

# Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(8) (2022) 353-356 DOI: 10.22060/mej.2022.20809.7321

# Head-on Collision Avoidance Path Planning with Model Predictive Control

M. Abdollahi Nia, A. Ghaffari\*, S. Azadi

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: Due to the high fatalities of head-on accidents, the design of intelligent systems to prevent such severe collisions is essential. In this study, path planning for head-on collision avoidance with a deviated vehicle from the opposite lane has been investigated. The main approach is based on a model predictive controller with 2 seconds of prediction horizon and a linearized prediction model with low errors near the operational conditions. A conservative method is used for lateral motion prediction of the deviated vehicle and based on that, the collision avoidance constraints of the model predictive planner are simply modeled by a new approach. Moreover, a novel method to choose the proper swerve direction of evasive maneuver is proposed. This method is based on keeping the ego vehicle away from dangerous directions and has different criteria for far and close encounters. The final algorithm is capable to control the steering of the prediction model with a constrained lateral acceleration and calculates safe and maneuverable paths for the aforementioned scenario. Four simulations are conducted to validate the algorithm in far and close encountering, and critical conditions of choosing swerve direction. Results show the robustness of the path planner, even to sudden deviations at close distances and with high lateral accelerations.

#### **Review History:**

Received: Nov. 26, 2021 Revised: Feb. 25, 2022 Accepted: Jun. 27, 2022 Available Online: Jul. 13, 2022

#### **Keywords:**

Head-on collision avoidance Path planning Model predictive control Constrained optimization

### **1-Introduction**

Over the last decade, the development of perception systems, data fusion, and electromechanical actuators in the automotive industry, has paved the way for emerging of intelligent collision avoidance systems for critical situations. One of these situations is facing a deviated vehicle on a twoway road which can cause a severe head-on collision (Fig. 1). Almost 10 percent of global road fatalities are due to such accidents

The key aspect of collision avoidance systems focuses on planning real-time, safe, and maneuverable paths. Among different approaches of path planning for intelligent vehicles, compared and classified in [1], methods based on optimization and Model Predictive Control (MPC) can deal with challenges like constraints, moving obstacles, smoothness of paths, and uncertainties and have been adopted in many recent studies.

For MPC path planners, different prediction models have been considered in the literature. Some researchers use simple point-mass models which cannot properly emulate the vehicle's motion, especially at high speeds and severe maneuvers [2]. In the second group, linearized kinematic [3, 4] or dynamic [5,6] models of vehicles are used with satisfactory results and high computational efficiencies. The final group of studies uses nonlinear kinematic or dynamic vehicle models which are more precise, but impose a high





computational burden and may need the reduction of prediction horizon or increase of sampling time [7, 8].

The main challenge of using MPC as a path planner in evasive maneuvers is to define collision avoidance constraints and three common approaches exist. The first approach which is more common consists of using linear constraints to decompose a non-convex region into convex sub-regions around the obstacles and solve the optimization problem in those sub-regions [2, 4, 6]. The second approach uses potential fields with the challenge of choosing suitable functions to precisely define the boundary of obstacles [3, 5]. The third approach uses distance functions to define nonlinear and non-convex constraints with high computational costs [7, 8]. Despite high fatalities of head-on collisions, the design of intelligent systems to avoid or mitigate such accidents has

\*Corresponding author's email: ghaffari@kntu.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. 2. Collision avoidance constraints on future lateral positions of ego vehicle.



Fig. 3. Suitable swerve direction with respect to the motion line of the threat vehicle.

not yet been investigated and almost all researches in the field of collision avoidance are focused on avoiding rear-end collisions, pedestrians, and stationary obstacles on one way roads. So in the present study, an MPC path planner with a linear kinematic prediction model is designed, capable of calculating safe and maneuverable paths to avoid a headon accident with a deviated vehicle from the opposite lane. Dealing with high uncertainty in the future motion of the threat vehicle is challenging and two novel approaches are investigated to choose a safe swerve direction and define linear collision avoidance constraints for this problem.

### 2- Methodology

### 2-1-MPC algorithm

A linear kinematic bicycle model of vehicle [3,4] is considered and the following discretized state space model is used as the prediction model of MPC:

$$A_{d} = \begin{bmatrix} 1 & VT_{s} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_{d} = \begin{bmatrix} \frac{(VT_{s})^{2}}{L} \\ \frac{VT_{s}}{L} \end{bmatrix}, \quad C_{d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1)

The model input is the angle of the front wheel and the state vector consists of lateral deviation and the heading angle of the ego vehicle with respect to the center line of the road. From Eq. (1), the sequence of future outputs and errors of the system can be simply derived, up to the prediction horizon and the quadratic cost function:

$$J = \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}}^{T} W_{e} \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}} + \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}^{T} W_{u} \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$$
(2)

Can be defined. In Eq. (2), by rewriting the error vector based on future inputs, the constrained optimization problem can be formulated as follow:

$$\min_{\mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}}} \ \frac{1}{2} \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}}^{\mathsf{T}} H \, \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} + f^{\mathsf{T}} \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} , \quad st. \begin{cases} A \cdot \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} \leq b \\ lb \leq \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} \leq ub \end{cases}$$
(3)



Fig. 4. Sensitivity of direction algorithm and two distinct paths for two close initial Conditions.



Fig. 5. Robustness of path planner to a sudden return with 0.7g lateral acceleration at a very close distance.

With inequality constraints on inputs/states and constraining lateral acceleration with bounds of inputs.

#### 2-2-Collision avoidance constraints

At each time step, first, a conservative motion prediction of the threat vehicle is calculated with a time horizon of 0.7 seconds and maximum lateral acceleration of  $\pm 0.7g$ . Then, the sample number of probable collisions ( $N_{col}$ ) is estimated, and the lateral positions of the ego vehicle around the sample  $N_{col}$ are constrained to be outside of lateral space, occupied by the threat vehicle in 0.7 seconds (Fig. 2). If the estimated Time To Collision (TTC) is less than 0.7 second, the prediction horizon of threat vehicle reduces to TTC.

#### 2-3-Swerve direction algorithm

To choose the suitable swerve direction of evasive maneuver, it is suggested that the future feasible positions of the ego vehicle, get farther from the motion line of the threat vehicle. Two sequences of feasible positions, limited by the lateral acceleration of  $\pm 0.7g$  for 1 second, are calculated for the ego vehicle and compared with each other, considering the motion line of the threat vehicle. Fig. 3 shows half of the possible cases for this approach.

#### **3- Results and Discussion**

To evaluate the performance of the system, two simulations are conducted, both simulating a close encounter with a relative distance of 45 meters at the beginning.

In the first simulation, the sensitivity of the direction algorithm is assessed. In this scenario, the threat vehicle enters the ego's lane with a lateral acceleration of 0.35g, and the path of the threat vehicle and relative positions, make a critical case that puts the direction algorithm in a boundary situation. With a few centimeters of change in the initial lateral position of the threat vehicle, the direction algorithm can distinguish the difference and the planner can calculate

separate paths to left and right for each initial condition (Fig. 4).

In the second simulation, the robustness of the path planner to severe direction change of threat vehicle at a very close distance is assessed. In this scenario, threat vehicle enters the ego's lane, same way as first simulation. But when the relative distance is around 22 meters, it suddenly returns to its lane with 0.7g lateral acceleration (Fig. 5, maneuver B).

### **4-** Conclusions

The present study is focused on using linear MPC as a path planner for head-on collision avoidance. Dealing with high uncertainty in threat vehicle's motion is challenging and novel approaches are investigated to choose a safe swerve direction and define linear collision avoidance constraints for the problem. Simulation results show the robustness of the algorithm to sudden and highly accelerated (0.7g) deviations of threat vehicles, at very close distances. Moreover, the algorithm has a high sensitivity to choose suitable swerve direction and can calculate distinct safe paths to the left or right of the obstacle, with small changes in initial conditions.

### References

- [1] S. Dixit, S. Fallah, U. Montanaro, M. Dianati, A. Stevens, F. Mccullough, A. Mouzakitis, Trajectory planning & tracking for autonomous overtaking: state of the art and future prospects, Annual Reviews in Control, 45 (2018) 76-86.
- [2] J. Nilsson, P. Falcone, M. Ali, J. Sjoberg, Receding horizon maneuver generation for automated highway

driving, Control Engineering Practice, 41 (2015) 124-133.

- [3] T. Idman, Path Planning and Trajectory Generation Model Predictive Control, PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, (2019).
- [4] S. Dixit, U. Montanaro, M. Dianati, D. Oxtoby, T. Mizutani, A. Mouzakitis, S. Fallah, Trajectory planning for autonomous high-speed overtaking in structured environments using robust MPC, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21(6) (2020) 2310-2323.
- [5] Y. Rasekhipour, A. Khajepour, S.K. Chen, B. Litkouhi, A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 18(5) (2016) 1255-1267.
- [6] R. Hajiloo, M. Abroshan, A. Khajepour, A. Kasaiezadeh, S.K. Chen, Integrated steering and differential braking for emergency collision avoidance in autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(5) (2020) 3167-3178.
- [7] M. Obayashi, G. Takano, Real-time autonomous car motion planning using NMPC with approximated problem considering traffic environment, International Federation of Automatic Control, (2018) 279-286.
- [8] J. Palatti, A. Aksjonov, G.Alcan, V.Kyrki, Planning for safe abortable overtaking maneuvers in autonomous driving, 2021 IEEE ITSC, (2021).

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Abdollahi Nia, A. Ghaffari, S. Azadi, Head-on Collision Avoidance Path Planning with Model Predictive Control, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 353-356.



DOI: 10.22060/mej.2022.20809.7321

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۸، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۷۳۷ تا ۱۷۶۰ DOI: 10.22060/mej.2022.20809.7321

# طراحی مانور اجتناب از برخورد با خودروی منحرف مسیر مخالف به کمک کنترل پیش بین

مسعود عبداللهی نیا، علی غفاری\*، شهرام آزادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاريخچه داوری:	<b>خلاصه:</b> انحراف به چپ در مسیرهای دوطرفه، از شرایط حساسی است که می تواند سبب برخورد شدید خودروها از روبرو شود. بدلیل
دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۵	تلفات زیاد این تصادفات، ارائهی سیستمهای هوشمند هدایت خودرو در چنین شرایطی ضرورت دارد و مورد توجه نبوده است. مقالهی
بارىخرى: ۲۰۰/۱۱/۰۶ ىذىرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶	حاضر، به طراحی مسیر ایمن و مانورپذیر عدم برخورد با خودروی منحرفی از مسیر روبرو میپردازد. رویکرد اصلی، استفاده از کنترل
پ یر ک ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲	پیشبین با افق ۲ ثانیه و مدل پیشبین خطی است که حول شرایط کاری، تطابق خوبی با رفتار غیرخطی دارد. برای پیشبینی حرکت
کلمات کلیدی:	خودروی مهاجم، رویکردی محافظه کارانه مدنظر است و حرکت تا افق ۰/۷ ثانیه، با شتاب جانبی بالایی در دو جهت مدل میشود. برای
انحاف به جب	عدم برخورد خودروها، روش نوینی براساس فضاهای اشغالی آیندهی خودروی مهاجم ارائه شده، قیدهای اجتناب از برخورد بسادگی
احتناب از برخورد	مدلسازی میشوند. همچنین برای تشخیص جهت مناسب مانور اجتنابی، الگوریتمی نوأورانه ارائه شده که در تقابل دور و نزدیک
م طراحہ میں	خودروها، معیارهای مختلفی دارد. مجموعهی نهایی، با کنترل فرمان پذیری مدل پیش بین، مسیر مرجع ایمن خودرو را با شتاب جانبی
کنتیا دیشہ دین	مقید تولید می کند. ارزیابی مجموعهی نهایی با چهار شبیهسازی صورت می گیرد که تقابل دور و نزدیک و شرایط بحرانی انتخاب جهت
ىيىنەسازى مقىد	را مدل میکنند. نتایج، واکنش مناسب الگوریتم را به تغییر جهتهای ناگهانی و شدید خودروی مهاجم نشان میدهد.

#### ۱ – مقدمه

آمار بالای تلفات و مصدومین رانندگی و سهم بیش از ۹۰ درصدی خطای انسانی در تصادفات [۱ و ۲]، محرک اصلی توسعه یخودروهای خودران و سیستمهای پیشرفته ی کمکراننده است. در دهه ی اخیر، توسعه ی سیستمهای چندسنسوری و ترکیب دادهها<sup>۲</sup>، دقت تشخیص محیط را بهبود داده و توسعه ی عملگرهای برقی خودرو، امکان محول کردن هدایت خودرو به سیستمهای هوشمند را فراهم می کند. بر همین اساس، سیستمهای فوشمند اجتناب از تصادف<sup>۳</sup> در حال توسعه ی روزافزون هستند [۳]. یکی از شرایط بسیار حساس رانندگی، برخورد خودروها از روبرو<sup>۴</sup> است که تنها در کشور آمریکا، منجر به مرگ بیش از ۲۵۰۰ نفر در سال می شود و سهم حدودا

3 Collision Avoidance Systems 4 Head-on collision

حقوق مؤلفین به نویسندگان 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.

از جمله ایران، این سهم بالاتر نیز میباشد. لذا طراحی سیستمهای هوشمند برای جلوگیری از این برخوردها ضرورت دارد و در پژوهشهای این حوزه، تقریباً مورد توجه نبوده است.

طراحی مسیرهای ایمن و مانورپذیر، اهمیت بالایی در هدایت خودروهای هوشمند دارد و ضرورت بی درنگ بودن محاسبات و تعریف قیدهای اجتناب از برخورد، از مهمترین چالشهای آن است [۵]. روشهای طراحی مسیر به پنج گروه کلی قابل دستهبندی هستند [۸–۵]. گروههای اول و دوم شامل روشهای مبتنی بر میدانهای پتانسیل [۹ و ۱۰] و درون یابی منحنی [۱۵– ۱۸] هستند. گروه سوم شامل روشهای مبتنی بر نمونهبرداری تصادفی است [۱۶ و ۱۷]. گروه چهارم نیز روشهای مبتنی بر جستجوی گراف، نظیر الگوریتمهای شبکهی حالت<sup>ه</sup> [۱۸ و ۱۹] ،  $A^*$ ،  $D^*$  و تعمیمات آنها [۲۲– الی، عدم امکان تعریف قیدهای حرکتی خودرو، مناسب نبودن برای موانع کلی، عدم امکان تعریف قیدهای حرکتی خودرو، مناسب نبودن برای موانع



6 Curse of dimensionality



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

<sup>1</sup> Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)

<sup>2</sup> Sensor/data fusion

Head-on collision

<sup>\*</sup> نویسنده عهدهدار مکاتبات: ghaffari@kntu.ac.ir

یا انحنای زیاد مسیر تولیدی و ضعف نسبت به عدم قطعیتهای محیطی، از مهمترین معایبی هستند که هر یک از این چهار گروه، حداقل دو یا سه مورد از آنها را دارند [۸–۵]. اما گروه پنجم شامل روشهای مبتنی بر بهینهسازی است که غالباً، تنها چالش محاسبات سنگین را دارند و در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند.

تیان یو و همکاران [۳۲ و ۲۴] و همچنین لیو و همکاران [۲۵] به بهینه سازی پروفایل سرعت طی شدن مسیرهای منحنی مشخص، تحت قیدهای پایداری خودرو و اجتناب از موانع پرداخته اند. این رویکردها، بهینگی یکپارچه در حوزهی مکان-زمان ندارند و همچنین ممکن است منحنیهای هندسی غیر بهینه ی آنها، در تقابل با دینامیک محیط و عدم قطعیتهای آن دچار مشکل شوند.

زیگلر و همکاران [۲۶] با تعریف یک تابع هزینهی غیرخطی شامل موقعیت، سرعت، شتاب و جرک خودرو به عنوان پارامترهای طراحی مسیر، به بهینهسازی این تابع و تولید مسیرهای حرکت پرداختهاند. موانع ثابت و متحرک محیط به صورت چندضلعی و قیود اجتناب از برخورد به صورت غیرخطی و بر مبنای فاصله با مرز چندضلعیها تعریف می شوند. برای این منظور یک تابع فاصله ی پیشنهادی ارائه شده است که مشتق پذیر از مرتبه ی دوم بوده و بهرموری حل مسألهی غیرخطی با روش نیوتن را افزایش میدهد. با این حال، عدم قطعیت در رفتار آیندهی موانع، میتواند مشکلاتی را برای الگوریتم ایجاد کند و طبق نظر نویسندگان، نیاز به بهبود در الگوریتم احساس می شود. تامیزوکا و همکاران در پژوهش دیگری [۵] الگوریتم نوآورانهی رگولاتور مربعی خطی تکرار شوندهی مقید ارا ارائه دادهاند که امکان حل مسألهی بهینهسازی برای سیستمهای غیرخطی را، به صورت مقید فراهم می کند. در این الگوریتم، موانع محیط به شکل بیضی تعریف و قیدهای غیرخطی حاصل از آنها، به کمک بسط تیلور مرتبهی اول، خطیسازی و در نهایت به فرم مربعی، وارد تابع هزینه می شوند. ژانگ و همکاران [۲۷]، با اقتباس از پژوهش پَتل و گولارت [۲۸]، یک رویکرد نوین را برای بازنویسی دقیق قیدهای غیرمشتق پذیر و غیرمحدب اجتناب از برخورد، به کمک اصل دوگانگی قوی در بهینهسازی محدب<sup>۲</sup> ارائه دادهاند و حرکت در فضای n بعدی با هدف اجتناب از موانع را مدلسازی کردهاند.

کنترل مدل پیشبین<sup>۳</sup> از شاخص ترین رویکردهای بهینهسازی در طراحی

مسیر و یا کنترل حرکت خودروها است و پژوهشهای این حوزه، از جنبههای مختلفی نظیر مدل پیشبین، سناریوی مدنظر و نحوهی تعریف قیدهای اجتنابی، بررسی شدهاند. بعضی از این پژوهشها صرفاً متمرکز بر طراحی مسیر حرکت مرجع هستند و در موارد دیگر، خروجی کنترل پیشبین مستقیماً برای هدایت خودرو در مانورهای اجتنابی به کار میرود. در مواردی نیز از دو کنترل کننده پیشبین برای طراحی و تعقیب مسیر اجتنابی استفاده می شود.

کیم و همکاران [۲۹] از مدل پیش بین سینماتیکی جرم نقطه ای با هدف طراحی مسیر در سناریوهای سادهی شهری با شتابهای عرضی بسیار کم استفاده کردهاند و نتایج رضایت بخش بوده است. نیلسون و همکاران [۳۰] با مدل پیش بین مشابه، به طراحی مسیر اجتناب از موانع در جاده ی یکطرفه پرداختهاند و برای تقلید سینماتیک غیرهولونومیک، قیدهایی را بر روی سرعت عرضی مدل پیش بین تعریف کردهاند. قیدهای اجتناب از برخورد نیز به صورت خطی و مورب نسبت به راستای بزرگراه تعریف شدهاند و فضای هندسی بزرگراه با توجه به موقعیت مانع، به سه زیربخش محدب تقسیم می شود. جلال معاب [۳۱] مشابه رویکرد مرجع [۳۰] به طراحی مسیر برای مانورهای اضطراری در شبکهای از خودروهای هوشمند در بزرگراه پرداخته است و سرعت و شتاب آیندهی خودروهای بزرگراه، مشخص فرض شده و در مدل پیشبین وارد می شوند. آمور و همکاران [۳۲] از مدل پیشبین و سناریوی مشابه [۳۱] استفاده کردهاند، اما تعریف قید اجتنابی آنها به کمک تابع سیگموئید صورت گرفته که موقعیت عرضی خودرو را از مانع دور می کند. لاتارولو و راستلی [۲] نیز، از مدل جرم نقطهای با لحاظ جرک در راستای طولی، برای طراحی مسیر در فرآیند سبقت گیری در جادهی دوطرفه استفاده کردهاند و قیدهای اجتناب از برخورد، بر اساس موقعیت عرضی مانع و به صورت خطى تعريف شدهاند.

گائو [۳۳] برای هدایت خودرو در اجتناب از برخورد با مانع ثابت در مسیر برفی، نتایج مطلوبی را از مدل جرم نقطهای نگرفته و به استفاده از مدل سینماتیکی دوچرخ<sup>۵</sup> پرداخته است. ایدمن [۳۴] به کنترل یکپارچهی حرکت طولی و عرضی خودرو با مدل پیشبین سینماتیک دوچرخ خطی متغیر با زمان<sup>2</sup> پرداخته است و در هر مقطع زمانی، سرعت خودرو تا انتهای افق پیشبینی ثابت و مشخص است. قیدهای اجتنابی نیز به صورت میدان پتانسیل با فرم مربعی در تابع هزینه وارد میشوند. دیکسیت و همکاران [۳] از مدل مشابهی با هدف طراحی مسیر خودرو برای سبقتگیری در

<sup>1</sup> Constrained Iterative Linear Quadratic Regulator (CILQR)

<sup>2</sup> Strong duality of convex optimization

<sup>3</sup> Model Predictive Control (MPC)

<sup>4</sup> Non-holonomic kinematics

<sup>5</sup> Kinematic bicycle model

<sup>6</sup> Linear Time Varying (LTV)

جادهی یکطرفه پرداختهاند و برای مانع، از ترکیب قیدهای خطی مورب و میدان پتانسیل استفاده شده است. شی و همکاران [۳۶] از دو کنترل کنندهی پیش بین برای طراحی و تعقیب مسیر خودرو در بزرگراهی با سه لاین و سبقت از موانع ثابت و متحرک استفاده کردهاند. مدل پیش بین لایهی طراحی مسیر، مشابه [۳۴ و ۳۵] بوده و تعریف قیدهای اجتنابی نیز مشابه مرجع [۳۰] صورت گرفته است. اما معیار خاصی برای انتخاب جهت عبور از کنار موانع ارائه نشده است. اوبایاشی و همکاران نیز [۲۷ و ۲۸] متمرکز بر طراحی مانور سبقت و کنترل حرکت طولی و جانبی خودرو بر اساس مدل پیش بینی بودهاند که تقریب خطی از مدل سینماتیکی دوچرخ است و قیدهای اجتنابی نیز، بر اساس فواصل دوایری که بر روی خودرو و موانع هستند، تعریف می گردد. سپس با خطی سازی مسأله و قیدها در هر مقطع، به حل آن با روش برنامهریزی مربعی ترتیبی<sup>۲</sup> می پردازند.

کُنگ و همکاران [۳۹] به صورت تجربی به مقایسه ی مدلهای دوچرخ سینماتیکی و دینامیکی برای کنترل پیش بین پرداخته اند و نتایج نشان می دهند که مدل سینماتیکی علاوه بر محاسبات سبک تر، خطاهای پیش بین کمتری را نیز در سرعتهای مختلف و مسیرهای منحنی و مواج دارد. با این حال، در مواردی به استفاده از مدل دینامیکی دوچرخ خطی در کنار تایر خطی، پرداخته شده است. شی و همکاران [۳۶] از این مدل پیش بین برای کنترل پیش بین خودرو در عدم برخورد با عابر پیاده در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت به کار برده اند. حاجیلو و همکاران [۴۱] نیز، از چنین مدلی برای کنترل پیش بین خودرو در عدم برخورد با عابر پیاده در سرعت ۳۰ کیلومتر بر تعییر به بحث ترمزگیری نامتقارن برای ایجاد یک گشتاور کمکی برای تنییر جهت سریعتر خودرو، لحاظ شده است. قیدهای اجتناب از برخورد نیز خطی و بر اساس موقعیت عرضی مانع هستند و فضای هندسی جاده به زیربخشهای محدب تقسیم می شود.

در مجموع، مدلهای پیش بین دوچرخ خطی عملکرد بسیار مناسب و بهرموری محاسباتی بالایی را به ویژه برای بحث طراحی مسیر دارند. با این حال در مقالاتی، از مدلهای غیرخطی نیز استفاده شده است. وِرلینگ و لیکاردو [۴۲] مسألهی کنترل پیش بین غیرخطی را برای اجتناب از برخورد با عابر در حال حرکت مدل کردهاند و قید اجتنابی به صورت یک ترم مربعی، وارد تابع هزینه می شود. در خصوص تشخیص جهت ایمن تر عبور از کنار عابر نیز تمهیداتی ارائه شده است. زو و همکاران [۴۳] مدل یکسان سینماتیک

دوچرخ غیرخطی را در دو کنترل کننده پیشبین برای لایههای طراحی و تعقیب مسیر اجتنابی به کار بردهاند که توجیه مناسبی ندارد. قیدهای اجتنابی نیز مشابه مرجع [۳۵] هستند. پالاتی و همکاران [۴۴] نیز، از مدل غیرخطی مشابهی برای طراحی مسیر سبقت گیری در جاده یدوطرفه استفاده کردهاند و محاسبات سنگین، باعث کاهش افق پیشبینی و افزایش زمان نمونهبرداری شده است که مناسب نیستند.

در جمعبندی رویکردهای قیدهای اجتنابی، استفاده از توابع فاصله و قیدهای غیرخطی و غیرمحدب به شکل دایره، بیضی، چندضلعی و ... [۵ و ۲۸–۲۶ و ۲۸ و ۲۲ و ۴۴]، عمدتاً محاسبات سنگین و بهرهوری پایینی دارند. تعریف موانع به شکل میدانهای پتانسیل و وارد کردن آنها در تابع هزینه نیز [۹ و ۱۰ و ۳۴]، با چالش انتخاب تابع مناسب همراه است و معمولاً مرزهای خطر به خوبی مشخص نمیشوند. اما استفاده از قیدهای خطی و بسیار بالا و کارایی مناسبی دارد و در مقالات متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۲۳–۳۰ و ۳۵ و ۳۶ و ۴۱ و ۴۳]. از آنجایی که تعریف قیدها وابسته به رفتار آیندهی موانع است، رویکردهای مختلف مدل سازی و پیشبینی حرکت موانع در مرجع [۴۵] بررسی و دستهبندی شده است. از میان این رویکردها، تحلیل دسترسپذیری<sup>۲</sup> [۴۶ و ۴۷] برای تخمین فضاهای اشغالی آیندهی کاربرد دارد و تضعیف این قیدهای حرکتی خودرو یا قیدهای رفتاری راننده، کاربرد دارد و تضعیف این قیدها، منجر به تخمینهای محافظه کارانهای از رفتار آیندهی موانع میشود.

در جمعبندی سناریوهای بررسی شده در مقالات، هیچ موردی که مربوط به هدایت خودرو در مواجهه با خودروی منحرف شدهای از مسیر مخالف باشد، مشاهده نشده است. تنها در مقالات [۴۸ و ۴۹]، به تحلیلهای اتفاقی فواصل طولی و عرضی، زاویهی نسبی خودروها و ... پرداخته شده است. اما اینکه در چنین شرایطی، مانور اجتناب از برخورد به چه صورت و در چه جهتی انجام شود، در هیچ پژوهشی مورد بررسی نبوده است. لذا وجه تمایز اصلی مقالهی حاضر، طراحی مسیر حرکت ایمن و مانورپذیر برای این سناریوی خاص است. تقریباً در تمامی مقالات بررسی شده، موانع یا به صورت ثابت خودروی منحرف مسیر مخالف، با عدم قطعیت بسیار زیادی همراه است. لذا نحوهی تقابل با این عدم قطعیت و تعریف قیدهای اجتناب از برخورد در

Sequential Quadratic Programming (SQP)



شکل ۱. نمایی از مواجهه با خودروی مهاجم منحرف شده از مسیر مخالف و مانورهای احتمالی آن.

Fig. 1. Schematic of Facing a threat vehicle deviated from the opposite lane and its possible maneuvers.

این سناریوی خاص، از نوآوریهای اصلی پژوهش حاضر است. رویکرد کلی تعریف قیدها به صورت خطی و مشابه مقالات [۳۲–۳۰ و ۳۶ و ۴۱] است. اما نحوهی پیادهسازی آن در سناریوی برخورد روبرو با حرکت نامشخص خودروی مهاجم، نیازمند تمهیدات و نوآوریهایی بوده که مقالهی حاضر را از سایر مقالات پیشین متمایز میکند. همچنین ارائهی الگوریتمی برای تشخیص جهت ایمن تر عبور از کنار خودروی منحرف، نوآوری دیگری است که در مقالهی حاضر به آن پرداخته شده است.

در ادامه، در بخش ۲ به توصیف اولیه ی مسأله پرداخته شده و الگوریتم کنترل پیش بین از منظر مدل پیش بین، قیدهای ورودی و تابع هزینه، مشخص می شود. بخش ۳ به مدلسازی حرکت خودروی مهاجم، نحوه ی تعریف قیدهای اجتناب از برخورد و رویکرد تشخیص جهت مانور اجتنابی اختصاص دارد. در بخش ۴ نیز، عملکرد الگوریتم در نرمافزار متلب شبیه سازی و نتایج ارائه می شود.

# ۲- توصيف مسأله و الگوريتم كنترل پيشبين

هدف پژوهش حاضر، استفاده از قابلیتهای کنترل پیشبین برای طراحی مسیر حرکت جانبی یک خودروی هوشمند<sup>۱</sup>، در شرایط بحرانی مواجهه با خودروی منحرفی از مسیر مخالف است. در شکل ۱، نمایی از این سناریو، مشاهده می شود. خودروی مهاجم<sup>۲</sup>، به دلایل مختلفی نظیر عدم هوشیاری، شتابزدگی و ...، می تواند مانورهای مختلفی را داشته باشد که

چهار نمونه از آنها مشخص شدهاند.

حساسیت بالای این سناریو که در مسیرهای دوطرفه و یا حتی در تقاطعها رخ میدهد، ایجاب میکند که مسألهی طراحی مسیر به صورت بیدرنگ حل شود. لذا در این پژوهش، رویکرد کنترل پیشبین خطی مدنظر است.

روال پیادهسازی اولیهی الگوریتم، شامل دو مرحله است که در این بخش ارائه میشوند. در مرحلهی اول، به انتخاب یک مدل پیش بین خطی پرداخته میشود که تقلید مناسبی از رفتار خودرو را در شرایط کاری مورد نظر داشته باشد. همچنین تعریف مناسب قیدهای مربوط به ورودی کنترلی و نرخ تغییرات آن، مورد توجه قرار می گیرد. در مرحلهی دوم نیز، یک تابع هزینهی مربعی براساس خطاهای خروجیهای آیندهی سیستم ایجاد میشود که با توجه به خطی بودن مدل پیش بین، به سادگی برحسب ورودیهای آیندهی سیستم، قابل تعریف است. تحقق این دو مرحله و حل مسألهی بهینهسازی با روش برنامهریزی مربعی، امکان کنترل بهینهی حرکت جانبی خودرو در تعقیب سیگنالهای مرجع دلخواه را، تحت قیدهای حرکتی خودرو فراهم می کند.

از آنجا که مسألهی مورد بررسی در این پژوهش، بحث طراحی مسیر برای اجتناب از برخورد با یک مانع متحرک است و نه تعقیب یک سیگنال مرجع برای موقعیت جانبی، لازم است که گام فراتری نیز برداشته شود. بر همین اساس، در مرحلهی سوم باید به تعریف قیدهای اجتناب از برخورد برای الگوریتم کنترل پیشبین پرداخته شود. با اضافه شدن این قیدهای جدید، الگوریتم کنترل پیشبین در هر مقطع زمانی، دنبالهای از ورودیهای

<sup>1</sup> Ego vehicle

<sup>2</sup> Threat vehicle

کنترلی آینده را که الزاماً بهینه نیستند، محاسبه میکند. سپس با رویکرد کنترل با افق پسرو<sup>(</sup>، اولین درایه از این ورودیهای بهینه یا زیر بهینه<sup>۲</sup> را به مدل پیش بین اعمال میکند و نقطه یآینده از مسیر مرجع خودرو، تحت قیدهای حرکتی خودرو و قیدهای اجتناب از برخورد، محاسبه میشود. همچنین میتوان تمامی درایهها تا افق کنترلی را نیز، به مدل خودرو اعمال کرد و دنباله کامل تری از نقاط آینده ی مسیر مرجع را محاسبه نمود. به این ترتیب فرآیند طراحی مسیر ایمن، برای مقاطع زمانی آینده تکرار خواهد شد و تعقیب دقیق این مسیر مرجع، برعهده ی واحد کنترلی دیگری است که در پژوهش حاضر بررسی نمیشود. اما روال کار، تمهیدات و نوآوریهای مربوط به تعریف قیدهای اجتناب از برخورد، در بخش آینده (بخش ۳) ارائه شده است.

# ۲- ۱- مدل پیش بین و قیدهای ورودی

مدل سینماتیکی دوچرخ برای حرکت جانبی خودرو، به ویژه در بحث کنترل پیش بین، بسیار متداول است [۳۹–۳۳].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta \\ \dot{y} &= V \sin \theta \\ \dot{\theta} &= V / L \tan \delta \end{aligned} \tag{1}$$

در رابطهی (۱)، x و y مختصات حرکت خودرو در راستاهای طولی (افقی) و جانبی (قائم) هستند.  $\theta$  زاویهی جهت گیری خودرو نسبت به محور x،  $\delta$  زاویهی چرخهای محور جلویی خودرو و جهت مثبت این زوایا نیز، پادساعتگرد است. پارامترهای V و L نیز، سرعت خودرو و فاصلهی محورهای آن را نشان میدهند.

ورودی های کنترلی سیستم در حالت کلی، V و  $\delta$  در نظر گرفته می شوند. اما در پژوهش حاضر که متمرکز بر حرکت جانبی خودرو است، طبیعتاً V ثابت در نظر گرفته می شود و تنها ورودی کنترلی سیستم، زاویه ی $\delta$  خواهد بود.

استفادهی مستقیم از معادلات فضای حالت غیرخطی رابطهی (۱) به عنوان مدل پیشبین، پیچیدگی محاسباتی زیادی دارد و حل بیدرنگ مسأله را با چالش همراه می کند. به همین جهت می توان معادلات رابطهی (۱) را، حول شرایط کاری معمول (حرکت مستقیم) خطی سازی کرد [۳۵]. با توجه

به ثابت فرض شدن سرعت V، معادلات فضای حالت خطی به صورت زیر تعریف میشود:

$$\begin{cases} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{cases} y \\ \theta \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 \\ V/L \end{bmatrix} \delta$$
 (7)

مدل پیش بین کنترل کننده نیز با گسسته سازی این معادلات با زمان نمونه برداری  $T_s$ ، حاصل می شود و ماتریس های فضای حالت گسسته ی آن، مطابق رابطه ی (۳) هستند:

$$\begin{split} A_{d} = \begin{bmatrix} 1 & VT_{s} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_{d} = \begin{bmatrix} \frac{(VT_{s})^{2}}{L} \\ \frac{VT_{s}}{L} \end{bmatrix}, \\ C_{d} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_{d} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{split}$$
(7)

به منظور مقایسه یرفتار مدل خطی سازی شده و مدل غیرخطی اولیه، ابتدا لازم است که دامنه ی مجاز برای زاویه ی  $\delta$  چرخها مشخص گردد. از آنجایی که شعاع انحنای مسیر در رابطه ی(1)، تقریباً به صورت زیر است:

$$\rho \approx \frac{L}{\tan \delta} \tag{(f)}$$

با در نظر گرفتن حداکثر شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه، حداکثر مقدار مجاز برای زاویهی  $\delta$  به ازای هر سرعت، مشخص می شود:

$$a_L = 7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \rightarrow \delta_{\text{max}} \approx \tan^{-1} \left( \frac{7L}{V^2} \right)$$
 (a)

مثلاً برای سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، حداکثر زاویهی مجاز چرخها در حدود ۴ درجه خواهد بود. (با توجه به کوچک بودن زاویهی چرخ در سرعتهای نسبتاً بالا، میتوان از تابع تانژانت معکوس در رابطهی (۵) صرف نظر کرد.)

Receding horizon control

<sup>2</sup> Suboptimal



شکل ۲. مقایسهی رفتار مدل پیش بین خطی با مدل دوچرخ سینماتیکی غیرخطی.

Fig. 2. Response comparison of nonlinear and linearized kinematic bicycle model.

در ادامه، دو شبیه سازی ۱٫۵ و ۲ ثانیه ای، برای مقایسه ی رفتار مدل های غیر خطی و خطی روابط (۱) و (۳) انجام شده است. در شکل ۲، پاسخهای دو مدل در این شبیه سازی ها دیده می شود. در هر دو شبیه سازی، خودرو سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه را دارد. زاویه ی اولیه ی چرخ در شبیه سازی سمت چپ، ۲ درجه است و با نرخ ۲۰ درجه بر ثانیه، به سمت دامنه های ۴+ و ۴- درجه تغییر می کند. زاویه ی اولیه ی جهت گیری خودرو نیز ۴ درجه است. ۶- درجه است و زاویه ی اولیه ی جهت گیری خودرو نیز ۴ درجه است. ۶- درجه است و زاویه ی چرخ نیز، یک نوسان کامل سینوسی با دامنه ی ۴ درجه و دوره ی ۲ ثانیه را، به سمت چپ و راست دارد.

به این ترتیب مشاهده میشود که در این ۴ مانور با زمانهای نسبتاً بلند، رفتار مدل خطی انطباق قابل قبولی را با مدل غیرخطی دارد. ضمن اینکه با اعمال قید دامنه برای زاویهی  $\delta$  در الگوریتم کنترل پیشبین، میتوان شتاب جانبی مسیر طراحی شده را در مقادیر منطقی و مانورپذیر برای خودرو و تایرها، محدود کرد. همچنین قید مربوط به نرخ تغییرات زاویهی  $\delta$  نیز، مسیر طراحی شده را با ماهیت واقعی سیستم فرمان پذیری خودرو، هماهنگتر می کند.

در مجموع با در نظر گرفتن افق کنترلی N<sub>C</sub>، تعداد قیدهای دامنه و نرخ زاویهی چرخ، برابر با ۴N<sub>C</sub> خواهد بود که نیمی از آنها مطابق رابطهی (۶)، و نیم دیگر مطابق رابطهی (۷) است.

$$V = 20 \frac{m}{s} \to -\frac{4\pi}{180} \le \delta(k+i) \le \frac{4\pi}{180} ; \qquad (8)$$
  
$$i = 0, 1, ..., N_c - 1$$

$$\begin{aligned} &-\frac{20\pi}{180} \leq \frac{\delta(k+i+1) - \delta(k+i)}{T_s} \leq \frac{20\pi}{180} \quad ; \\ &i = 0, 1, ..., N_c - 1 \end{aligned}$$
 (Y)

 $N_{P}$  در مقطع زمانی k، بردار متغیرهای حالت سیستم تا افق پیش بین k به صورت رابطه ی زیر است:

$$\vec{\mathbf{X}}_{\mathbf{k}} = \begin{cases} \vec{x} (k+1) \\ \vec{x} (k+2) \\ \vdots \\ \vec{x} (k+N_{P}) \end{cases} = \\ \begin{pmatrix} \delta(k) \\ \delta(k+1) \end{pmatrix}$$
(A)

$$M \vec{x}(k) + Q \begin{cases} \delta(k+1) \\ \vdots \\ \delta(k+N_{c}-1) \end{cases} = \\ M \vec{x}(k) + Q \vec{\mathbf{U}}_{k} \end{cases}$$

که در آن، بردار  $\tilde{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$  شامل متغیرهای بهینهسازی یا همان ورودیهای کنترلی سیستم، تا افق کنترل است. ماتریس M در رابطهی اخیر به صورت زیر تعریف میشود:

$$M = \begin{bmatrix} A_d \\ A_d^2 \\ \vdots \\ A_d^{N_P} \end{bmatrix}$$
(9)

برای ماتریس Q نیز، ابتدا باید ماتریس زیر را در نظر گرفت:

$$Q_{P} = \begin{bmatrix} B_{d} & [0] & [0] & [0] \\ A_{d}B_{d} & B_{d} & [0] & [0] \\ \vdots & \ddots & \ddots & [0] \\ A_{d}^{N_{P}-1}B_{d} & \cdots & A_{d}B_{d} & B_{d} \end{bmatrix}_{(2 \times N_{P}) \times (N_{P})} (\gamma \cdot)$$

از آنجایی که سیستم دارای یک ورودی  $\delta$  با افق کنترلی  $N_c$  است، ماتریس Q دارای  $N_c \times N_c$  ستون خواهد بود که  $1 - N_c$  ستون اول آن، با ۱ –  $N_c$  ستون اول از ماتریس  $Q_P$  یکسان است. اما ستون آخر ماتریس  $Q_c$  با با حاصل جمع ستونهای  $N_c$  تا  $N_P$  از ماتریس  $Q_P$  برابر خواهد بود. به این ترتیب، ماتریس Q از رابطهی (۸) نیز مشخص می شود.

با درنظر گرفتن موقعیت جانبی خودرو به عنوان خروجی هدف سیستم و تعریف سیگنال مرجع دلخواه y برای آن، می توان بردار خطای خروجی را تا افق پیش بین بدست آورد. موقعیت جانبی خودرو، خروجی اول سیستم است. پس در بردار  $\mathbf{X}_k$  از رابطهی (۸)، درایههای فرد مربوط به موقعیتهای جانبی آیندهی خودرو تا افق پیش بین هستند. به این ترتیب می توان سطرهای فرد ماتریس های M و Q را در نظر گرفته، ماتریس های جدید y مربول تا افق پیش بین و در موجی اول سیستم افق جنین و در موجی اول سیستم افق پیش بین به داتریس می توان بین و یو را تشکیل داد. سپس بردار موقعیت های جانبی خودرو تا افق پیش بین و در مقطع زمانی k را، به صورت زیر نوشت:

$$\vec{\mathbf{Y}}_{\mathbf{k}} = M_{y} \, \vec{x} \, (k) + Q_{y} \, \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}} \tag{(1)}$$

و بردار خطای خروجیهای آیندهی سیستم تا افق پیشبین نیز، به صورت زیر خواهد بود:

$$\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}} = \vec{\mathbf{Y}}_{\mathbf{k}} - \begin{cases} y_r(k+1) \\ y_r(k+2) \\ \vdots \\ y_r(k+N_P) \end{cases} = \vec{\mathbf{Y}}_{\mathbf{k}} - \vec{\mathbf{Y}}_{\mathbf{r}} \qquad (11)$$

$$\vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}} = Q_{\mathcal{Y}} \, \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}} + \vec{\mathbf{P}} \tag{19}$$

که بردار  ${f P}$  در رابطهی اخیر، مقدار مشخص و ثابتی را به فرم زیر دارد:

$$\vec{\mathbf{P}} = M_{v}\vec{x}(k) - \vec{\mathbf{Y}}_{r} \tag{14}$$

با مشخص شدن بردار خطاهای آینده، تابع هزینهای شامل مجموع مربعات این خطاها و همچنین مجموع مربعات ورودیهای کنترلی آینده، مطابق رابطهی زیر تعریف می شود:

$$J = \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}}^{T} W_{e} \vec{\mathbf{E}}_{\mathbf{k}} + \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}^{T} W_{u} \vec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$$
(\delta)

ماتریسهای وزنی  $W_e \, W_e \, W_e$  متقارن و مثبت معین هستند و اهمیت کمینه شدن هر یک از جملات تابع هزینه یمربعی J، به بزرگتر بودن مقادیر درایههای این ماتریسها بستگی دارد. از آنجایی که اولویت اصلی پژوهش حاضر، اجتناب از خطر برخورد است، برای ماتریس وزنی یس مقادیر بسیار کوچکی در نظر گرفته می شود و الگوریتم کنترل پیش بین در محاسبات خود، حساسیتی برای کوچک نگه داشتن ورودی های کنترلی آینده مخواهد داشت.

با جایگذاری رابطهی (۱۳) در رابطهی (۱۵)، فرم کلی مسألهی بهینهسازی به صورت زیر حاصل می شود:

$$\min_{\mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}}} \frac{1}{2} \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}}^{T} H \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} + f^{T} \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} ;$$
such that
$$\begin{cases}
A \cdot \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} \leq b \\
A_{eq} \cdot \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} = b_{eq} \\
lb \leq \mathbf{\tilde{U}}_{\mathbf{k}} \leq ub
\end{cases}$$
(\S)

که حل آن مقید به قیدهای خطی نامساوی یا تساوی مشخص شده است. در رابطهی اخیر، ماتریس H و بردار f مطابق روابط زیر هستند:

$$H = Q_y^T W_e Q_y + W_u \tag{(1Y)}$$

$$f = \vec{\mathbf{P}}^T W_e Q_v \tag{1A}$$

# ۳- الگوريتم اجتناب از برخورد

در این بخش به فرآیند تعریف قیدهای اجتناب از برخورد مسألهی حاضر پرداخته میشود که شامل دو گروه زیر هستند:

- قیدهای مربوط به مرز چپ و راست جاده.
- ۲) قیدهای مربوط به خودروی مهاجم از مسیر روبرو.

در ابتدای کار، به پیادهسازی قیدهای مربوط به مرزهای جاده پرداخته می شود و سپس بحث عدم برخورد با خودروی مهاجم روبرو، مدنظر قرار می گیرد. در پژوهش حاضر، محیط مسأله یک جادهی دوطرفه با چهار لاین در نظر گرفته شده است که پهنای ۴ متری دارند. با فرض یک حاشیهی امنیت ۱ متری از مرز چپ و راست جاده، لازم است که خودرو همواره موقعیت عرضی خود را در بازهی ۲+ تا ۲– متری حفظ کند. به این ترتیب  $_{7}$  ۲۸ قید به فرم نامساوی های زیر، به مسأله اضافه می شود:

$$-7 \leq M_y \vec{x}(k) + Q_y \vec{\mathbf{U}}_k \leq 7 \qquad (19)$$

در خصوص بحث عدم برخورد با خودروی مهاجم از مسیر روبرو، ضرورت دارد که تخمین کوتاه مدتی از حرکت آیندهی آن برآورد شود. چنین تخمینی، فضاهای اشغالی خودروی مهاجم در لحظات آینده را مشخص میکند و به عنوان مانع متحرکی در مسیر پیشِ روی خودروی اصلی، ترسیم میشود. بر

همین اساس، در ادامه به مدل سازی حرکت آینده ی خودروی مهاجم پرداخته شده و در گام دوم، رویکرد جدیدی برای تعریف قیدهای اجتناب از برخورد با این فضای متحرک، ارائه می گردد.

با تعریف قیدهای مذکور، مسأله هنوز کامل نیست و باید یک الگوریتم تصمیم سازی نیز به منظور تشخیص جهت مناسب تر و ایمن تر عبور از کنار خودروی مهاجم طراحی شود. لذا در گام سوم این بخش، رویکرد نوینی برای این منظور ارائه می شود.

### ۳- ۱- مدل سازی حرکت خودروی مهاجم

با انحراف به چپ یک خودرو و ورود آن به مسیر مخالف، میتوان مانورهای زیر را برای ادامهی حرکت آن متصور شد:

 ۱) عدم هوشیاری راننده و ورود بیشتر به لاین مخالف با سرعت و انحنای مسیر ثابت.

۲) هوشیار شدن راننده در لحظات اولیه ی خطر و بازگشت نسبتاً آرام
 به مسیر اصلی.

۳) هوشیار شدن راننده در زمانی که خودرو کاملاً در مسیر مخالف قرار دارد و خطر برخورد بسیار بالا است. در این حالت مانورهای شتابزده و شدید به سمت چپ یا راست، محتمل است.

در چنین شرایطی، هیچ منطقی برای سرعت گیری خودروی مهاجم وجود ندارد و احتمال آن تقریباً صفر است. لذا با فرض اینکه خودروی مهاجم در بدترین حالت، سرعت خود را حفظ می کند، میتوان حداکثر طول قوس قابل پیمایش آن را در زمان محدود و مشخصی تعیین کرد. در خصوص حرکات جانبی آن نیز، میتوان یک شتاب جانبی حداکثری را در هر لحظه در نظر گرفت و حرکت خودرو با این شتاب به سمت چپ یا راست را، در زمان محدودی تخمین زد.

به این ترتیب، ابتدا یک مرز حاشیه ای برای نقاط جلویی خودروی مهاجم در نظر گرفته می شود. در پژوهش حاضر، این فاصله در راستای طولی برابر با ۲ متر از سپر جلویی خودروی مهاجم و در راستای عرضی نیز برابر با  $1_{1}$ ۲ متر از سمت چپ و راست آن است. سپس با فرض اینکه خودروی مهاجم در زمان q1، یک قوس دایره ای را با سرعت ثابت V و شتاب جانبی  $a_{L}$ ، به سمت چپ و راست طی می کند، این مرز حاشیه ای در طول زمان q توسعه داده می شود و حداکثر فضاه ای اشغالی خودرو در دو جهت بدست می آید. در شکل ۳، فضاه ای اشغالی دو خودروی مختلف به عنوان نمونه مشاهده می شود. برای هر کدام از این خودروها سرعت اولیه، حداکثر شتاب



شکل ۳. فضاهای اشغالی دو خودروی مختلف با شرایط اولیه، شتاب جانبی و زمان پیش بینی متفاوت.

Fig. 3. Occupied spaces of two vehicles with different initial conditions, lateral accelerations and prediction times.

جانبی مورد انتظار و زمان تقریبی برخورد، مشخص شده است.

بدیهی است هر اندازه که شتاب جانبی  $a_L$  و زمان پیشبینی  $f_P$  مقادیر بیشتری داشته باشند، فضای اشغالی بزرگ تر شده، تخمین محافظه کارانه تری از حرکت آینده ی خودروی مهاجم حاصل می شود. اما بزرگ بودن فضای تخمینی آینده به ویژه در بعد عرضی، می تواند تقریباً تمام عرض جاده را پوشش دهد و امکان پذیری<sup>۱</sup> حل مسأله و محاسبه ی مسیر ایمن را با مشکل مواجه کند. در پژوهش حاضر، شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه با زمان پیش بینی  $V_1$  ثانیه، در نظر گرفته شده است که تخمین کوتاه مدت و محافظه کارانه ای را از حرکت جانبی خودرو ارائه می دهد و در عین حال، عرض فضای اشغالی حاصل نیز تناسب منطقی و خوبی با پهنای جاده دارد.

در خصوص زمان پیش بینی، باید یک پارامتر مهم را تحت عنوان زمان احتمالی برخورد<sup>۲</sup>، در نظر گرفت. این زمان به سادگی از تقسیم فاصلهی نسبی نقاط جلویی خودروها بر سرعت نسبی آنها در در راستای طولی، قابل تقریب است:

$$TTC \approx \frac{D_{rel} - 2 \times \left(\frac{L}{2}\right)}{V_{rel}} \tag{(7.)}$$

در شرایطی که زمان برخورد کمتر از ۰٫۷ ثانیه باشد، لازم است که زمان پیش بینی حرکت خودروی مهاجم، همان زمان برخورد احتمالی در نظر گرفته شود.

۳- ۲- قیدهای اجتناب از برخورد با خودروی مهاجم با مشخص شدن زمان تقریبی برخورد احتمالی، میتوان گام زمانی این برخورد را با تابع جزء صحیح، به صورت زیر محاسبه کرد:

$$N_{Col} \approx \left\lfloor \frac{TTC}{T_s} \right\rfloor \tag{(Y)}$$

اگر این گام زمانی پرخطر، در داخل افق پیش بین و یا در نزدیکی ورود به آن باشد، می توان از چند مقطع قبل و بعد از آن را به عنوان حاشیه ی امنیت در نظر گرفت و قیدهایی را روی موقعیت عرضی خودرو در آن مقاطع زمانی، به نحوی تعریف کرد که خارج از پهنای فضای اشغالی خودروی مهاجم باشند. در شکل ۴، نمایی از این مسأله و قیدهای مذکور مشاهده می شود. در مقطع زمانی k، موقعیت عرضی خودرو برای گامهای آینده در می شود. در مقطع زمانی k، موقعیت عرضی خودرو برای گامهای آینده در بازه ی  $k_{col} - b$  می بالایی فضای اشغالی خودروی مهاجم باشد ( موقعیت عرضی h). در شرایط شکل فضای اشغالی خودروی مهاجم باشد ( موقعیت عرضی h). در شرایط شکل ۶ و عبور از سمت چپ، پارامتر h غیر منفی است. یعنی اگر فضاهای اشغالی تعریف می شوند.

در صورتی که زمان برخورد احتمالی بیشتر از  $v_{,}$  ثانیه باشد، بهتر است که پارامتر حاشیه ای a به نحوی تعیین شود که تا انتهای افق پیش بین را پوشش دهد. به این ترتیب برای فواصل دور، موقعیت عرضی خودرو از گام  $N_{p}$  تا  $N_{Col} - b$ 

<sup>1</sup> Feasibility

<sup>2</sup> Time to Collision (TTC)



شکل ۴. قیدهای اجتناب از برخورد برای موقعیت عرضی خودرو در حوالی زمان برخورد احتمالی.

Fig. 4. Collision avoidance constraints on lateral positions of ego vehicle around the time of probable collision.

خودروى مهاجم باشد.

لازم به ذکر است که در شکل ۴، اگر موقعیت عرضی خودروی اصلی بالاتر از باشد، تنها تفاوتی که در رویکرد مذکور ایجاد می شود، این است که اولین گام از افق پیش بینی، به جای گام زمانی  $N_{Col} - b$  جایگزین می شود. همچنین در رویکرد مذکور، عبور خودروی اصلی از سمت چپ ناحیه ی اشغالی صورت گرفته است. مشابه این روال را برای عبور از سمت راست نیز می توان به سادگی تعمیم داد. در مجموع، قیدهای اجتناب از برخورد با خودروی مهاجم، با فرمی مشابه نامساوی های رابطهی (۱۹) قابل تعریف است.

با مشخص شدن قیدهای مرز جاده و خودروی مهاجم، لازم است که تدبیری برای نرم کردن این قیدها<sup>۱</sup> لحاظ شود. در غیر اینصورت ممکن است در شرایط خاصی، رسیدن به پاسخ بهینهای که تمامی قیدهای سخت<sup>۲</sup> مسأله را ارضا کند، میسر نباشد. برای رفع این چالش، یک متغیر بهینهسازی تضعیفی<sup>۳</sup> با نماد  $\mathcal{T}$  که غیرمنفی است، به بردار متغیرهای  $\mathbf{J}_{\mathbf{k}}$ ، تابع هزینه و قیدها اضافه می شود. به این ترتیب، مسأله ی بهینهسازی جدیدی حاصل می شود که از متغیر برای نرم کردن بعضی از قیدها کمک می گیرد و در عین حال، تابع هزینه می شود که از متغیر مان می می شود. در این ترتیب، مسأله ی بهینه می شود. و در عین حاصل می شود که از متغیر می می شود.

فرم جدید قیدهای نامساوی رابطهی (۱۶)، به صورت زیر تعریف

$$A \cdot \mathbf{U}_{\mathbf{k}} - sV_s \leq b \tag{(77)}$$

در مواقعی که تمامی قیدها با شکل سخت خود ارضا می شوند، مقدار برابر با صفر است و پاسخ مسأله بهینه خواهد بود. اما در باقی مواقع، مقدار مثبت کمینه ای را خواهد داشت و پاسخ حاصل، زیر بهینه است.

صفر بودن هر یک از درایههای بردار  $V_s$ ، به معنی سخت بودن دائمی قید متناظر با آن درایه است. از سوی دیگر، درایههای غیر صفر نیز هر قدر اندازهی بزرگتری داشته باشند، قید متناظر با آنها نرمتر است. در پژوهش حاضر، تمامی قیدهای مربوط به ورودی از نوع سخت هستند. برای قیدهای مرز جاده، مقدار ۲۰٫۱۰ برای درایههای متناظر بردار  $V_s$  در نظر گرفته شده است. در خصوص قیدهای اجتناب از برخورد با خودروی مهاجم نیز، مقدار درایههای متناظر بردار  $V_s$  برای زمان برخورد با خودروی مهاجم نیز، مقدار گرفته میشود. در واقع برای شرایطی که زمان برخورد احتمالی کوتاه است، گرفته میشود. در واقع برای شرایطی که زمان برخورد احتمالی کوتاه است، نا خودروی مهاجم، اهمیت بیشتری نسبت به خروج از حاشیههای مجاز جاده و دراد. اما برای فواصل دورتر، سیستم حساسیت یکسانی نسبت به عدم برخورد دارد. اما برای فواصل دورتر، سیستم حساسیت یکسانی نسبت به عدم برخورد

<sup>1</sup> Constraint softening

<sup>2</sup> Hard constraints

<sup>3</sup> Slack variable





در پایان این بخش، مسألهی مهمی که در خصوص رویکرد ارائه شده باقی میماند، بحث تصمیم گیری سیستم برای عبور از سمت چپ یا راست مانع است که در ادامه، یک الگوریتم نوآورانه برای آن ارائه می شود.

### ٣- ٣- الگوريتم تشخيص جهت مناسب مانور اجتنابي

الگوریتم تشخیص جهت، دارای دو فاز عملکردی دور و نزدیک است که هر کدام، معیارهای تصمیم گیری خاص خود را دارند. در صورتی که زمان احتمالی برخورد بزرگتر از ۱ ثانیه باشد، فاز دور فعال است و برای زمانهای برخورد کمتر از ۱ ثانیه، فاز نزدیک فعال میشود. تشخیص جهت مناسب در هر یک از این دو فاز، به مدلسازی موقعیتهای آیندهی خودروی اصلی نیاز دارد و لازم است که آستانههای امکان پذیر حرکت خودروی اصلی، در دو جهت چپ و راست و تا افق زمانی مشخصی، محاسبه شوند. به این ترتیب در هر مقطع زمانی، با توجه به مدل پیشبین، زاویهی چرخ و قیدهای زاویه، دو مسیر پیشبین با حداکثر انحراف ممکن به سمت چپ و راست مدل سازی میشوند.

اساس کلی الگوریتم در فاز دور، بر مبنای انتخاب جهتی است که موقعیتهای آیندهی خودروی اصلی، بیشترین فاصله را از راستای حرکتی خودروی مهاجم داشته باشند. در شکل ۵، حالتهای مختلف این راستا، نسبت به آستانهی امکان پذیر مسیرهای چپ و راست مشاهده می شوند. جهتهای ایمن مانور اجتنابی نیز، با دایره مشخص شدهاند.

R و L مرکز هندسی (یا ثقل) خودروی اصلی است. نقاط L و L نیز، حداکثر انحراف ممکن خودرو را، تا افق زمانی ۱ ثانیه مشخص میکنند.

F نقطه ی M، از میانگین مختصات نقاط L و R حاصل می شود. نقطه ی F نقطه ی M، از میانگین مختصات آستانه های چپ و راست در افق زمانی  $\tau_0$  ثانیه، محاسبه می شود. نقطه ی F در واقع نقش نقطه ی C را با یک حاشیه ی امنیت  $\tau_0$  ثانیه ای ایفا می کند.

در نمای (a) از شکل ۵، راستاهای مختلف خودروی مهاجم در سمت راست نقاط F و R گرفتهاند و انحراف خودرو به سمت چپ، کاملاً ایمن و منطقی خواهد بود. در نمای (b)، راستاها بین نقاط M و R و سمت راست نقطهی F قرار دارند. در این حالت نیز بدون توجه به نرخ تغییرات راستا، انحراف خودروی اصلی به سمت چپ بسیار ایمن تر از سمت راست خواهد بود.

در نمای (c)، راستای خودروی مهاجم بین نقاط M و R و سمت چپ نقطهی F قرار دارد. بر خلاف دو حالت قبلی که مسیر سمت چپ، فاصلهی قابل توجهی را با راستاها داشت و جهت ایمن به سادگی قابل تشخیص بود، اما در وضعیت مربوط به نمای (c)، به سادگی نمیتوان اظهار نظر کرد. به همین دلیل بهتر است که به جهت چرخش راستا نیز توجه شود. در صورتی که چرخش راستا پادساعتگرد باشد، مسیر سمت چپ ایمن تر است. اما در صورتی که چرخش راستا ساعتگرد باشد، انحراف خودرو به سمت راست ایمن تر خواهد بود. لازم به ذکر است که در شکل ۵، تنها نیمی از حالتها، که راستای خودروی مهاجم در سمت راست نقطهی M قرار دارد، مشخص شدهاند. لذا روال مشابهی برای نیمهی قرینهی حالتها، قابل تعمیم است. در خصوص فاز عملکردی «نزدیک»، به دلیل زمان بسیار کوتاه برخورد

احتمالي، لازم است كه اولين تصميم تا أخرين لحظه حفظ شود. زيرا تغييرات



شکل ۶. جهت مناسب مانور در فواصل نزدیک، با توجه به فضای اشغالی برأوردی خودروی مهاجم.

Fig. 6. Suitable swerve direction for close distances, with respect to occupied spaces estimated for threat vehicle.

مکرر تصمیم در لحظات پایانی، تنها مانع فاصله گرفتن خودروی اصلی از مسیر احتمالی خودروی مهاجم میشود. روال تصمیم گیری در فاز نزدیک، مطابق شکل ۶ است. به این صورت که دو کنج جلویی خودروی مهاجم، با زاویهی ۵ درجهای به سمت چپ و راست گسترش داده میشوند و وضعیت فضای حاصل، با نقاط L و R مقایسه میشود. اگر تنها یکی از نقاط L یا R خارج از این فضا باشند، انحراف خودروی اصلی به همان سو ایمن تر است. اما در صورتی که هر دو نقطه داخل یا خارج فضای مذکور باشند، روال تصمیم گیری بر اساس الگوریتم شکل ۵ انجام میشود.

### ۴- شبیهسازیها و نتایج

پس از پیاده سازی الگوریتم کنترل مدل پیشبین در نرمافزار متلب و تعریف قیدها، به ارزیابی الگوریتم به کمک چهار شبیهسازی پرداخته می شود. این شبیهسازی ها به نحوی طراحی شدهاند که ضمن ارزیابی عملکرد سیستم در مواجهه ی دور و نزدیک با خودروی مهاجم، حساسیت آن را نسبت به انتخاب جهت مناسب مانور اجتنابی نیز نشان دهند. به این صورت که با تغییرات چند سانتی متری در شرایط اولیه ی خودروی مهاجم، الگوریتم اگر لازم باشد می تواند دو مانور اجتنابی ایمن با جهت های متمایز را طراحی کند.

کنترل کننده ی مدل پیش بین، با افق پیش بینی ۲۰، افق کنترلی ۵ و گام زمانی ۱٫۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مسأله ی کنترل پیش بین و طراحی مسیر در هر مقطع زمانی، برای ۲ ثانیه ی آینده حل می شود. در شبیه سازی ها فرض شده است که خودروی اصلی به کمک سنسورهای رادار، لایدار<sup>۱</sup>، دوربین و سایر سنسورهای اینرسی، امکان رصد

1 Lidar

دقیق فضای روبرو و تشخیص خطر مواجهه با خودروی منحرف شده از مسیر مخالف را، تا برد ۱۲۰ متری دارد.

در شکل ۷، مسیر حرکت خودروی مهاجم در چهار شبیه سازی مشاهده می شود. در تمامی این شبیه سازی ها، تنها خودروی اصلی و خودروی مهاجم در جاده هستند و سرعت هر کدام ۲۰ متر بر ثانیه فرض شده است. خودروی اصلی از مختصات (۲– , ۰) متری شروع به حرکت می کند. نقطه ی شروع خودروی مهاجم نیز مطابق شکل ۷ و بسته به شبیه سازی مورد نظر، در حوالی مختصات (۲ , ۱۵۷) متری قرار دارد. زمان این شبیه سازی ها نیز ۷ ثانیه است.

در شبیهسازی های اول و دوم، خودروی مهاجم از فواصل دورتر از ۱۲۰ متری، با زاویه انحراف ۸ درجه ای و شتاب جانبی ۳٫۵ متر بر مجذور ثانیه ، وارد مسیر خودروی اصلی می شود. الگوریتم طراحی مسیر از فاصله ای ۱۲۰ متری خطر را تشخیص داده، شروع به کار می کند. خودروی مهاجم با ادامه ی انحراف شدید، پس از حدود ۲ ثانیه با شتاب جانبی ۲٫۵ متر بر مجذور ثانیه اقدام به بازگشت به مسیر اصلی خود می کند و زمانی که به حوالی خط ممتد جاده و موقعیت طولی ۸۰ متری در شکل ۷ می رسد، دو مانور مختلف (۱) مانور (۲) را ادامه می دهد. این مانورها برای شبیه سازی های اول و دوم هستند. ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فواصل بسیار نزدیک، در نظر گرفته شده است. در این مانور، خودروی مهاجم در لحظات آخر پیش از برخورد احتمالی، با شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه مجدداً به سمت چپ و مسیر مخالف با شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه مجدداً به سمت چپ و مسیر مخالف منحرف می شود.

در شبیه سازی سوم، خودروی مهاجم از فاصله ی حدودا ۴۰ متری



شکل ۷. موقعیت اولیهی خودروی اصلی و مسیر حرکت خودروی مهاجم در چهار شبیهسازی.

Fig. 7. Initial position of ego vehicle and four maneuvers of threat vehicle in simulations.



شکل ۸. تشخیص خطر از فاصلهی ۱۲۰ متری و مانورهای اجتنابی چپ و راست (شبیهسازی اول).

Fig. 8. Threat detection from 120m and collision avoidance maneuvers to left and right (first simulation).

خودروی اصلی (موقعیت طولی ۹۵ متری در شکل ۷)، با شتاب جانبی ۳٫۵ متر بر مجذور ثانیه منحرف میشود و با همان شتاب، به انحراف خود ادامه میدهد. در شبیهسازی چهارم نیز، خودروی مهاجم انحراف خود را مشابه شبیهسازی سوم آغاز میکند. اما پس از زمان بسیار کوتاهی از ورودش به مسیر مخالف، با شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه به سمت راست و مسیر اصلی خود باز میگردد. مانور (۴) نیز با هدف ارزیابی مقاوم بودن عملکرد سیستم نسبت به تغییر جهت ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فواصل بسیار نزدیک، در نظر گرفته شده است.

در خصوص شبیه سازی های اول و سوم، مسیر حرکت و تغییر جهت خودروی مهاجم به گونه ای است که الگوریتم تعیین جهت مانور، در یک مقطع زمانی از اواسط شبیه سازی، در مرز انتخاب جهت چپ یا راست قرار می گیرد. در هر یک از این شبیه سازی ها برای ارزیابی حساسیت عملکرد الگوریتم در چنین شرایطی، تغییرات چند سانتی متری در موقعیت اولیه ی خودروی مهاجم اعمال می شود و الگوریتم می تواند ۲ مانور اجتنابی ایمن با جهت های متمایز را، برای دو مسیر بسیار مشابه با اختلاف چند سانتی متری، طراحی کند.

۴- ۱- شبیهسازی اول

در شکل ۸ نمای کلی مواجههی دو خودرو در شبیهسازی اول مشاهده میشود. موقعیت خودروها در سه مقطع زمانی از این مواجهه، مشخص شده است و فلشهای روی مسیرها نیز، فواصل زمانی ۱٫۰ ثانیه را نشان می دهند. مطابق شکل ۸ خودروی مهاجم از فاصلهی دور وارد مسیر خودروی اصلی شده است و در مقطع زمانی (۱)، فاصلهی دو خودرو به کمتر از عرب ۱۲۰ متر می رسد و الگوریتم طراحی مسیر شروع به کار می کند. الگوریتم تعیین جهت، مانور اجتنابی از سمت چپ را انتخاب می کند. با توجه به اینکه خودروی مهاجم و فضاهای اشغالی آیندهاش تا افق زمانی ۲٫۰ ثانیه، کاملاً به خط ممتد جاده با موقعیت عرضی صفر تعریف میشوند. به این ترتیب به خط ممتد جاده با موقعیت عرضی صفر تعریف میشوند. به این ترتیب زر)، خودروی اصلی قرار دارند، لذا قیدهای اجتناب از برخورد، نسبت خودروی اصلی به سمت خط ممتد جاده متمایل می شود. در مقطع زمانی (۲)، خودروی اصلی کمی از خط ممتد جاده متمایل می شود. در مقطع زمانی مهاجم با شتاب جانبی ۲٫۵ متر بر مجذور ثانیه، قصد بازگشت به مسیر اصلی خود را دارد. پس از ۴٫۰ ثانیه از مقطع زمانی (۲)، راستای خودروی مهاجم، یک وضعیت مرزی را برای الگوریتم تعیین جهت ایجاد می کند که در نمای



شکل ۹. وضعیت مرزی تعیین جهت مانور در شبیهسازی اول و سه مقطع زمانی آینده برای مانورهای چپ و راست.

Fig. 9. Boundary situation of swerving in first simulation and next three time steps of left and right maneuvers.

بالایی شکل ۹، قابل مشاهده است.

مطابق نمای بالایی شکل ۹، راستای خودروی مهاجم بین نقاط M و R و منطبق بر نقطه ی F از شکل ۵ است و با توجه به نرخ ساعتگرد آن، انحرافات جزئی از این شرایط میتواند منجر به انتخاب جهت چپ یا راست توسط الگوریتم تعیین جهت شود. لذا در این شبیهسازی، دو موقعیت اولیه با فاصله ی چند سانتی متری برای خودروی مهاجم در نظر گرفته شده است که یکی از آنها منجر به مانور اجتنابی چپ و دیگری منجر به مانور سمت راست میشود. در نماهای ۱۱ تا L۳ و ۲۱ تا ۳۳ از شکل ۹، سه مقطع زمانی پس از تعیین جهت چپ و راست مشاهده میشوند. در مقاطع ملا و ۲۱، زمان برخورد احتمالی دو خودرو هنوز بیشتر از ۱ ثانیه است و

لذا تعیین جهت، مطابق الگوریتم شکل ۵ ادامه مییابد. اما از مقطع زمانی L۲ و R۲، زمان برخورد کمتر از ۱ ثانیه می شود و تعیین جهت بر اساس الگوریتم شکل ۶ ادامه می یابد.

به این ترتیب، الگوریتم تعیین جهت به خوبی توانسته است که تمایز لازم را در وضعیت مرزی مذکور ایجاد کند. در واقع نکته یحائز اهمیت در خصوص عملکرد الگوریتم، داشتن نوعی ثبات در انتخاب جهت است. به این معنی که پس از انتخاب یک جهت و شروع انحراف خودروی اصلی به آن سو، تعیین جهت در لحظات آینده به سادگی دستخوش تغییر نشود. در صورتی که معیارهای تشخیص جهت مناسب نباشند، عوامل کوچکی نظیر خطا و نویز سنسورها، میتواند باعث عدم ثبات جهت در وضعیتهای مرزی



شکل ۱۰. زاویهی چرخ و زاویهی جهت گیری خودرو در مانورهای چپ و راست شبیهسازی اول.

Fig. 10. Steering and heading angles of ego vehicle in first simulation maneuvers.

و بحرانی شود. در نتیجه خودروی اصلی دچار سردرگمی شده و نمیتواند به خوبی از راستای خودروی مهاجم و فضاهای اشغالی آن دور شود.

در نهایت، با بررسی مجدد شکل ۸ و مقطع زمانی (۳)، مشاهده می شود که قیدهای اجتناب از برخورد نیز به خوبی توانستهاند حاشیهی امنیت مناسبی را در هر دو مانور L و R ایجاد کنند. پس از عبور ایمن نیز، خودروی اصلی به مسیر مرجع خود با موقعیت عرضی ۲- متر باز می گردد.

در نمای راست از شکل ۱۰، خروجی کنترل کنندهی مدل پیشبینی (زاویهی چرخهای جلو) برای دو مانور اجتنابی چپ و راست شبیهسازی اول، مشاهده می شود. مطابق انتظار، این خروجی مقید به دامنه ۴ درجهای و نرخ تغییرات ۲۰ درجه بر ثانیه است. در نمای چپ از شکل ۱۰ نیز، زاویه ی جهت گیری خودروی اصلی در دو مانور، قابل مشاهده است. با توجه به منحنیهای مسیر ارائه شده در شکل ۸، از ارائه ی موقعیت جانبی خودروی اصلی صرف نظر می شود.

### ۴- ۲- شبیهسازی دوم

در این شبیه سازی به ارزیابی مقاوم بودن سیستم طراحی مسیر، نسبت به تغییر جهت ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فواصل بسیار نزدیک پرداخته می شود. در شکل ۱۱، نمای کلی مواجهه ی دو خودرو قابل مشاهده است. خودروی مهاجم دو مانور A و B را انجام می دهد. مانور A، دقیقاً همان مانور شبیه سازی اول است و از شرایط اولیه ای آغاز شده که منجر به تعیین جهت سمت راست برای مانور اجتنابی خودروی اصلی می شود. مانور B نیز تا مقطع زمانی (۳)، کاملاً مشابه مانور A است. اما پس از این مقطع، خودروی مهاجم با حداکثر شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه ، مجدداً به سمت چپ و می میر مخالف منحرف می شود. از آنجایی که فاصله ی دو خودرو بسیار نزدیک شده است، الگوریتم تعیین جهت دیگر نمی تواند جهت مانور اجتنابی را از راست به چپ تغییر دهد. لذا سیستم طراحی مسیر ملزم است که مسیرهای ایمن را برای اجتناب از مانور B، از همان جهت سمت راست محاسبه کند.



شکل ۱۱. مقاوم بودن نتایج شبیهسازی اول، نسبت به تغییر جهت ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فاصلهی بسیار نزدیک.

Fig. 11. Robustness of first simulation results, to a sudden deviation with high lateral acceleration at close distance.



شکل ۱۲. زاویهی چرخ و زاویهی جه*ت گ*یری خودرو برای اجتناب از برخورد با مانورهای A و B خودروی مهاجم در شبیهسازی دوم.

Fig. 12. Steering and heading angles of ego vehicle to avoid threat vehicle maneuvers in second simulation.

دو مانور اجتناب از برخورد با مسیرهای A و B خودروی مهاجم، مشاهده می شود. در نمای چپ شکل ۱۲ نیز، زاویهی جهت گیری خودروی اصلی قابل مشاهده است. انحراف به چپ شدید خودروی مهاجم در مانور B، باعث شده است که حرکت خودروی اصلی بیشتر به سمت راست متمایل شود (نسبت

مطابق شکل ۱۱، سیستم طراحی مسیر به خوبی توانسته است که مانور ایمنی را از سمت راست خودروی مهاجم طراحی کند. در مقطع زمانی (۴)، عبور خودروها از کنار هم و با حاشیهی مناسبی دیده می شود. در نمای راست از شکل ۱۲، خروجی کنترل کنندهی مدل پیشبینی (زاویهی چرخها) برای



شکل ۱۳. تشخیص خطر از فاصلهی ۴۰ متری و مانورهای اجتنابی چپ و راست (شبیهسازی سوم). Fig. 13. Threat detection from 40m and collision avoidance maneuvers to left and right (third simulation).

به مانور اجتناب از A).

### ۴– ۳– شبیهسازی سوم

در این شبیهسازی، خودروی مهاجم از فاصله یکمتر از ۴۵ متری خودروی اصلی، انحراف به چپ با شتاب جانبی ۳٫۵ متر بر مجذور ثانیه را شروع میکند. در شکل ۱۳، نمای کلی مواجهه ی دو خودرو دیده می شود. در مقطع زمانی (۱)، تشخیص خطر و طراحی مسیر اجتنابی، شروع می شود. مشابه شبیه سازی اول، در این شبیه سازی نیز یک وضعیت مرزی برای الگوریتم تعیین جهت پیش می آید که در نمای بالایی شکل ۱۴، قابل مشاهده است. در مقطع زمانی ۲٫۸ ثانیه، راستای خودروی مهاجم بین نقاط مشاهده است. در مقطع زمانی ۲٫۸ ثانیه، راستای خودروی مهاجم بین نقاط پادساعتگرد آن، انحرافات جزئی از این شرایط می تواند منجر به انتخاب پادساعتگرد آن، انحرافات جزئی از این شرایط می تواند منجر به انتخاب نیز، دو موقعیت اولیه با فاصله ی چند سانتی متری برای خودروی مهاجم در نظر گرفته شده است که یکی از آنها منجر به مانور اجتنابی چپ و دیگری منجر به مانور سمت راست می شود.

در نماهای L۱ تا L۳ و R۱ تا R۳ از شکل ۱۴، سه مقطع زمانی پس از تعیین جهت چپ و راست مشاهده میشوند. در نماهای L۱ و R۱، زمان برخورد احتمالی خودروها کمتر از ۱ ثانیه است و لذا تعیین جهت بر اساس الگوریتم شکل ۶ صورت می گیرد. از طرفی با دقت در نمای L۱، ملاحظه میشود که نقاط انتهایی مسیرهای امکان پذیر چپ و راست خودروی اصلی (نقاط L و R از شکل ۶)، هر دو در فضای داخلی نقطه چینها قرار دارند. لذا تعیین جهت در نمای L۱، باید بر اساس الگوریتم شکل ۵ صورت گیرد و با

توجه به فاصلهی نزدیک خودروها، نتیجهی آن برای لحظات آینده، ثابت بماند. در نمای راست از شکل ۱۵، خروجی کنترل کنندهی مدل پیش بین (زاویهی چرخها) برای دو مانور اجتنابی چپ و راست شبیه سازی سوم، مشاهده می شود. در نمای چپ شکل ۱۵ نیز، زاویه ی جهت گیری خودروی اصلی قابل مشاهده است.

### ۴ – ۴ – شبیهسازی چهارم

در شکل ۱۶، نمای کلی مواجهه ی خودروها در شبیه سازی چهارم مشاهده می شود. خودروی مهاجم دو مانور A و B را انجام می دهد. مانور A، دقیقاً همان مانور شبیه سازی سوم است و از شرایط اولیه ای آغاز شده که منجر به تعیین جهت سمت چپ برای مانور اجتنابی خودروی اصلی می شود. مانور B نیز تا مقطع زمانی (۲)، کاملاً مشابه مانور A است. اما پس از این مقطع، خودروی مهاجم با حداکثر شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه، به سمت راست و مسیر اصلی خود باز می گردد. از آنجایی که فاصله ی دو به سمت راست و مسیر اصلی خود باز می گردد. از آنجایی که فاصله ی دو مانور اجتنابی را از چپ به راست تغییر دهد. لذا سیستم طراحی مسیر ملزم است که مسیرهای ایمن را برای اجتناب از مانور B، از همان جهت سمت چپ محاسبه کند.

مطابق شکل ۱۶، سیستم طراحی مسیر به خوبی توانسته است که مانور ایمنی را از سمت چپ خودروی مهاجم، حتی با وجود مانور بحرانی B، طراحی کند. در مقطع زمانی (۳)، عبور خودروها از کنار هم و با حاشیهی مناسبی دیده می شود. خروجی کنترل کننده و زاویه ی جهت گیری خودرو در این شبیه سازی، کاملاً مشابه منحنی های نقطه چین شکل ۱۵ است.



شکل ۱۴. وضعیت مرزی تعیین جهت مانور در شبیهسازی سوم و سه مقطع زمانی آینده برای مانورهای چپ و راست.

Fig. 14. Boundary situation of swerving in third simulation and next three time steps of left and right maneuvers.



شکل ۱۵. زاویهی چرخ و زاویهی جهت گیری خودرو در مانورهای چپ و راست شبیهسازی سوم.

Fig. 15. Steering and heading angles of ego vehicle in third simulation maneuvers.



شکل ۱۶. مقاوم بودن بودن نتایج شبیهسازی سوم، نسبت به تغییر جهت ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فاصلهی بسیار نزدیک.

Fig. 16. Robustness of third simulation results, to a sudden deviation with high lateral acceleration at close distance.

### ۵- نتیجهگیری

در این مقاله به مسألهی طراحی مسیر حرکت خودرو، برای شرایط مواجهه با خودروی منحرف شدهای از مسیر مقابل پرداخته شده است. مروری بر پژوهشهای پیشین، نشاندهندهی عدم توجه محققین حوزهی خودروهای هوشمند به این سناریوی حساس و با تلفات زیاد بوده است.

در خصوص رویکردهای مربوط به طراحی مسیر خودرو، بررسی مقالات و پژوهشها حاکی از اقبال زیاد به روش کنترل مدل پیشبین و استفاده از مدل های خطی سازی شده است. دلیل این مسأله، کارایی بالای این الگوریتم برای طراحی بیدرنگ مسیرهای ایمن و مانورپذیری است که ضمن در نظر گرفتن آیندهی ترافیک محیط، در چهارچوب قیدهای حرکتی خودرو و قیدهای اجتناب از برخورد با موانع محیطی هستند. بر همین اساس الگوریتم مذکور با یک مدل خطی مناسب، در نرمافزار متلب پیادهسازی شده است و در گام اول، قیدهای مربوط به زاویهی فرمان پذیری خودرو، نرخ این زاویه و همچنین مرزهای جادهی دوطرفه، تعریف شدهاند. در گام دوم، یک تخمین محافظه کارانه از حرکت آیندهی خودروی مهاجم روبرو، بر اساس تحلیل دسترس پذیری در نظر گرفته می شود. سپس یک روش نوین برای تعریف قیدهای ساده و خطی اجتناب از برخورد، نسبت به فضاهای آیندهی خودروی مهاجم، ارائه می شود. در گام بعدی، یک الگوریتم نوآورانه با هدف تشخیص جهت ایمن تر مانور اجتنابی، مطرح می گردد و در گام آخر نیز، به ارزیابی مجموعهی نهایی در چهار سناریوی مختلف پرداخته می شود. این سناریوها به گونهای طراحی شدهاند که عملکرد مجموعه را در حالتهای مختلف تقابل دور و نزدیک خودروها و همچنین شرایط بحرانی انتخاب جهت، شبیهسازی میکنند.

الگوریتم مورد نظر، مسألهی طراحی مسیر را با گام زمانی ۰٫۱ ثانیه به صورت بیدرنگ حل نموده و نتایج شبیهسازیها نشان میدهند که الگوریتم، نسبت به تغییر جهتهای ناگهانی خودروی مهاجم با حداکثر شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه و در فاصلهی زمانی کمتر از ۱ ثانیه تا برخورد احتمالی، مقاوم است.

به عنوان پیشنهاد برای پژوهشهای آتی، میتوان دو مورد را در نظر

گرفت. مورد اول، ادغام یکپارچهی الگوریتم حاضر با بحث بهینهسازی سرعت حرکت خودرو است تا مسیرهای ایمن در دو بعد حرکت طولی و جانبی طراحی شوند. مورد دوم نیز به ارائهی الگوریتم مشابهی برای جادههای انحنادار و همچنین محیطهای شلوغتر مربوط می شود.

# ۶- فهرست علائم

# علائم انگلیسی

- m/s سرعت خودرو، V
- L فاصلهی محورهای خودرو، m
  - دمان نمونەبردارى، s زمان  $T_{\scriptscriptstyle S}$
- ${
  m m/s}^{^{
  m r}}$  شتاب جانبی خودرو،  $a_{_L}$ 
  - m فاصلهی نسبی خودروها،  $D_{\it rel}$
- m/s سرعت نسبی خودروها،  $V_{\it rel}$
- S زمان تقریبی برخورد احتمالی، TTC

# علائم يونانى

- rad زاویه جهت گیری خودرو، heta
- rad (ورودی کنترلی)، زاویه  $\delta$ 
  - افق پیش بینی  $N_P$ 
    - افق کنترل  $N_{C}$
  - افق برخورد احتمالی  $N_{Col}$
- بردار ورودىھاى كنترلى بھينە تا افق كنترل  $ec{\mathbf{U}}_{\mathbf{k}}$
- بردار موقعیتهای جانبی خودرو تا افق پیشبینی  $ec{Y}_k$
- بردار موقعیتهای جانبی مرجع خودرو تا افق پیشبینی  $ec{\mathbf{Y}}_{.}$
- بردار خطای موقعیتهای جانبی خودرو تا افق پیشبینی  $ec{\mathbf{E}}_{m{k}}$ 
  - m شعاع انحنای مسیر حرکت خودرو، ho

design of artificial potential field and nonlinear model predictive control for a vehicle collision avoidance system with move blocking strategy, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 232(10) (2018) 1-21.

- [11] J. Funke, P. Theodosis, R. Hindiyeh, G. Stanek, K. Kritatakirana, C. Gerdes, D. Langer, M. Hernandez, B.M. Bessler, B. Huhnke, Up to the limits: autonomous Audi TTS, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2012) 541-547.
- [12] W. Xu, J. Wei, J.M. Dolan, H. Zhao, H. Zha, A realtime motion planner with trajectory optimization for autonomous vehicles, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2012) 2061-2067.
- [13] D. Gonzalez, J. Perez, R. Lattarulo, V. Milanes, F. Nashashibi, Continuous curvature planning with obstacle avoidance capabilities in urban scenarios, Proceedings of the 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), (2014) 1430-1435.
- [14] T. Berglund, A. Brodnik, H. Jonsson, M. Staffanson, Planning smooth and obstacle-avoiding B-spline paths for autonomous mining vehicles, IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 7 (2010) 167-172.
- [15] A. Ghaffari, S.N. Minaee, Lane change path planning in emergency situation based on skilled driver's performance, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 54(1) (2021), (in Persian).
- [16] Y. Kuwata, G.A. Fiore, J. Teo, E. Frazzoli, J.P. How, Motion planning for urban driving using RRT, Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2008) 1681-1686.
- [17] S. Karaman, E. Frazzoli, Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning, Robotics: Science and Systems (RSS 2010), (2010) 71-87.
- [18] J. Ziegler, C. Stiller, Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios, Proceedings of the 2009 IEEE International

- Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), (2018).
- [2] R. Lattarulo, J.P. Rastelli, A hybrid planning approach based on MPC and parametric curves for overtaking maneuvers, Sensors, 21(2) (2021) 1-19.
- [3] B. Shahian-Jahromi, S.A. Hussain, B. Karakas, S. Cetin, Control of autonomous ground vehicles: a brief technical review, 4th International Conference on Mechanics and Mechatronics Research, (2017) 1-6.
- [4] Table 29: Crashes by first harmful event, type of collision and crash severity, National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), (2016-2019).
- [5] J. Chen, W. Zhan, M. Tomizuka, Constrained iterative LQR for on-road autonomous driving motion planning, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), (2017) 2232-2238.
- [6] C. Katrakazas, M. Quddus, W.H. Chen, L. Deka, Realtime motion planning methods for autonomous on-road driving: state of the art and future research directions, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 60 (2015) 416-442.
- [7] S. Dixit, S. Fallah, U. Montanaro, M. Dianati, A. Stevens,
   F. Mccullough, A. Mouzakitis, Trajectory planning & tracking for autonomous overtaking: state of the art and future prospects, Annual Reviews in Control, 45 (2018) 76-86.
- [8] B. Paden, M. Cap, S.Z. Yong, D. Yershov, E. Frazzoli, A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 1 (2016) 33-55.
- [9] Y. Rasekhipour, A. Khajepour, S.K. Chen, B. Litkouhi, A potential field-based model predictive path-planning controller for autonomous road vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 18(5) (2016) 1255-1267.
- [10] U.Z. AbdulHamid, H. Zamzuri, T. Yamada, M.A. AbdulRahman, Y. Saito, P. Raksincharoensak, Modular

منابع

of Guidance, Control and Dynamics, 34(1) (2011) 218-230.

- [29] B. Kim, D. Kim, S. Park, Y. Jung, K. Yi, Automated complex urban driving based on enhanced environment representation with gps/map, radar, lidar and vision, IFAC-PapersOnLine, 49 (2016) 190-195.
- [30] J. Nilsson, P. Falcone, M. Ali, J. Sjoberg, Receding horizon maneuver generation for automated highway driving, Control Engineering Practice, 41 (2015) 124-133.
- [31] M.M. Jalalmaab, Model Predictive Control of Highway Emergency Maneuvering and Collision Avoidance, PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, (2017).
- [32] M. Ammour, R. Orjuela, M. Basset, Collision avoidance for autonomous vehicle using MPC and time varying Sigmoid safety constraints, IFAC-PapersOnLine, 54(10) (2021) 39-44.
- [33] Y. Gao, Model Predictive Control for Autonomous and Semiautonomous Vehicles, PhD Thesis, University of California, Berkeley, (2014).
- [34] T. Idman, Path Planning and Trajectory Generation
   Model Predictive Control, PhD Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, (2019).
- [35] S. Dixit, U. Montanaro, M. Dianati, D. Oxtoby, T. Mizutani, A. Mouzakitis, S. Fallah, Trajectory planning for autonomous high-speed overtaking in structured environments using robust MPC, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 21(6) (2020) 2310-2323.
- [36] Q. Shi, J. Zhao, A.E. Kamel, I. Lopez-Juarez, MPC based vehicular trajectory planning in structured environment, IEEE Access, 9 (2021) 21998-22013.
- [37] M. Obayashi, K. Uto, G. Takano, Appropriate overtaking motion generating method using predictive control with suitable car dynamics, IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), (2016).
- [38] M. Obayashi, G. Takano, Real-time autonomous car motion planning using NMPC with approximated problem considering traffic environment, International

Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), (2009) 1879-1884.

- [19] M. McNaughton, C. Urmson, J.M. Dolan, J.W. Lee, Motion planning for autonomous driving with a conformal spatiotemporal lattice, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2011) 4889-4895.
- [20] J. Bohren, T. Foote, J. Keller, A. Kushleyev, D. Lee, A. Stewart, P. Vernaza, J. Derenick, J. Spletzer, B. Satterfield, Little Ben: The Ben Franklin racing team's entry in the 2007 Darpa urban challenge, Journal of Field Robotics, 25(9) (2008) 598-614.
- [21] D. Dolgov, S. Thrun, M. Montemerlo, J. Diebel, Practical search techniques in path planning for autonomous driving, Proceedings of the First International Symposium on Search Techniques in Artificial Intelligence and Robotics (STAIR-08), (2008).
- [22] D. Ferguson, S. Anthony, Field D\*: an interpolationbased path planner and replanner, Robotics Research, Springer Berlin Heidelberg, (2007) 239-253.
- [23] G. Tianyu, J. Atwood, C. Dong, J.M. Dolan, J.W. Lee, Tunable and stable real-time trajectory planning for urban autonomous driving, 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2015).
- [24] G. Tianyu, J.M. Dolan, J.W. Lee, Runtime-bounded tunable motion planning for autonomous driving, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2016).
- [25] C. Liu, W. Zhan, M. Tomizuka, Speed profile planning in dynamic environments via temporal optimization, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2017).
- [26] J. Ziegler, P. Bender, T. Dang, C. Stiller, Trajectory planning for Bertha - a local, continuous method, Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV), (2014) 450-457.
- [27] X. Zhang, A. Liniger, F. Borrelli, Optimization-based collision avoidance, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 29(3) (2020) 972-983.
- [28] R. Patel, J. Goulart, Trajectory generation for aircraft avoidance maneuvers using online optimization, Journal

- [44] J. Palatti, A. Aksjonov, G.Alcan, V.Kyrki, Planning for safe abortable overtaking maneuvers in autonomous driving, 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference, (2021).
- [45] S. Lefevre, D. Vasquez, C. Laugier, A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles, ROBOMECH Journal, Springer, 1(1) (2014) 1-14.
- [46] M. Althoff, J.M. Dolan, Online verification of automated road vehicles using reachability analysis, IEEE Transactions on Robotics, 30 (2014) 903-918.
- [47] R. Soloperto, J. Kohler, M.A. Muller, F. Allgower, Collision avoidance for uncertain nonlinear systems with moving obstacles using robust model predictive control, 18th European Control Conference (ECC), (2019).
- [48] T. Kim, H.Y. Jeong, Crash probability and error rates for head-on collisions based on stochastic analyses, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 11(4) (2010) 896-904.
- [49] S. Kumari, S. Ghosh, D. Mitra, S. Sengupta, S. Mukhopadhyay, Collision risk assessment based on line of sight, IFAC-PapersOnLine, 53(2) (2020) 14972-14977.

Federation of Automatic Control, (2018) 279-286.

- [39] J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach, F. Borrelli, Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design, Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), (2015) 1094-1099.
- [40] H. Chen, X. Zhang, Path planning for intelligent vehicle collision avoidance of dynamic pedestrian using Att-Lstm, MSFM and MPC at un-signalized crosswalk, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 69(4) (2021) 4285-4295.
- [41] R. Hajiloo, M. Abroshan, A. Khajepour, A. Kasaiezadeh, S.K. Chen, Integrated steering and differential braking for emergency collision avoidance in autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22(5) (2020) 3167-3178.
- [42] M. Werling, D. Liccardo, Automatic collision avoidance using model-predictive online optimization, 51st IEEE Conference on Decision and Control, (2012).
- [43] Z. Zuo, X. Yang, Z. Li, Y. Wang, Q. Han, L. Wang, MPC-based cooperative control strategy of path planning and trajectory tracking for intelligent vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 6(3) (2021) 513-522.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم M. Abdollahi Nia, A. Ghaffari , S. Azadi, Head-on Collision Avoidance Path Planning with Model Predictive Control, Amirkabir J. Mech Eng., 54(8) (2022) 1737-1760.



DOI: 10.22060/mej.2022.20809.7321

بی موجعه محمد ا