wheel-drive robots are conducted with the kinematics of simpler configurations, which reduce the robot's maneuverability and flexibility. This paper proposes a method of geometric dynamic control for the robot with the ability to better utilize the superior kinematics of the 4WD4WS robot, which is the independence of the front wheels from the rear wheels. 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; Virtual target guidance algorithm.