

Leader Following and Multiple Obstacle Avoidance of Autonomous Vehicle with Steering-Wheel and Driving-Wheel Torques Using Path Planning and Model Predictive Control

Hamed Kouhi^{1*}, Esmaeil Salahshoor²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

² Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Izeh, Izeh, Iran

ABSTRACT: This paper studies the autonomous vehicle leader following and collision avoidance problem. In this paper, like as a real vehicle, geometric dimensions, mass, and moment of inertia are considered for the vehicle; steering-wheel and driving-wheel torques are the two control inputs. The nonlinear dynamics equation of the vehicle is derived. At first, an algorithm is proposed for changing the direction of the vehicle to follow the leader, then the suitable path for multiple obstacle avoidance and leader following is proposed, and then a nonlinear model predictive controller (MPC) is used to follow the reference trajectory. The desired trajectory is designed according to the elastic band method which is a powerful method for obstacle avoidance and leader following. The performances of the closed-loop system are illustrated through simulations. During the simulation, the vehicle first changes its direction and then follows the leader without colliding with obstacles. Although the vehicle is inertial and non-holonomic in behavior, the simulations show that the two path planning methods with MPC scheme work well. For future works, the authors aim to solve the problem with moving obstacles.

Review History:

Received: Jun. 28, 2023

Revised: Mar. 30, 2024

Accepted: Mar. 31, 2024

Available Online: Apr. 15, 2024

Keywords:

Autonomous Vehicle

Multiple Obstacle Avoidance

Nonholonomic Constraint

Trajectory Planning

Nonlinear Model Predictive Control

1- Introduction

In recent years control of autonomous vehicles has gained extra attention [1, 2]. Leader following is an important task in robot control. To prevent the vehicle from colliding with an obstacle, a collision avoidance algorithm must be proposed.

Currently, because of the high potential of MPC, it is used in the automotive industry. A survey of MPC development in automotive applications was carried out [3]. In [4], a new trajectory planning based on an elastic band is proposed, which is combined with driving intention for vehicle obstacle avoidance. In [5, 6] methods have been proposed to pass two-wheeled robots through obstacles, but four-wheeled vehicles are far more difficult to control than two-wheeled robots. The issue of autonomous vehicles passing a single obstacle has been discussed a lot (as in [7, 8]), but investigating the movement of autonomous vehicles through several obstacles requires more research. limited data about multiple obstacle avoidance and leader following is available in the literature. But in this paper, the issue of following a leader in a two-dimensional environment that requires more general maneuvers by the vehicle is investigated.

The most important contributions of this paper are:

- Two algorithms will be proposed, depending on the environmental conditions, the vehicle will use these two algorithms so that it can even move backward if necessary.

• In addition to path planning, a new trajectory planning technique will be proposed.

• The goal is to reduce the number of optimization decision variables in the trajectory planning to make optimization easier.

• The proposed trajectory planning and control methods are flexible against the number of obstacles.

2- Control problem statement

The autonomous vehicle is shown in Figure 1, and its mass and moment of inertia are considered. By determining state variables:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_c, x_2 = \dot{x}_c, x_3 = y_c, x_4 = \dot{y}_c, \\x_5 &= \theta, x_6 = \dot{\theta}, x_7 = v, x_8 = \Phi.\end{aligned}\quad (1)$$

the state space equations are [1]

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) \\ \mathbf{X} &= [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_8]^T, \ \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2]^T\end{aligned}\quad (2)$$

*Corresponding author's email: hamed.kouhi@guilan.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

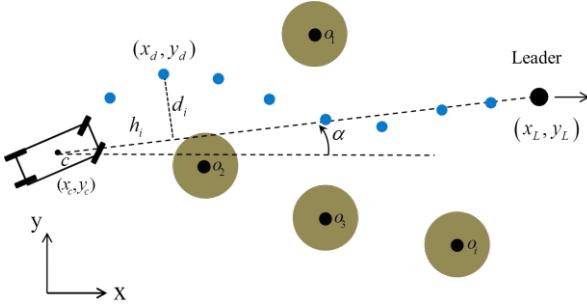


Fig. 1. Optimal trajectory for leader following and obstacle avoidance.

where, θ is the body yaw angle, Φ is the steering angle, V is the front wheel speed, F_1 is robot driving force, and control inputs are chosen as $\Phi = \tau_1$ and $F_1 = \tau_2$.

In Figure 1, a leader is shown with a position x_L, y_L to be followed by a vehicle despite some obstacles. The desired trajectory is shown as small points. x_d, y_d shows the position of each point on the trajectory. The desired trajectory will be achieved by an optimization problem.

First, $D = [d_1, d_2, \dots, d_{n_d}]$ is defined as decision variables in the optimization problem. The aim is to find the best vector D for leader following and obstacle avoidance. The proposed cost function that should be minimized to give the optimal trajectory is

$$J_{\text{Traj}} = \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_o} J_{i,j} + w_1 \sum_{k=2}^{n_d} (d_k - d_{k-1})^2 + w_2 ((x_{d,1} - x_{c,1})^2 + (y_{d,1} - y_{c,1})^2) + w_3 ((x_{d,n_d} - x_L)^2 + (y_{d,n_d} - y_L)^2) \quad (3)$$

where the penalty function $J_{i,j}$ is for obstacle collision avoidance. Finally, the following optimization problem gives us the optimal trajectory

$$\mathbf{D}_{\text{optimal}} = \min_{\mathbf{D}} J_{\text{Traj}} \quad (4)$$

Figure 2 shows the robot direction \mathbf{e}_{car} relative to the direction of the leader relative position \mathbf{e}_L . And we have

$$\gamma = \cos^{-1}(\mathbf{e}_{car} \cdot \mathbf{e}_L). \quad (5)$$

According to the value of γ , two special control algorithms are employed which are described here. Control logic for $\gamma > \gamma_0$: In this case (e.g., $\gamma_0 = 80^\circ$), before following the leader, the robot's direction should be placed in a suitable direction to follow the leader easily. The cost function to be minimized is as follows

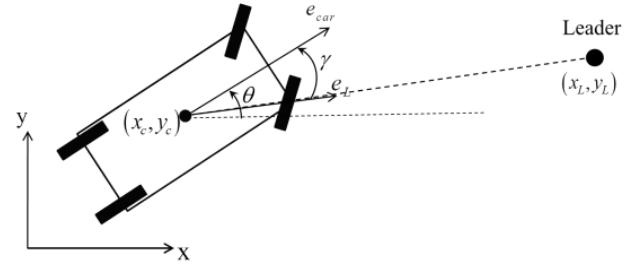


Fig. 2. The vehicle direction relative to the direction of the leader's relative position.

$$J_c = \sum_{i=1}^{N_p} \left[(\dot{x}_{cd,i})^2 + (\dot{y}_{cd,i})^2 \right] + \sum_{i=1}^{N_c} \left[w_5 \tau_{1,i}^2 + w_6 \tau_{2,i}^2 \right] \quad (6)$$

Control logic for $\gamma \leq \gamma_0$: In this case, the direction of the robot is suitable for following the leader. The proposed cost function for this case is as follows

$$J_c = \sum_{i=1}^{N_p} \left[(x_{d,i} - x_{c,i})^2 + (y_{d,i} - y_{c,i})^2 \right] + w_7 \left[(\dot{V}_{d,i}(1) - \dot{x}_{c,i})^2 + (\dot{V}_{d,i}(2) - \dot{y}_{c,i})^2 \right] + \sum_{i=1}^{N_c} \left[w_8 \tau_{1,i}^2 + w_9 \tau_{2,i}^2 \right] \quad (7)$$

where, $\mathbf{V}_{d,i}$ is the desired velocity vector obtained from the trajectory planning.

Finally, the following optimization problem must be solved to obtain optimal control inputs:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{optimal}} = \min_{\boldsymbol{\tau}} J_c \quad (8)$$

Subject to

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(i+1) &= \mathbf{f}(\mathbf{X}(i), \boldsymbol{\tau}) dt + \mathbf{X}(i) \\ |\tau_1| &\leq \tau_{1,\max}, |\tau_2| \leq \tau_{2,\max}, |\Phi| \leq \Phi_{\max}. \end{aligned} \quad (9)$$

where, $\tau_{1,\max}$ and $\tau_{2,\max}$ are the maximum torques and Φ_{\max} is the maximum steering angle.

3- Results and Discussion

In this section, a leader with initial position [0 0] and velocity [3,0]m/s are considered. In Figure 3, the trajectory of the autonomous vehicle, which is moving among the three obstacles, is shown. The vehicle tracks the virtual leader by using the proposed trajectory planning and NMPC scheme. In the beginning, the first control logic is activated to change the direction of the vehicle in a suitable direction. After changing the vehicle direction, the second control law is activated for

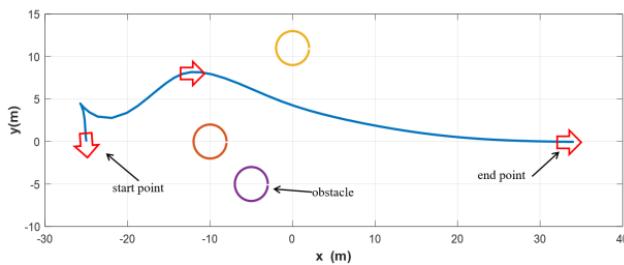


Fig. 3. The trajectory of the autonomous vehicle moving among the multiple obstacles.

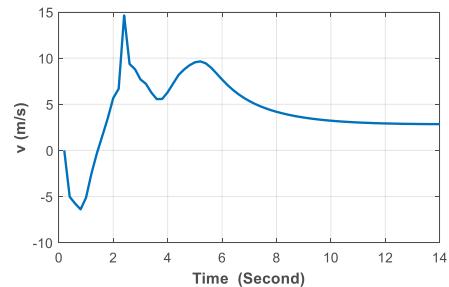


Fig. 4. The vehicle's velocity time response.

leader following and obstacle avoidance.

4- Conclusions

In addition to the dynamics model, steering limitation, actuator saturation, and nonholonomic constraints make the control problem difficult. For changing the direction of the robot to follow the leader, an MPC-based control algorithm is proposed. The simulation results show that the direction-changing algorithm can be used in practice. A new trajectory planning method is proposed for leader following and to make sure that the collision is avoided. The proposed method first used trajectory planning and then used an MPC controller to follow the reference trajectory. Although physical constraints such as actuator saturation exist, the closed-loop system has suitable performance, and leader following with obstacle avoidance is well done.

References

- [1] H. Sayyaadi, H. Kouhi, H. Salarieh, Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target, *Scientia Iranica*, 18(4) (2011) 950-965.
- [2] H. Kouhi, A. Moradi, Multiple-Vehicle Cooperative Autonomous Parking Trajectory Planning Using Connected Fifth Degree Polynomials and Genetic Algorithm Optimization, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, (2024).
- [3] A. Swief, A. El-Zawawi, M. El-Habrouk, A Survey of Model Predictive Control Development in Automotive Industries, in: 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), IEEE, 2019, pp. 1-7.
- [4] M. Li, X. Song, H. Cao, Z. Huang, Shared steering control combined with driving intention for vehicle obstacle avoidance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 233(11) (2019) 2791-2808.
- [5] G. Xia, X. Xia, X. Sun, Formation control with collision avoidance for underactuated surface vehicles, *Asian Journal of Control*, 24(5) (2022) 2244-2257.
- [6] D. Xue, D. Wu, A.S. Yamashita, Z. Li, Proximal policy optimization with reciprocal velocity obstacle based collision avoidance path planning for multi-unmanned surface vehicles, *Ocean Engineering*, 273 (2023) 114005.
- [7] H. Wang, B. Liu, Path planning and path tracking for collision avoidance of autonomous ground vehicles, *IEEE Systems Journal*, 16(3) (2021) 3658-3667.
- [8] X. Zhang, W. Zhang, Y. Zhao, H. Wang, F. Lin, Y. Cai, Personalized motion planning and tracking control for autonomous vehicles obstacle avoidance, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(5) (2022) 4733-4747.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Kouhi, E. Salahshoor, Leader Following and Multiple Obstacle Avoidance of Autonomous Vehicle with Steering-Wheel and Driving-Wheel Torques Using Path Planning and Model Predictive Control, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(12) (2024) 309-312.

DOI: [10.22060/mej.2024.22517.7638](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22517.7638)





تعقیب ربات رهبر و اجتناب از موانع متعدد توسط خودرو خودران با گشتاورهای محرک چرخ و فرمان و با استفاده از طراحی مسیر و کنترل پیش‌بین مدل

حامد کوهی^{۱*}، اسماعیل سلحشور^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد ایذه، دانشگاه آزاد اسلامی، ایذه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

کلمات کلیدی:

خودرو خودران

جلوگیری از برخورد با موانع متعدد

قید غیرهولونومیک

طراحی مسیر

کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی

خلاصه: این مقاله به بررسی تعقیب ربات رهبر توسط خودرو خودران و مسائله اجتناب از برخورد با موانع می‌پردازد. در این مقاله همانند یک خودرو واقعی، ابعاد هندسی، جرم و ممان اینرسی برای خودرو در نظر گرفته شده است. گشتاور فرمان و گشتاور چرخ محرک، دو ورودی کنترلی هستند. معادلات دینامیک غیرخطی وسیله نقلیه استخراج شده است. ابتدا الگوریتمی برای تعییر جهت وسیله نقلیه برای تعقیب رهبر پیشنهاد می‌شود که به منظور قرارگیری جهت خودرو در جهت مناسب برای تعقیب ربات رهبر طراحی شده است. پس از آن مسیر مناسب برای اجتناب از برخورد با موانع ساکن متعدد و تعقیب رهبر ارائه می‌گردد و سپس از یک کنترل کننده پیش‌بین مدل غیرخطی برای دنبال کردن مسیر مرجع استفاده می‌شود. الگوریتم طراحی مسیر براساس تئوری باند الاستیک یکده که عملکرد بسیار خوبی برای عدم برخورد با موانع متعدد و تعقیب ربات رهبر دارد. عملکرد سیستم حلقه بسته از طریق شبیه‌سازی نشان داده شده است. اگرچه خودرو دارای اینرسی است و قیود غیرهولونومیک دارد، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که دو روش طراحی مسیر با طرح کنترل کننده پیش‌بین مدل به خوبی کار می‌کند.

۱- مقدمه

مدل با فرمان پذیری از جلو و گشتاور چرخ جلو مسیر مرجع مطلوب را دنبال می‌کند. تعییر مسیر و اجتناب از برخورد در سرعت بالا با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی در [۵] مورد بررسی قرار گرفته است که در آن خودرو به فرمان عقب و جلو مجهز شده است. بررسی کنترل یک خودرو با استفاده از کنترل پیش‌بین مدل در [۶] انجام شده است.

در [۷]، کنترل خودرو خودران با استفاده از گشتاور چرخ جلو و گشتاور فرمان در چرخ‌های جلو مورد مطالعه قرار گرفته است که در آن تعقیب رهبر بدون مانع در نظر گرفته می‌شود و تنها معادلات سینماتیک در مدل سازی استفاده می‌شود. روش کنترل همزمان ترمز و فرمان بر اساس کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی برای تعییر مسیر و اجتناب از مانع در [۸] مورد بررسی قرار گرفت. در [۹] کنترل فرمان بر اساس کنترل پیش‌بین مدل برای عدم برخورد با مانع وسیله نقلیه زمینی بدون سرنوشت انجام شده است. برای هدایت پذیری فعال وسیله نقلیه خودران، یک سیستم مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل در [۱۰] پیشنهاد شد. یک سیستم کنترل پیش‌بین مدل به منظور پایدارسازی یک وسیله نقلیه در امتداد مسیر مطلوب و در عین حال

در سال‌های اخیر کنترل وسایل نقلیه خودران توجه بسیاری را به خود جلب کرده است[۱]. از کارهای مربوط به کنترل خودرو خودران می‌توان به پارک خودرو، یافتن بهترین مسیر برای حرکت[۲]، حرکت خودرو در میان موانع [۳] و ... اشاره کرد. دنبال کردن رهبر یک وظیفه مهم در حوزه کنترل است، ممکن است یک رهبر مجازی برای کنترل یک خودرو استفاده شود. در واقعیت، برخی از موانع ممکن است در محیط وجود داشته باشد. بنابراین، برای جلوگیری از برخورد وسیله نقلیه با یک مانع، باید یک الگوریتم اجتناب از برخورد پیشنهاد شود.

کارهای مهمی در مورد کنترل خودروهای خودران وجود دارد. در [۴]، یک سیستم جلوگیری از برخورد خودروی خودران با استفاده از فرمان فال جلو و کنترل گشتاور چرخ و بر اساس کنترل پیش‌بین مدل برای تعییر مسیر و سبقت‌گیری پیشنهاد شد. از طراحی مسیر برای ایجاد یک مسیر مرجع بدون برخورد استفاده می‌شود. سیستم کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: hamed.koohi@guilan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسنده‌گان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



برقراری قیود فیزیکی آن طراحی شده است.

در [۱۱] در جاده‌های با انحنای کم، یک کنترل پیش‌بین مدل خطی برای حفظ مسیر و اجتناب از مانع پیشنهاد شده است که در آن وسیله نقلیه از برخورد با دو مانع اجتناب می‌کند و ترمز یا فرمان دریچه گاز و زاویه فرمان متناظر دستورات کنترلی هستند. از طریق کنترل پیش‌بین مدل و کنترل درجه دوم خطی، مطالعه قیاسی تعییب مسیر خودران در [۱۲] انجام شده است. مانور تعییب مسیر با استفاده از تئوری کنترل پیش‌بین مدل و فرمان جلو در [۱۳] بررسی شد. در [۱۴]، یک روش جدید اجتناب از مانع طراحی شده و به صورت تجربی برای یک خودروی خودران آزمایش شده است. در حال حاضر به دلیل پتانسیل بالای کنترل پیش‌بین مدل از آن در صنعت خودروسازی استفاده می‌شود. بررسی توسعه کنترل پیش‌بین مدل در کاربردهای خودرو در [۱۵] انجام شد. در [۱۶]، کنترل ریدیابی مسیر افقی متوجه برای وسایل نقلیه خودران بررسی شده است که در آن وسیله نقلیه در امتداد جاده حرکت می‌کند و مسیر مطلوب را دنبال می‌کند. یک طراحی مسیر پویا برای وسایل نقلیه در [۱۷] پیشنهاد شده است، و چند جمله‌ای درجه سه برای اجتناب از برخورد به کار گرفته شده است.

مروری بر طراحی مسیر و ریدیابی برای سبقت‌گیری خودروهای خودران در [۱۸] انجام شد. کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی و طراحی مسیر قابل اجرا برای وسایل نقلیه خودران در [۱۹] مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در آن خطاهای ریدیابی مسیر را به حداقل می‌رسانند و خودرو را با توجه به قیدهای فیزیکی کنترل می‌کنند. در [۲۰]، یک رویکرد کنترل پیش‌بین مدل متغیر با زمان خطی شده برای کنترل یک وسیله نقلیه خودران توسعه داده شد. به منظور ریدیابی مسیر دایره‌ای، یک سیستم خطی شده با کنترل پیش‌بین مدل در [۲۱] بررسی شده است. تعییب مسیر، سبقت‌گیری و کنترل برای جلوگیری از برخورد در بزرگراه با استفاده از کنترل فعال فرمان جلو و گشتاور چرخ در [۲۲] انجام شد. کنترل بهینه ترمزاها و فرمان برای جلوگیری از برخورد و حفظ مسیر با استفاده از الگوریتم اصلاح شده همیلتونی در [۲۳] پیشنهاد شد. یک الگوریتم طراحی مسیر مبتنی بر مدل برای اتومبیل‌های خودران در یک محیط پویا در [۲۴] پیشنهاد شد. طراحی مسیر و ریدیابی مسیر برای اجتناب از برخورد بر اساس کنترل پیش‌بین مدل با قیدهای چندگانه در [۲۵] بررسی شده است.

یک رهیافت غیرمحدب برای اجتناب از مانع بر اساس کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی در [۲۶] پیشنهاد شد که در آن ریدیابی خط مرکزی جاده هدف کنترل کننده است. یک روش کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی مبتنی

بر الگوریتم ژنتیک بر روی سرعت و فرمان خودروهای خودران در [۲۷] توسعه یافته است. اجتناب از مانع با کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی وسایل نقلیه خودران در [۲۸] مورد بررسی قرار گرفت، که در آن یک مدل دوچرخه برای پیش‌بینی رفتار آینده خودرو استفاده می‌شود. در [۲۹]، سیستم کنترل تطبیقی پایداری جانبی و اجتناب از برخورد طولی مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل با استفاده از ترمز اضطراری مورد بررسی قرار گرفت. کنترل بازخورد حالت بهینه برای اجتناب از مانع و تعییر مسیر در [۳۰] پیشنهاد شد جایی که یک خودروی با فرمان پذیری چهار چرخ (4WS) مورد مطالعه قرار گرفت. در [۳۱]، تحقیقی در مورد استراتژی تعییر مسیر با اجتناب از مانع زمان حقیقی بر اساس روش چندجمله‌ای پیشنهاد شده است. در [۳۲]، یک طراحی مسیر جدید مبتنی بر باند الاستیک پیشنهاد شده است که با قصد رانندگی برای اجتناب از مانع وسیله نقلیه ترکیب شده است. اجتناب از مانع وسایل نقلیه خودران مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل در [۳۳] مورد مطالعه قرار گرفت. در [۳۴]، یک کنترل پیش‌بین مدل برای وسایل نقلیه الکترونیکی خودران برای تعییر مسیر بر اساس طراحی مسیر چندجمله‌ای مرتبه پنجم پیشنهاد شد. یک رهیافت طراحی مسیر سلسله مراتبی مبتنی بر ساختار نمودار برای وسایل نقلیه خودران برای اجتناب از مانع در [۳۵] پیشنهاد و تحلیل شد. طراحی مسیر اضطراری یک سیستم جلوگیری از برخورد فعال برای یک وسیله نقلیه خودران در [۳۶] طراحی شد که در آن حفظ مسیر و سبقت مورد مطالعه قرار گرفت. در [۳۷]، یک کنترل پیش‌بین مدل مقاوم برای ریدیابی مسیر مطلوب طراحی شده است و کنترل سبقت مقاوم یک وسیله نقلیه الکترونیکی خودران با عدم قطعیت پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. در [۳۸]، کنترل پیش‌بین یک وسیله نقلیه زمینی خودران با اجتناب از مانع در جاده‌های لنزنه با کنترل پیش‌بین مدل دو سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. این الگوریتم در جاده یخی بررسی شده است. در [۳۹] برای جلوگیری از برخورد و پایدارسازی در مانور تعییر مسیر، یک کنترل فرمان اضطراری خودروی خودران مورد توجه قرار گرفته است. یک روش طراحی مسیر و سرعت برای تعییر مسیر و اجتناب از برخورد بر اساس منحنی بیزیم سه بعدی در [۴۰] پیشنهاد شد. یک طراحی سیستم اجتناب از برخورد بر اساس کنترل در [۴۱] پیشنهاد مدل با زمان نمونه برداری متفاوت در [۴۲] مورد مطالعه قرار گرفت. در [۴۲] مشکل سبقت بر اساس فرمان جلو فعال (AFS) بررسی شده و طراحی مسیر و کنترل پایداری سیستم اجتناب از برخورد مورد توجه قرار گرفت که در آن نویسنده‌گان یک مسیر فرار را برای دور زدن مانع و جلوگیری از تصادف برنامه‌ریزی می‌کنند.

- هدف این است تا تعداد متغیرهای بهینه‌سازی در طراحی مسیر-زمان کم باشد که با آن الگوریتم بهینه‌سازی دچار چالش نشود.
- الگوریتم کنترلی مورد استفاده در این مقاله ساده است و بدون پیچیدگی محاسباتی اعمال می‌شود.
- روش پیشنهادی طراحی مسیر و روش کنترل در برابر تعداد موانع انعطاف‌پذیر است.

با قیامنده این مقاله به شرح زیر سازمان یافته است:

ابتدا معادلات دینامیکی استخراج شده و سپس بیان مسأله کنترل شرح داده می‌شود. بخش بعدی شامل الگوریتم طراحی مسیر است که اجتناب از مانع و تعقیب رهبر را برآورده می‌کند. سپس الگوریتم کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل برای ریدایی مسیر مطلوب پیشنهاد می‌شود. بخش بعدی عملکرد طراحی مسیر پیشنهادی و کنترل خودرو را از طریق شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در نهایت نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- مدل‌سازی دینامیکی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است (سمت راست)، خودرو به چهار چرخ مجهز می‌باشد و اندازه، جرم و گشتاور اینرسی برای آن در نظر گرفته شده است. گشتاور فرمان و گشتاور محرک در چرخ‌های جلو دو ورودی کنترل هستند. برای به دست آوردن معادلات سینماتیکی و دینامیکی خودرو مانند، یک خودرو ساده‌شده دو چرخ (سمت چپ) به جای خودرو چهار چرخ در نظر گرفته شده است [۳]، [۵۱] و [۱۱].

در شکل ۱، θ زاویه انحراف بدنه، Φ زاویه فرمان، V سرعت چرخ جلو، m جرم خودرو، c مرکز هندسی بدنه، (x_c, y_c) موقعیت طولی و جانبی نقطه c ، d فاصله بین مرکز هندسی و دو چرخ، I_c ممان اینرسی حول c ، XY نماد سیستم مختصات اینرسی، F_1 نیروی محرکه خودرو (نیرویی که سطح جاده بر چرخ‌ها وارد می‌کند)، F_2 و F_3 نیروهای جاده هستند که به صورت عمودی بر چرخ وارد می‌شوند. در رابطه ۱۷ مرجع [۳۷] زاویه لغزش لاستیک در مدل‌سازی دینامیک خودرو لحظه شده است. لازم به ذکر است که چون در این تحقیق مانور خودرو خودران در سرعت‌های پایین انجام می‌شود (برخلاف مانورهای سرعت بالا مثل سبقت‌گیری یا تعییر خط) نیروی جانی لاستیک کوچک بوده و در نتیجه زاویه لغزش نیز کوچک و از آن در مدل‌سازی دینامیکی صرف‌نظر می‌گردد.

همچنین e_r و e_r دو بردار واحد عمود بر چرخ‌های جلو و عقب

در [۴۵-۴۳] برای عبور تعدادی ربات دوچرخ از کنار موانع، الگوریتم هایی پیشنهاد شده است ولی کنترل خودروهای چهار چرخ به مراتب دشوارتر از ربات‌های دوچرخ است. به مسأله عبور خودروی خودران در کنار تک‌مانع بسیار پرداخته شده است (همانند [۴۸-۴۶]) ولی بررسی حرکت خودروهای خودران از بین چندین مانع نیازمند بررسی‌های بیشتری است. در [۴۹] به طراحی مسیر و کنترل یک وسیله نقلیه چند محوره (مثل تریلی) به منظور عبور از بین خودروهای متحرک در یک جاده دوبانده پرداخته شده است. ولی در مقاله حاضر مسأله تعقیب یک ربات رهبر در یک محیط دو بعدی که نیازمند انجام مانورهای عمومی‌تری توسط خودرو است، بررسی می‌گردد. یکی از مهمترین مأموریت‌هایی که یک خودروی خودران باید انجام دهد، عبور از بین موانع بدون برخورد با آنها می‌باشد. در واقع این موانع می‌توانند حتی خودروهایی باشند که در اطراف خودرو متحرک وجود دارند. بنابراین مسأله عدم برخورد با موانع متعدد محدود می‌باشد. اگرچه بسیاری از کارها به تعییر مسیر و سبقت‌گیری پرداخته‌اند، داده‌های محدودی در مورد اجتناب از موانع متعدد و تعقیب رهبر در منابع موجود است. مانور اجتناب از مانع نیاز به طراحی مسیر دارد، پس از آن، مسیر توسط گشتاورهای فرمان و چرخ جلو دنبال می‌شود. روش‌های مبتنی بر چندجمله‌ای (به عنوان مثال، [۴۰-۵۰]) برای اجتناب از موانع متعدد مناسب نیستند و یک روش طراحی مسیر جدید مورد نیاز است. این مقاله یک سیستم تعقیب رهبر و یک سیستم اجتناب از موانع متعدد را برای یک وسیله نقلیه خودران ارائه می‌کند که شامل طراحی مسیر و کنترل گشتاور فرمان فعال و گشتاور چرخ‌های جلو فعال مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل است.

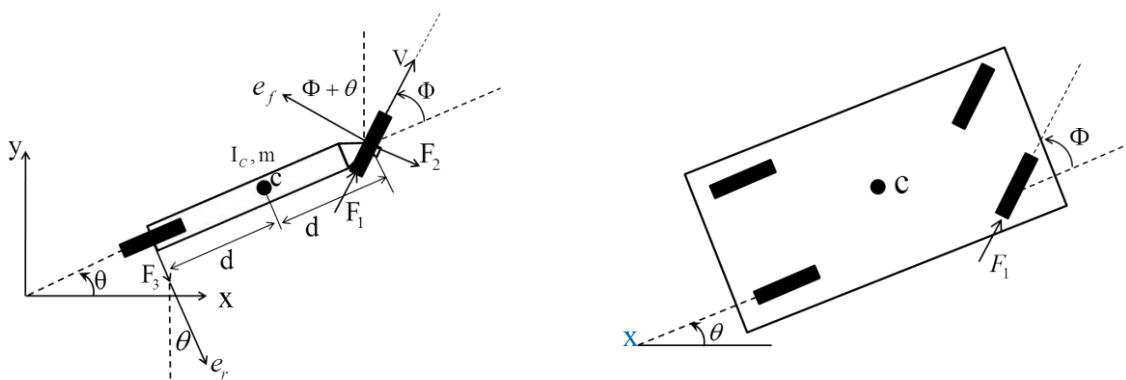
به دلیل قیدهای غیرهولونومیک، کنترل یک خودرو خودران دشوار است. در این کار، علاوه بر قید غیرهولونومیک، فرض بر این است که خودرو دارای اندازه، جرم و ممان اینرسی است که با آن مسأله کنترل مشکل خواهد بود. ورودی‌های کنترل، گشتاورهای فرمان و محرک چرخ هستند. اثرات اشباع عملگرها نیز در اینجا در نظر گرفته شده است.

مهمنترین نوآوری‌های مقاله حاضر عبارتند از:

- در این پژوهش دو الگوریتم پیشنهاد خواهد شد که بسته به شرایط محیطی، خودرو از این دو الگوریتم استفاده کند تا در صورت ضرورت بتواند حتی به عقب هم حرکت کند.
- در این کار علاوه بر طراحی مسیر^۱ طراحی مسیر-زمان^۲ جدیدی ارائه خواهد شد.

1 Path

2 Trajectory



شکل ۱. خودرو خودران (سمت راست) و خودرو ساده‌شده به صورت دو چرخ (سمت چپ)

Fig. 1. Autonomous vehicle (right) and simplified two-wheeled vehicle (left).

با استفاده از معادلات (۱)، (۲)، (۳) و (۴) قیود غیرهولونومیک روی چرخ‌های جلو و عقب به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c S\theta - \dot{y}_c C\theta + d\dot{\theta} &= 0 \\ -\dot{x}_c S(\beta) + \dot{y}_c C(\beta) + d\dot{\theta}C(\Phi) &= 0, \quad \beta = \theta + \Phi \end{aligned} \quad (5)$$

اگر این قیدهای غیرهولونومیک برآورده نشوند، حرکت خودرو غیرممکن است. با استفاده از قیود غیرهولونومیک (۵) و تعریف پارامترهای جدید، معادلات سینماتیکی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} a_1 &= C\Phi C\theta - \frac{S\theta S\Phi}{2}, \\ a_2 &= S\theta C\Phi + \frac{C\theta S\Phi}{2}, \quad a_3 = \frac{S\Phi}{2d} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= va_1 \\ \dot{y}_c &= va_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{\theta} = va_3 \quad (9)$$

هستند که با معادلات زیر توضیح داده شده‌اند.

$$\mathbf{e}_r = [S\theta, -C\theta] \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_f = [-S(\Phi + \theta), C(\Phi + \theta)]$$

S و C مخفف‌هایی هستند که به جای $\text{Sin}()$ و $\text{Cos}()$ استفاده می‌شوند. فرض بر این است که هیچ لغزشی بین چرخ‌ها و سطح جاده وجود ندارد. بنابراین، دو قید به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_f \cdot \mathbf{e}_f &= 0 \\ \mathbf{V}_r \cdot \mathbf{e}_r &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن V_f و V_r بردار سرعت چرخ‌های جلو و عقب به صورت زیر تعیین می‌شوند.

$$\mathbf{V}_r = [\dot{x}_c, \dot{y}_c] + d\dot{\theta}\mathbf{e}_r \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_f = [\dot{x}_c, \dot{y}_c] - d\dot{\theta}\mathbf{e}_r \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_4 &= S\Phi C\theta + \frac{S\theta C\Phi}{2}, \\ a_5 &= S\theta S\Phi - \frac{C\theta C\Phi}{2} \\ k_1 &= \frac{I}{dm}, \quad a_6 = a_1^2 + a_2^2 + k_1 da_3^2, \\ a_7 &= \frac{k_1 C\Phi}{2} a_3 - a_5 a_2 - a_4 a_1 \end{aligned}$$

که در آن

که در آن V سرعت چرخ جلو می‌باشد. واضح است که \dot{x}_c , \dot{y}_c و $\dot{\theta}$ به یکدیگر وابسته‌اند. توجه داشته باشید که اثر اینرسی سیستم فرمان در مقایسه با اثر میرایی آن قابل صرفنظر کردن است. رابطه بین F_1 , $\dot{\Phi}$ گشتاورهای محرك و فرمان τ'_1 و τ'_2 به صورت زیر است:

$$\dot{\Phi} = c_s \tau'_1 = \tau_1 \quad (10)$$

و در نهایت به صورت خلاصه داریم:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) \\ \mathbf{X} &= [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_8]^T, \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T \end{aligned} \quad (14)$$

۳- بیان مسئله کنترل

مسئله‌ای که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد، تعقیب رهبر در میان موانع ساکن متعدد است. در شکل ۲، یک رهبر با موقعیت (x_L, y_L) نشان داده شده است که باید توسط یک خودرو با وجود برخی موانع دنبال شود. موقعیت موانع با O_i نشان داده می‌شود. هر مانع دارای شعاع R_{obs} است و فرض بر این است که خودرو توسط دایره‌ای با شعاع R_{car} احاطه شده است. خودرو باید رهبر را تعقیب کند و در عین حال از موانع اجتناب کند. فرض بر این است که رهبر با سرعت ثابت V_L حرکت می‌کند. یک منطق طراحی مسیر مناسب برای تعقیب رهبر و اجتناب از موانع مورد نیاز است. دقیق شود که خودرو دارای جرم و ممان اینرسی است و بدیهی است که در مقایسه با مدل سینماتیکی، کنترل آن دشوارتر است.

۳-۱- طراحی مسیر

در این بخش، الگوریتم طراحی مسیر برای تعقیب رهبر و اجتناب از مانع ارائه شده است. فرض بر این است که خودرو موقعیت موانع ساکن و سرعت و موقعیت رهبر را می‌داند. در شکل ۳، مسیر مطلوب به صورت نقاط کوچک نشان داده شده است. مسیر با x_c, y_c شروع و با x_L, y_L به پایان می‌رسد، اما باید به گونه‌ای باشد که خودرو از موانع اجتناب کند. موقعیت هر نقطه را در مسیر نشان می‌دهد. در واقع مسیر گستته شده است. مسیر مطلوب با یک مسئله بهینه‌سازی به دست خواهد آمد که در

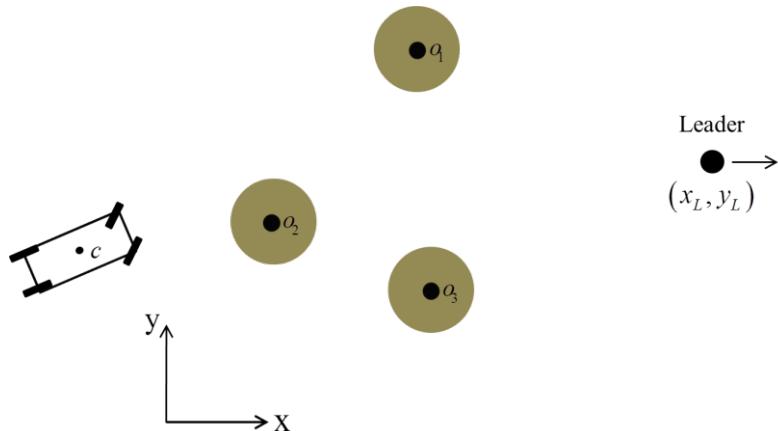
$$F_1 = \frac{\tau'_2}{r_w} = \tau_2 \quad (11)$$

که در آن r_w شعاع چرخ و c_s ضریب استهلاک فرمان می‌باشد. ورودی‌های کنترل به صورت $\dot{\Phi} = \tau_1$ و $F_1 = \tau_2$ انتخاب می‌شوند تا معادلات ساده شوند. به منظور استخراج معادلات دینامیکی خودرو، روش نیوتون-اولر در [۱] استفاده شد که معادلات فضای حالت خودرو خودران را به صورت زیر به دست آورد. با تعیین متغیرهای حالت:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_c, x_2 = \dot{x}_c, x_3 = y_c, x_4 = \dot{y}_c, \\ x_5 &= \theta, x_6 = \dot{\theta}, x_7 = v, x_8 = \Phi \end{aligned} \quad (12)$$

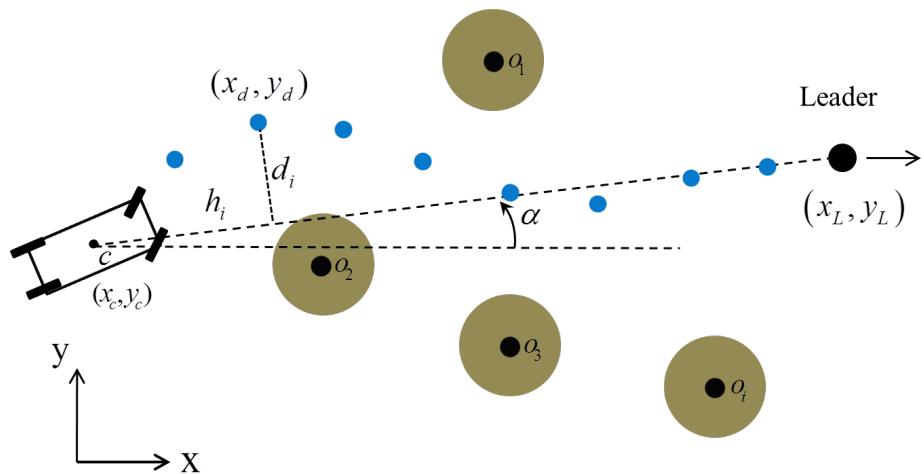
معادلات فضای حالت به صورت زیر به دست می‌آیند [۱]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -x_7^2 a_2 a_3 \\ x_4 \\ x_7^2 a_1 a_3 \\ x_6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -x_7 \left(\frac{a_1 a_7}{a_6} + a_4 \right) \\ 0 \\ -x_7 \left(\frac{a_2 a_7}{a_6} + a_5 \right) \\ 0 \\ x_7 \left(\frac{C\Phi}{2d} - \frac{a_3 a_7}{a_6} \right) \\ -\frac{x_7 a_7}{a_6} \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$



شکل ۲. یک خودرو خودران درحال تعقیب یک رهبر و عبور از موانع

Fig. 2. An autonomous vehicle following a leader and passing through obstacles.



شکل ۳. مسیر بهینه برای تعقیب رهبر و اجتناب از موانع

Fig. 3. Optimal trajectory for leader following and obstacle avoidance.

موقعیت نقطه i روی مسیر با روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} x_{d,i} &= x_c + h_i \cos(\alpha) - d_i \sin(\alpha), \quad i = 1, \dots, n_d \\ y_{d,i} &= y_c + h_i \sin(\alpha) + d_i \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (16)$$

آن d_i متغیرهای بهینه‌سازی هستند.

ابتدا بردار $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_{n_d}]$ با طول n_d به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در مسأله بهینه‌سازی تعریف می‌شوند. هدف یافتن بهترین بردار \mathbf{D} برای دنبال کردن رهبر و اجتناب از موانع است. بردار \mathbf{R}_{cl} و زاویه α به صورت زیر به دست می‌آیند:

که در آن:

$$h_i = i m, \quad m = \|\mathbf{R}_{cl}\| / (n_d + 1), \quad i = 1, \dots, n_d$$

تابع هزینه پیشنهادی که برای ارائه مسیر بهینه باید به حداقل برسد، در زیر آمده است. به منظور طراحی تابع هزینه پیشنهادی برای طراحی مسیر

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{cl} &= [x_L - x_c \quad y_L - y_c \quad 0] \\ \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{R_{cl}(2)}{R_{cl}(1)} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

۳-۲- الگوریتم کنترل

در این بخش، کنترل کننده گشتاور چرخ جلو و فرمان مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل توضیح داده شده است. کنترل پیش‌بین مدل از رفتار آینده خودرو در افق پیش‌بینی استفاده می‌کند. بر اساس پیش‌بینی آینده، یکتابع هزینه برای به دست آوردن ورودی‌های کنترل بهینه به حداقل می‌رسد.

با توجه به استراتژی کنترل افق کاهشی، ورودی کنترل اعمال شده به وسیله نقلیه اولین عنصر از سلسله ورودی کنترل بهینه محاسبه شده است. دست‌یابی به ورودی کنترل بهینه با در نظر گرفتن قیدهای فیزیکی، برتری کنترل پیش‌بین مدل نسبت به سایر روش‌های کنترل است.

بخش قبل مسیر بهینه را برای دنبال کردن رهبر و اجتناب از مانع به دست می‌آورد. در این بخش، بر اساس مسیر بهینه و روش کنترل پیش‌بین مدل، الگوریتم کنترل پیشنهاد شده است. در ابتدا طول مسیر بهینه توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{N_p} \sqrt{(x_{d,i+1} - x_{d,i})^2 + (y_{d,i+1} - y_{d,i})^2}, \quad (19)$$

$$N_p < n_d$$

که در آن N_p افق پیش‌بینی کنترل پیش‌بین مدل می‌باشد. توجه داشته باشید که در کنترل پیش‌بین مدل علاوه بر موقعیت هر نقطه روی مسیر، به سرعت مطلوب در هر نقطه از مسیر بهینه نیاز داریم. بنابراین، سرعت متوسط که سرعت مطلوب خودرو روی مسیر است، به دست می‌آید:

$$\bar{V} = \frac{S}{N_p dt} \quad (20)$$

که در آن dt گام زمانی مورد استفاده در کنترل پیش‌بین مدل می‌باشد. در واقع، بردار سرعت مطلوب در کنترل پیش‌بین مدل مورد نیاز است، بنابراین، می‌توان آن را این‌گونه محاسبه کرد:

$$\mathbf{V}_{d,i} = \bar{V} \mathbf{e}_{V,i} \quad (21)$$

شاخص‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. نقاط مختلفی که طراحی می‌شوند باید از موانع فاصله داشته باشند (عبارت $J_{i,j}$).
۲. مسیر طراحی شده نباید غیریکنواخت باشد (عبارت $((d_k - d_{k-1})^2$).
۳. ابتدای مسیر طراحی شده باید به موقعیت خودرو نزدیک باشد (عبارت $(x_{d,1} - x_{c,1})^2 + (y_{d,1} - y_{c,1})^2$).
۴. انتهای مسیر طراحی شده باید به موقعیت رهبر نزدیک باشد (عبارت $((x_{d,n_d} - x_L)^2 + (y_{d,n_d} - y_L)^2$).

$$J_{Traj} = \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_o} J_{i,j} + w_1 \sum_{k=2}^{n_d} (d_k - d_{k-1})^2 + w_2 ((x_{d,1} - x_{c,1})^2 + (y_{d,1} - y_{c,1})^2) + w_3 ((x_{d,n_d} - x_L)^2 + (y_{d,n_d} - y_L)^2) \quad (17)$$

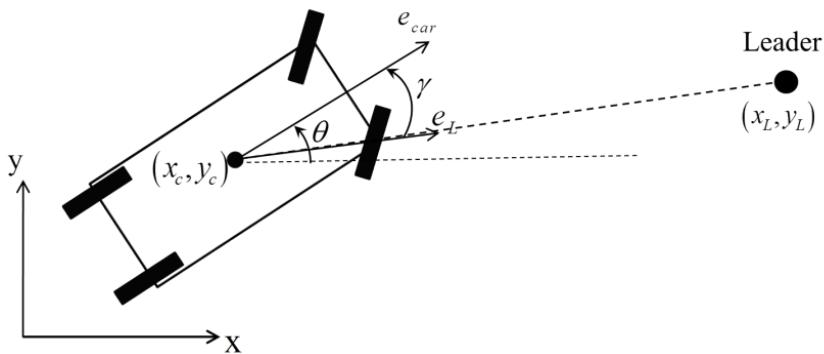
که در آن $J_{i,j}$ این‌گونه محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} R &= R_{obs} + R_{car} \\ L_{i,j} &= \sqrt{(x_{d,i} - x_{o,j})^2 + (y_{d,i} - y_{o,j})^2} \\ J_{i,j} &= \frac{1}{L_{i,j} + \epsilon} \\ \text{If } L_{i,j} < R \\ J_{i,j} &= p J_{i,j} \\ \text{end} \end{aligned}$$

که در آن، n_o تعداد موانع، $x_{o,j}$ ، $y_{o,j}$ موقعیت مانع j و ϵ یک عدد مثبت کوچک برای پیشگیری از مشکلات حل عددی می‌باشد. جمله $\sum_{k=2}^{n_d} (d_k - d_{k-1})^2$ برای دست‌یابی به یک مسیر هموار به کار گرفته می‌شود و w_1 ، w_2 و w_3 وزن‌هایی هستند که باید طراحی شوند. در نهایت، مسأله بهینه‌سازی زیر مسیر بهینه را به ما می‌دهد.

$$\mathbf{D}_{optimal} = \min_{\mathbf{D}} J_{Traj} \quad (18)$$

که در آن



شکل ۴. جهت خودرو خودران نسبت به جهت موقعیت نسبی رهبر

Fig. 4. Autonomous vehicle direction relative to the direction of leader's relative position.

۱. در افق پیش‌بین جهت‌گیری خودرو طوری کنترل یابد که به سمت نقاط مطلوب مسیر طراحی شده قرار گیرد (عبارت $\gamma_{cd,i}^2$).
۲. در افق پیش‌بین سرعت خودرو طوری کنترل شود تا یک حالتی مثل دمپینگ مجازی ایجاد گردد (عبارت $(\dot{x}_{c,i}^2 + \dot{y}_{c,i}^2)$).
۳. در افق پیش‌بین تلاش کنترلی کمینه گردد (عبارت $(w_5 \tau_{1,i}^2 + w_6 \tau_{2,i}^2)$).

$$\mathbf{e}_{V,i} = \frac{\begin{bmatrix} x_{d,i+1} - x_{d,i} & y_{d,i+1} - y_{d,i} & 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{(x_{d,i+1} - x_{d,i})^2 + (y_{d,i+1} - y_{d,i})^2}} \quad (22)$$

شکل ۴ جهت خودرو \mathbf{e}_{car} را نسبت به جهت موقعیت نسبی رهبر \mathbf{e}_L نشان می‌دهد. به طوریکه،

$$J_c = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\left(\gamma_{cd,i}^2 \right) + w_4 \left(\dot{x}_{c,i}^2 + \dot{y}_{c,i}^2 \right) \right] + \sum_{i=1}^{N_c} \left[w_5 \tau_{1,i}^2 + w_6 \tau_{2,i}^2 \right] \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{car} &= [\cos(\theta) \quad \sin(\theta) \quad 0], \\ \mathbf{e}_L &= \frac{\begin{bmatrix} x_L - x_c & y_L - y_c & 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{(x_L - x_c)^2 + (y_L - y_c)^2}}, \\ \gamma &= \cos^{-1}(\mathbf{e}_{car} \cdot \mathbf{e}_L). \end{aligned} \quad (23)$$

۹

$$\begin{aligned} \gamma_{cd,i} &= \cos^{-1}(\mathbf{e}_{car} \cdot \mathbf{e}_{cd,i}) \\ \mathbf{e}_{cd,i} &= \frac{\begin{bmatrix} x_{d,i} - x_c & y_{d,i} - y_c & 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{(x_{d,i} - x_c)^2 + (y_{d,i} - y_c)^2}} \end{aligned}$$

توجه داشته باشید که برای محاسبه γ از نقاط روی مسیر بهینه برای اجتناب از مانع استفاده می‌شود.
منطق کنترل برای $\gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_1$

در این حالت جهت خودرو برای تعقیب رهبر مناسب است. تابع هزینه مناسبی که می‌توان برای این مورد استفاده کرد به صورت زیر است که در

با توجه به مقدار γ ، از دو الگوریتم کنترل ویژه استفاده شده است که در اینجا توضیح داده شده است.
منطق کنترل برای $\gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_1$

در این حالت (به عنوان مثال $\gamma_0 = 80^\circ$ ، قبل از تعقیب رهبر، جهت خودرو باید در جهت مناسبی قرار گیرد تا به راحتی رهبر را دنبال کند. به عبارت دیگر از این الگوریتم کنترل برای کنترل سریع جهت خودرو استفاده می‌شود. در این حالت تابع هزینه‌ای که باید به حداقل برسد به صورت زیر است که در آن شاخص‌های زیر در نظر گرفته شده است:

مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل، در شبیه‌سازی اول سه مانع در موقعیت‌های

$$P_{o,3} = [-10 \quad 11] \text{ متر}, P_{o,2} = [0 \quad -5 \quad -5] \text{ متر و}$$

مترو با شعاع $R_{obs} = 2$ متر قرار داده شده‌اند و یک رهبر با موقعیت اولیه $[0 \quad 0]$ و سرعت ثابت $[3 \quad 0]$ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. شرایط

اولیه وسیله نقليه به صورت زیر انتخاب شده است:

$$x_c(0) = -25\text{m}, y_c(0) = 0, \theta(0) = -80^\circ, v(0) = 0, \Phi(0) = 0.$$

کران پایین و بالایی اجزای بردار \mathbf{D} به ترتیب -10 و 10 متر انتخاب

شده است. سایر پارامترهای خودرو، طراحی مسیر و کنترل پیش‌بین مدل در

جدول ۱ آورده شده است.

در شکل ۵، مسیر وسیله نقليه خودران که در بین سه مانع حرکت می‌کند، نشان داده شده است. وسیله نقليه با استفاده از برنامه‌ریزی مسیر پیشنهادی و طرح کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، رهبر مجازی را ردیابی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا اولین منطقه کنترلی به منظور تغییر جهت خودرو در جهت مناسب فعال می‌شود. پس از تغییر جهت خودرو، قانون کنترل دوم برای تعقیب رهبر و اجتناب از مانع فعال می‌شود. فاصله وسیله نقليه تا موانع معقول است. روش پیشنهادی در برابر تعداد موانع انعطاف‌پذیر است و برنامه‌ریزی مسیر را می‌توان برای هر تعداد مانع انجام داد.

شکل ۶ زاویه بدن و زاویه فرمان خودرو را نشان می‌دهد. قید روی زاویه فرمان برآورده می‌شود که حداقل 45 درجه است.

شکل ۷ سرعت خودرو را نشان می‌دهد. گشتاور کنترل چرخ، سرعت خودرو را تنظیم می‌کند. همان‌طور که نشان داده شده است، سرعت وسیله نقليه به سرعت رهبر 3 متر بر ثانیه همگرا می‌شود.

گشتاورهای فرمان و چرخ جلو که مورد نیاز کنترل کننده مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل می‌باشد، در شکل ۸ نشان داده شده است. اثر اشباع عملگر در این شکل قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که با وجود اشباع عملگر، سیستم حلقه بسته رفتار قابل قبولی دارد.

به منظور نشان دادن انعطاف‌پذیری الگوریتم در برابر تعداد موانع محیطی، شبیه‌سازی دوم با مختصات $(-10, 15)$ متر در شکل ۹ اضافه شده است. به شبیه‌سازی قبلی یک مانع با مختصات $(0, 10)$ متر در شکل ۹ اضافه شده است. مسیر وسیله نقليه خودران که در بین چهار مانع حرکت می‌کند، نشان داده شده است. وسیله نقليه با استفاده از برنامه‌ریزی مسیر پیشنهادی و کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، رهبر مجازی را ردیابی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاصله وسیله نقليه تا موانع معقول است. شکل ۱۰ زاویه فرمان و بدن خودرو،

آن شاخص‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. در افق پیش‌بین اختلاف بین موقعیت خودرو و نقاط مسیر

$$\text{طراحی شده حداقل گردد} \quad (\text{عبارت}) \quad ((x_{d,i} - x_{c,i})^2 + (y_{d,i} - y_{c,i})^2).$$

۲. در افق پیش‌بین اختلاف بین سرعت خودرو و سرعت مسیر

$$\text{طراحی شده حداقل گردد} \quad (\text{عبارت}) \quad ((V_{d,i}(1) - \dot{x}_{c,i})^2 + (V_{d,i}(2) - \dot{y}_{c,i})^2).$$

۳. در افق پیش‌بین تلاش کنترلی کمینه گردد (عبارت

$$(w_8 \tau_{1,i}^2 + w_9 \tau_{2,i}^2).$$

$$J_c = \sum_{i=1}^{N_p} \left[\begin{aligned} & ((x_{d,i} - x_{c,i})^2 + (y_{d,i} - y_{c,i})^2) \\ & + w_7 ((V_{d,i}(1) - \dot{x}_{c,i})^2 \\ & + (V_{d,i}(2) - \dot{y}_{c,i})^2) \\ & + \sum_{i=1}^{N_c} [w_8 \tau_{1,i}^2 + w_9 \tau_{2,i}^2] \end{aligned} \right] \quad (25)$$

در نهایت، برای به دست آوردن ورودی‌های کنترلی بهینه، مسأله بهینه‌سازی زیر باید حل شود:

$$\tau_{optimal} = \min_{\tau} J_c \quad (26)$$

نسبت به

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(i+1) &= \mathbf{f}(\mathbf{X}(i), \tau) dt + \mathbf{X}(i) \\ |\tau_1| &\leq \tau_{1,\max}, \\ |\tau_2| &\leq \tau_{2,\max}, \\ |\Phi| &\leq \Phi_{\max}. \end{aligned} \quad (27)$$

که در آن $\tau_{1,\max}$ و $\tau_{2,\max}$ گشتاورهای ماکزیمم و Φ_{\max} زاویه ماکزیمم فرمان هستند.

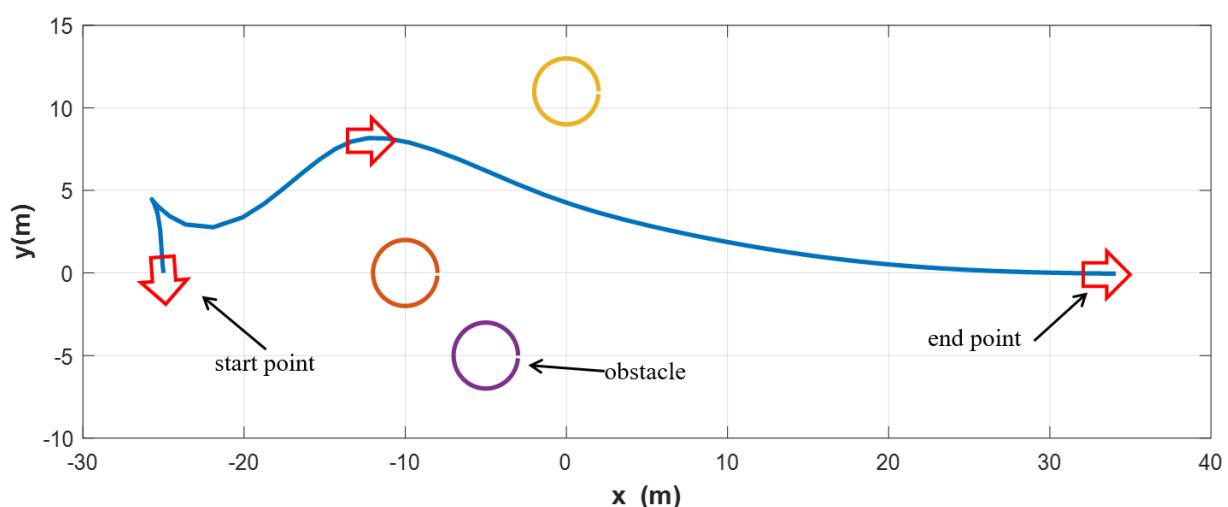
۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد روش طراحی مسیر پیشنهادی با کنترل کننده

جدول ۱. پارامترهای کنترل کننده و خودرو استفاده شده در شبیه‌سازی

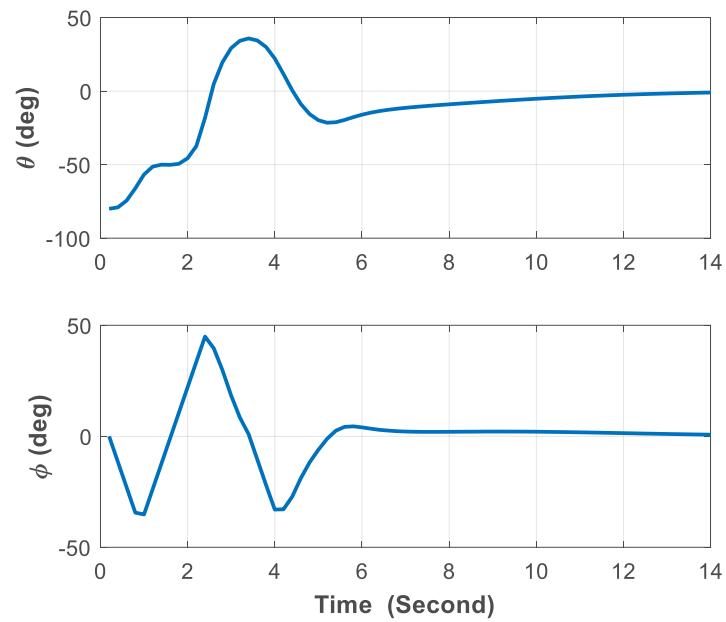
Table 1. Vehicle and controller parameters used in the simulations.

مقدار	نماد	مقدار	نماد
۱۰۰	$m(\text{kg})$	۲	$d(\text{m})$
۴۰۰	$I_c(\text{kgm}^2)$	۰/۲	$dt(\text{s})$
۱۵	n_d	۳	n_o
۸	N_p	۴	N_c
۱	$\tau_{1,\max}(\text{N})$	۳۰۰۰	$\tau_{2,\max}(\text{N})$
۳	$V_L(\text{m/s})$	۰/۱	ε
۰/۵	w_1	۱	w_2
۱	w_3	۰/۱	w_4
۰	w_5	۰	w_6
۰	w_7	۱	w_8
۱	w_9	۱۰۰	p
۴	$R_{\text{car}}(\text{m})$		



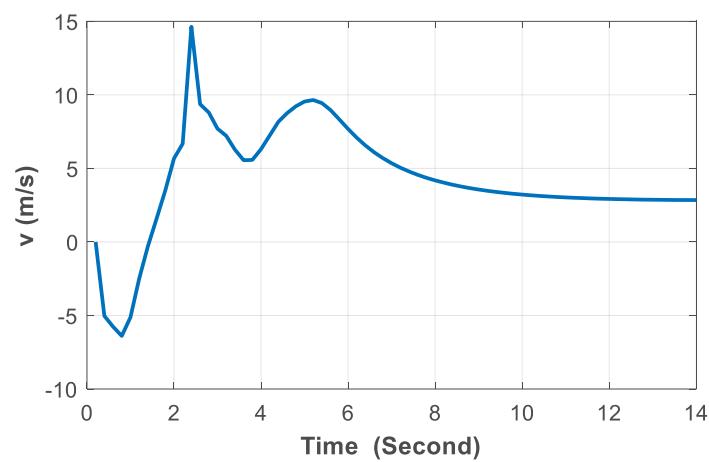
شکل ۵. مسیر خودرو خودران در حال عبور از موانع متعدد

Fig. 5. The trajectory of the autonomous vehicle moving among the multiple obstacles.



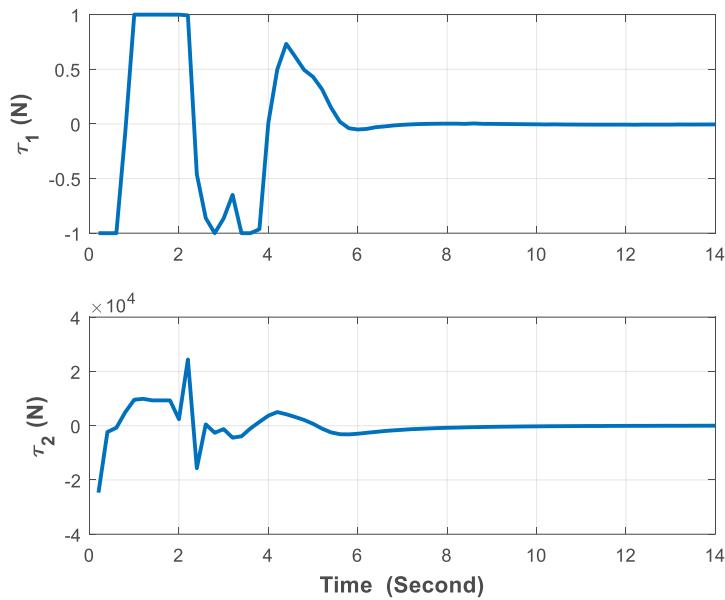
شکل ۶. پاسخ زمانی زاویه بدن خودرو و زاویه فرمان

Fig. 6. The time response of the vehicle body angle and steering angle.



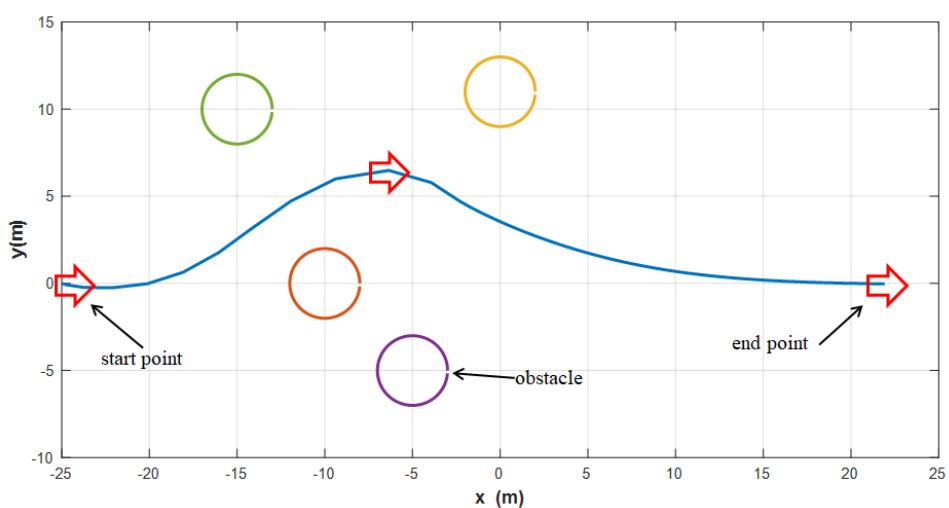
شکل ۷. پاسخ زمانی سرعت خودرو

Fig. 7. The vehicle's velocity time response.



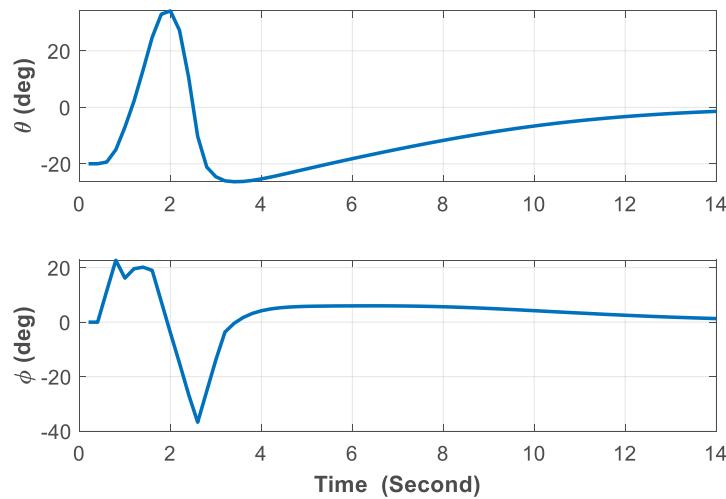
شکل ۸. گشتاورهای فرمان و چرخ جلوی خودرو

Fig. 8. The vehicle's front wheel and steering wheel torques.



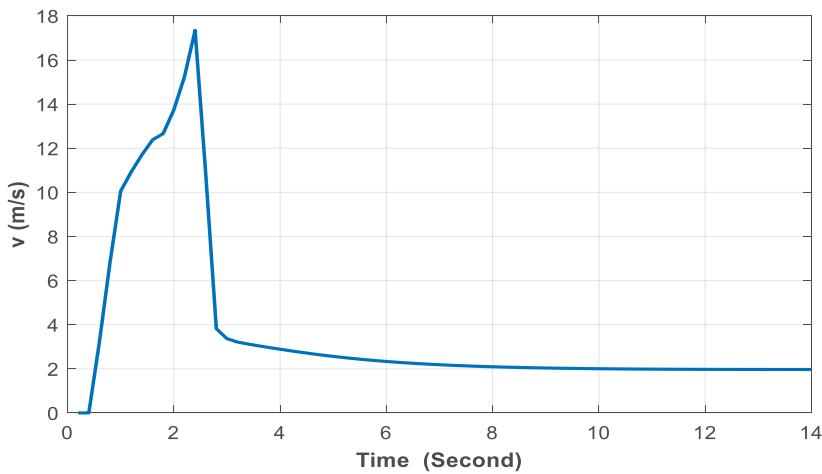
شکل ۹. مسیر خودرو خودران در حال عبور از موانع متعدد

Fig. 9. The trajectory of the autonomous vehicle moving among the multiple obstacles.



شکل ۱۰. پاسخ زمانی زاویه بدن خودرو و زاویه فرمان

Fig. 10. The time response of the vehicle body angle and steering angle.



شکل ۱۱. پاسخ زمانی سرعت خودرو

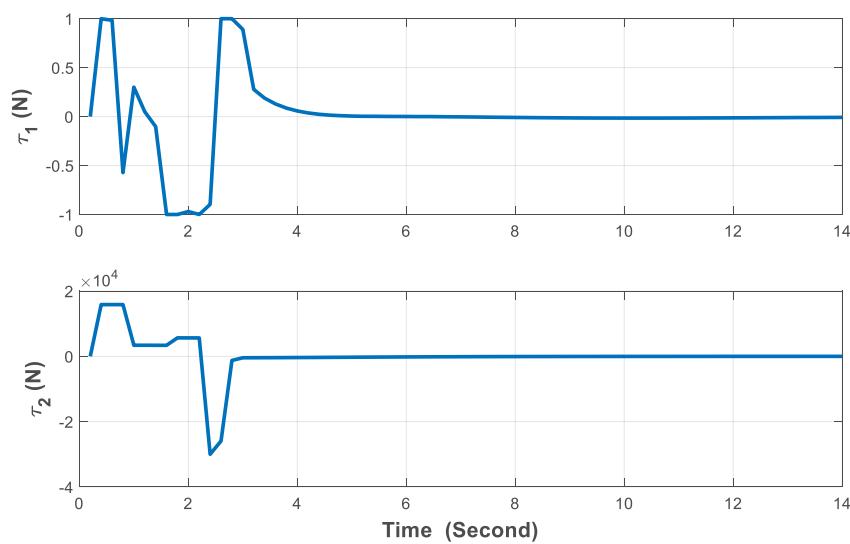
Fig. 11. The vehicle's front wheel and steering wheel torques.

نوآوری این مقاله محسوب می‌گردد. یکی از مزیت‌های روش طراحی مسیر-زمان پیشنهادی نسبت به روش‌های قبلی این است که تعداد متغیرهای بهینه‌سازی در طراحی مسیر کم بوده که با آن الگوریتم بهینه‌سازی دچار چالش نمی‌شود. در روش‌های قبلی از چند جمله‌ای‌ها به منظور طراحی مسیر استفاده شده است که مهمترین کاستی آنها احتمال تداخل مسیر با موانع است ولی در کار حاضر هیچ قیدی بین نقاط مختلف مسیر وجود ندارد و مسیر می‌تواند از بین هر تعداد دلخواه مانع و بدون برخورد با آنها از بین آنها عبور نماید.

شکل ۱۱ سرعت خودرو، شکل ۱۲ گشتاور فرمان و چرخ جلوی خودرو را نشان می‌دهد که قیود فیزیکی حاکم بر مسأله را برآورده نموده‌اند.

در بسیاری از روش‌های قبلی یک الگوریتم وجود دارد که خودرو را کنترل می‌کند ولی در این پژوهش دو الگوریتم پیشنهاد شده است که بسته به فاز حرکتی خودرو از یکی از این دو الگوریتم استفاده می‌شود تا خودرو در صورت ضرورت بتواند حتی به عقب هم حرکت کند. در این کار علاوه بر طراحی مسیر، طراحی مسیر-زمان نیز انجام شده است که از جنبه‌های

-
- | | |
|---|------------|
| 1 | Path |
| 2 | Trajectory |



شکل ۱۲. گشتاورهای فرمان و چرخ جلوی خودرو

Fig. 12. The vehicle's front wheel and steering wheel torques.

منابع

- [1] H. Sayyaadi, H. Kouhi, H. Salarieh, Control of car-like (wheeled) multi robots for following and hunting a moving target, *Scientia Iranica*, 18(4) (2011) 950-965.
- [2] J.-P. Laumond, P.E. Jacobs, M. Taix, R.M. Murray, A motion planner for nonholonomic mobile robots, *IEEE Transactions on robotics and automation*, 10(5) (1994) 577-593.
- [3] A. Bemporad, A. De Luca, G. Oriolo, Local incremental planning for a car-like robot navigating among obstacles, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1996, pp. 1205-1211.
- [4] T. Shim, G. Adiredy, H. Yuan, Autonomous vehicle collision avoidance system using path planning and model-predictive-control-based active front steering and wheel torque control, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering*, 226(6) (2012) 767-778.
- [5] J. Wurts, J.L. Stein, T. Ersal, Collision imminent steering at high speed using nonlinear model predictive control,

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از معادله دینامیکی خودرو خودران به جای مدل سینماتیک استفاده شده است. علاوه بر مدل دینامیکی، محدودیت فرمان، اشباع عملگر و قیدهای غیرهولونومیک مسئله کنترل را دشوار می‌کند.

برای تغییر جهت خودرو برای تعقیب رهبر، یک الگوریتم کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان از الگوریتم تغییر جهت در عمل استفاده کرد. یک روش جدید طراحی مسیر برای تعقیب رهبر و اطمینان از جلوگیری از برخورد پیشنهاد شده است. مسیر طراحی شده از هر دو موقعیت مطلوب و سرعت مطلوب تشکیل شده است که باید با استفاده از منطق کنترل دنبال شود. روش پیشنهادی ابتدا از طراحی مسیر و سپس از یک کنترل پیش‌بین مدل برای دنبال کردن مسیر مرجع استفاده کرد.

اگرچه قیدهای فیزیکی مانند اشباع عملگر وجود دارد، اما سیستم حلقه بسته عملکرد مناسبی دارد و تعقیب رهبر با اجتناب از موانع به خوبی انجام شده است. روش پیشنهادی طراحی مسیر و روش کنترل در برابر تعداد موانع انعطاف‌پذیر است. روش پیشنهادی قابل اجرا و پیاده‌سازی است، بنابراین هدف مقاله محقق می‌شود.

- Autonomous Systems, 60(9) (2012) 1123-1134.
- [15] A. Swief, A. El-Zawawi, M. El-Habrouk, A Survey of Model Predictive Control Development in Automotive Industries, in: 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID), IEEE, 2019, pp. 1-7.
- [16] H. Guo, J. Liu, D. Cao, H. Chen, R. Yu, C. Lv, Dual-envelop-oriented moving horizon path tracking control for fully automated vehicles, Mechatronics, 50 (2018) 422-433.
- [17] D. Yang, S. Zheng, C. Wen, P.J. Jin, B. Ran, A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 95 (2018) 228-247.
- [18] S. Dixit, S. Fallah, U. Montanaro, M. Dianati, A. Stevens, F. McCullough, A. Mouzakitis, Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects, Annual Reviews in Control, 45 (2018) 76-86.
- [19] V.T. Minh, Nonlinear Model Predictive Controller and Feasible Path Planning for Autonomous Robots, Open Computer Science, 6(1) (2016) 178-186.
- [20] J. Pumwa, Time Variant Predictive Control of Autonomous Vehicles: Time Variant Predictive Control of Autonomous Vehicles, International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences, 2(1) (2019) 62-77.
- [21] V.T. Minh, R. Moezzi, K. Dhoska, J. Pumwa, Model Predictive Control for Autonomous Vehicle Tracking, International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences, 4(1) (2021) 560-603.
- [22] H. Yuan, X. Sun, T. Gordon, Unified decision-making and control for highway collision avoidance using active front steer and individual wheel torque control, Vehicle system dynamics, 57(8) (2019) 1188-1205.
- [23] Y. Gao, T. Gordon, M. Lidberg, Optimal control of brakes and steering for autonomous collision avoidance using modified Hamiltonian algorithm, Vehicle system dynamics, 57(8) (2019), 1224-1240.
- IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(8) (2020) 8278-8289.
- [6] K. Kanjanawaniskul, Motion control of a wheeled mobile robot using model predictive control: A survey, Asia-Pacific Journal of Science and Technology, 17(5) (2012) 811-837.
- [7] H. Chen, H.a. Yang, X. Wang, T. Zhang, Formation control for car-like mobile robots using front-wheel driving and steering, International Journal of Advanced Robotic Systems, 15(3) (2018) 1729881418778228.
- [8] C. Choi, Y. Kang, Simultaneous braking and steering control method based on nonlinear model predictive control for emergency driving support, International Journal of Control, Automation and Systems, 15(1) (2017) 345-353.
- [9] C. Hu, L. Zhao, L. Cao, P. Tjan, N. Wang, Steering control based on model predictive control for obstacle avoidance of unmanned ground vehicle, Measurement and Control, 53(3-4) (2020) 501-518.
- [10] F. Borrelli, P. Falcone, T. Keviczky, J. Asgari, D. Hrovat, MPC-based approach to active steering for autonomous vehicle systems, International journal of vehicle autonomous systems, 3(2-4) (2005) 265-291.
- [11] V. Turri, A. Carvalho, H.E. Tseng, K.H. Johansson, F. Borrelli, Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads, in: 16th international IEEE conference on intelligent transportation systems (ITSC 2013), IEEE, 2013, pp. 378-383.
- [12] F. Yakub, Y. Mori, Comparative study of autonomous path-following vehicle control via model predictive control and linear quadratic control, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering, 229(12) (2015) 1695-1714.
- [13] H. Yoshida, S. Shinohara, M. Nagai, Lane change steering manoeuvre using model predictive control theory, Vehicle System Dynamics, 46(S1) (2008) 669-681.
- [14] V. Sezer, M. Gokasan, A novel obstacle avoidance algorithm: "Follow the Gap Method", Robotics and

- [33] J. Park, D. Kim, Y. Yoon, H. Kim, K. Yi, Obstacle avoidance of autonomous vehicles based on model predictive control, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 223(12) (2009) 1499-1516.
- [34] G. Yin, J. Li, X. Jin, C. Bian, N. Chen, Integration of motion planning and model-predictive-control-based control system for autonomous electric vehicles, Transport, 30(3) (2015) 353-360.
- [35] J. Kim, K. Jo, K. Chu, M. Sunwoo, Road-model-based and graph-structure-based hierarchical path-planning approach for autonomous vehicles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 228(8) (2014) 909-928.
- [36] H. Cao, X. Song, Z. Huang, L. Pan, Simulation research on emergency path planning of an active collision avoidance system combined with longitudinal control for an autonomous vehicle, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering, 230(12) (2016) 1624-1653.
- [37] L. Xu, W. Zhuang, G. Yin, G. Li, C. Bian, Robust overtaking control of autonomous electric vehicle with parameter uncertainties, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering, 233(13) (2019) 3358-3376.
- [38] Y. Gao, T. Lin, F. Borrelli, E. Tseng, D. Hrovat, Predictive control of autonomous ground vehicles with obstacle avoidance on slippery roads, in: Dynamic systems and control conference, 2010, pp. 265-272.
- [39] X. He, Y. Liu, C. Lv, X. Ji, Y. Liu, Emergency steering control of autonomous vehicle for collision avoidance and stabilisation, Vehicle system dynamics, 57(8) (2019) 1163-1187.
- [40] L. Chen, D. Qin, X. Xu, Y. Cai, J. Xie, A path and velocity planning method for lane changing collision avoidance of intelligent vehicle based on cubic 3-D Bezier curve, Advances in Engineering Software, 132 (2019) 65-73.
- [41] W. Xue, L. Zheng, Active Collision Avoidance System Design Based on Model Predictive Control with Varying
- [24] C. Li, J. Wang, X. Wang, Y. Zhang, A model based path planning algorithm for self-driving cars in dynamic environment, in: 2015 chinese automation congress (CAC), IEEE, 2015, pp. 1123-1128.
- [25] J. Ji, A. Khajepour, W.W. Melek, Y. Huang, Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66(2) (2016) 952-964.
- [26] U. Rosolia, S. De Bruyne, A.G. Alleyne, Autonomous vehicle control: A nonconvex approach for obstacle avoidance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 25(2) (2016) 469-484.
- [27] X. Du, K.K.K. Htet, K.K. Tan, Development of a genetic-algorithm-based nonlinear model predictive control scheme on velocity and steering of autonomous vehicles, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63(11) (2016) 6970-6977.
- [28] M.A. Abbas, R. Milman, J.M. Eklund, Obstacle avoidance in real time with nonlinear model predictive control of autonomous vehicles, Canadian journal of electrical and computer engineering, 40(1) (2017) 12-22.
- [29] S. Cheng, L. Li, H.-Q. Guo, Z.-G. Chen, P. Song, Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21(6) (2019) 2376-2385.
- [30] A.S.P. Singh, O. Nishihara, Minimum resultant vehicle force optimal state feedback control for obstacle avoidance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 28(5) (2019) 1846-1861.
- [31] Q. Wu, W.-D. Liu, S.-Y. Guo, S. Cheng, S.-J. Li, H.-W. Liang, Z.-J. Liu, Research on Lane-Change Strategy With Real-Time Obstacle Avoidance Function, IEEE Access, 8 (2020) 211255-211268.
- [32] M. Li, X. Song, H. Cao, Z. Huang, Shared steering control combined with driving intention for vehicle obstacle avoidance, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of automobile engineering, 233(11) (2019) 2791-2808.

- [47] H. Wang, B. Liu, Path planning and path tracking for collision avoidance of autonomous ground vehicles, IEEE Systems Journal, 16(3) (2021) 3658-3667.
- [48] X. Zhang, W. Zhang, Y. Zhao, H. Wang, F. Lin, Y. Cai, Personalized motion planning and tracking control for autonomous vehicles obstacle avoidance, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 71(5) (2022) 4733-4747.
- [49] Z. Li, J. Li, Y. Li, An Integrated Path Planning Framework for Multi-Obstacle Avoidance of the Multi-Axle Autonomous Vehicle with Enhanced Safety and Stability, IEEE Transactions on Vehicular Technology, (2023).
- [50] H. Kouhi, A. Moradi, Multiple-Vehicle Cooperative Autonomous Parking Trajectory Planning Using Connected Fifth Degree Polynomials and Genetic Algorithm Optimization, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, (2024).
- [51] D. Feng, B.H. Krogh, Satisficing feedback strategies for local navigation of autonomous mobile robots, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 20(6) (1990) 1383-1395.
- [42] C. Wnag, W. Zhao, Z. Xu, G. Zhou, Path planning and stability control of collision avoidance system based on active front steering, Science China Technological Sciences, 60(8) (2017) 1231-1243.
- [43] G. Xia, X. Xia, X. Sun, Formation control with collision avoidance for underactuated surface vehicles, Asian Journal of Control, 24(5) (2022) 2244-2257.
- [44] D. Xue, D. Wu, A.S. Yamashita, Z. Li, Proximal policy optimization with reciprocal velocity obstacle based collision avoidance path planning for multi-unmanned surface vehicles, Ocean Engineering, 273 (2023) 114005.
- [45] X. Li, Z. Xu, S. Li, Z. Su, X. Zhou, Simultaneous obstacle avoidance and target tracking of multiple wheeled mobile robots with certified safety, IEEE transactions on cybernetics, 52(11) (2021) 11859-11873.
- [46] Z. Zhang, L. Zheng, Y. Li, P. Zeng, Y. Liang, Structured road-oriented motion planning and tracking framework for active collision avoidance of autonomous vehicles, Science China Technological Sciences, 64(11) (2021) 2427-2440.

چگونه به این مقاله ارجاع دهید

H. Kouhi, E. Salahshoor, Leader Following and Multiple Obstacle Avoidance of Autonomous Vehicle with Steering-Wheel and Driving-Wheel Torques Using Path Planning and Model Predictive Control, Amirkabir J. Mech Eng., 55(12) (2024) 1465-1482.

DOI: [10.22060/mej.2024.22517.7638](https://doi.org/10.22060/mej.2024.22517.7638)

