



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 مسأله 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 تغییر 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 بوده 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

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 فعال جلو و کنترل گشتاور چرخ و بر اساس کنترل پیش‌بین مدل برای تغییر مسیر و سبقت‌گیری پیشنهاد شد. از طراحی مسیر برای ایجاد یک مسیر مرجع بدون برخورد استفاده می‌شود. سیستم کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین

مدل با فرمان‌پذیری از جلو و گشتاور چرخ جلو مسیر مرجع مطلوب را دنبال می‌کند. تغییر 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 مدل‌سازی استفاده می‌شود. روش کنترل هم‌زمان ترمز و فرمان بر اساس کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی برای تغییر 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 سرنشین انجام شده است. برای هدایت‌پذیری 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

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

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 تعقیب مسیر خودران در [۱۲] انجام شده است. مانور تغییر 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 ردیابی مسیر افقی متحرک 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 ردیابی 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 ردیابی 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 ردیابی مسیر دایره‌ای، یک سیستم خطی شده با کنترل پیش‌بین مدل در [۲۱] بررسی شده است. تغییر 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 ترمزها و فرمان برای جلوگیری از برخورد و حفظ مسیر با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده 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 ردیابی 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 ردیابی خط مرکزی جاده هدف کنترل‌کننده 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 تغییر مسیر در [۳۰] پیشنهاد شد جایی که یک خودروی با فرمان‌پذیری چهار چرخ (4WS) مورد مطالعه قرار گرفت. در [۳۱]، تحقیقی در مورد استراتژی تغییر 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 موانع وسایل نقلیه خودران مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل در [۳۳] مورد مطالعه قرار گرفت.

در [۳۴]، یک کنترل پیش‌بین مدل برای وسایل نقلیه الکتریکی خودران برای تغییر 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 موانع 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 ردیابی مسیر مطلوب طراحی شده است و کنترل سبقت مقاوم یک وسیله نقلیه الکتریکی خودران با عدم قطعیت پارامتر مورد بررسی قرار گرفت. در [۳۸]، کنترل پیش‌بین یک وسیله نقلیه زمینی خودران با اجتناب از مانع در جاده‌های لغزنده 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 پایداری در مانور تغییر مسیر، یک کنترل فرمان اضطراری خودروی خودران مورد توجه قرار گرفته است. یک روش طراحی مسیر و سرعت برای تغییر مسیر و اجتناب از برخورد بر اساس منحنی بی‌زیر سه‌بعدی در [۴۰] پیشنهاد شد. یک طراحی سیستم اجتناب از برخورد بر اساس کنترل پیش‌بین مدل با زمان نمونه‌برداری متفاوت در [۴۱] 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 نویسندگان 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.

باقیمانده 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 موانع و تعقیب رهبر را برآورده می‌کند. سپس الگوریتم کنترل مبتنی بر کنترل پیش‌بین مدل برای ردیابی 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 چهارچرخ 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 (نیروی 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 لحاظ شده است. لازم به ذکر است که چون در این تحقیق مانور خودرو خودران در سرعت‌های پایین انجام می‌شود (بر خلاف مانورهای سرعت بالا مثل سبقت‌گیری یا تغییر خط) نیروی جانبی لاستیک کوچک بوده و در نتیجه زاویه لغزش نیز کوچک و از آن در مدل‌سازی دینامیکی صرف‌نظر می‌گردد.

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

در [۴۳-۴۵] برای عبور تعدادی ربات دوچرخ از کنار موانع، الگوریتم‌هایی پیشنهاد شده است ولی کنترل خودروهای چهارچرخ به مراتب دشوارتر از ربات‌های دوچرخ است. به مسأله عبور خودروی خودران در کنار تک‌مانع بسیار پرداخته شده است (همانند [۴۶-۴۸]) 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 دوبعدی که نیازمند انجام مانورهای عمومی‌تری توسط خودرو است، بررسی می‌گردد.

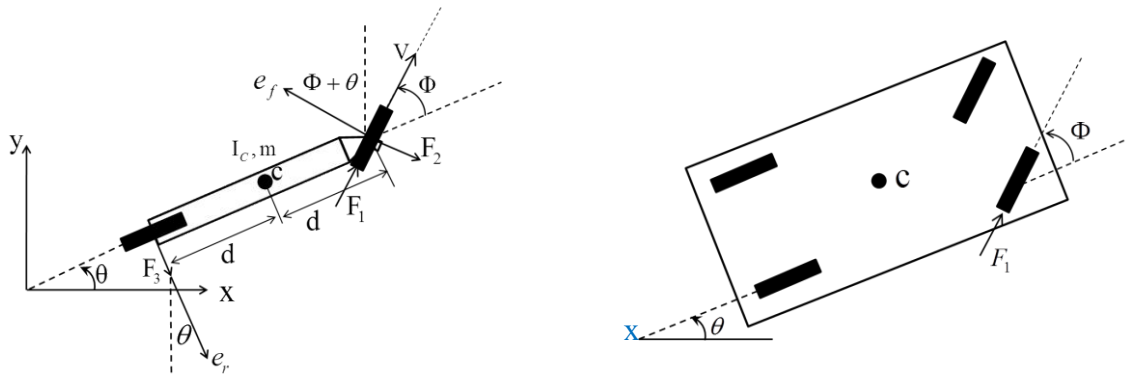
یکی از مهمترین مأموریت‌هایی که یک خودروی خودران باید انجام دهد، عبور از بین موانع بدون برخورد با آنها می‌باشد. در واقع این موانع می‌توانند حتی خودروهایی باشند که در اطراف خودرو متحرک وجود دارند. بنابراین مسأله عدم برخورد با موانع متعدد مهم می‌باشد. اگرچه بسیاری از کارها به تغییر مسیر و سبقت‌گیری پرداخته‌اند، 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، [۴، 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.

مهمترین 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

هستند که با معادلات زیر توضیح داده شده‌اند.

چرخ‌های جلو و عقب به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r &= [S\theta, -C\theta] \\ \mathbf{e}_f &= [-S(\Phi + \theta), C(\Phi + \theta)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{x}_c S\theta - \dot{y}_c C\theta + d\dot{\theta} = 0 \quad (5)$$

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

S و C مخفف‌هایی هستند که به جای $\sin()$ و $\cos()$ 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.

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

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:

$$a_1 = C\Phi C\theta - \frac{S\theta S\Phi}{2}, \quad (6)$$

$$a_2 = S\theta C\Phi + \frac{C\theta S\Phi}{2}, \quad a_3 = \frac{S\Phi}{2d}$$

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

تعیین می‌شوند.

$$\dot{x}_c = va_1 \quad (7)$$

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

$$\dot{y}_c = va_2 \quad (8)$$

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

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

که در آن

$$a_4 = S\Phi C\theta + \frac{S\theta C\Phi}{2},$$

$$a_5 = S\theta S\Phi - \frac{C\theta C\Phi}{2}$$

$$k_1 = \frac{I}{dm}, a_6 = a_1^2 + a_2^2 + k_1 da_3^2,$$

$$a_7 = \frac{k_1 C\Phi}{2} a_3 - a_3 a_2 - a_4 a_1$$

و در نهایت به صورت خلاصه داریم:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) \quad (14)$$

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_8]^T, \quad \boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2]^T$$

۳- بیان مسأله کنترل

مسأله‌ای 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. دقت 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 موانع 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. x_d, y_d موقعیت هر نقطه را در مسیر نشان می‌دهد. در واقع مسیر گسسته شده است. مسیر مطلوب با یک مسأله بهینه‌سازی به دست خواهد آمد که در

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 $\dot{\Phi}$ ، F_1 ، گشتاورهای محرک و فرمان τ_1' و τ_2' به صورت زیر است:

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

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

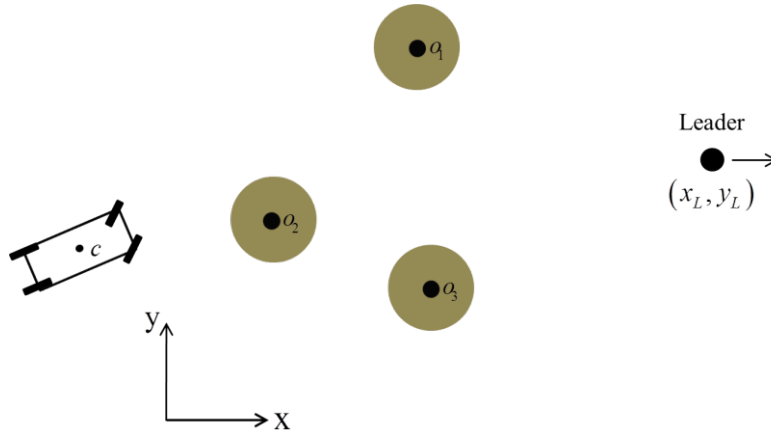
که در آن r_w شعاع چرخ و c_s ضریب استهلاک فرمان می‌باشند. ورودی‌های کنترل به صورت $\dot{\Phi} = \tau_1$ و $F_1 = \tau_2$ انتخاب می‌شوند تا معادلات ساده شوند. به منظور استخراج معادلات دینامیکی خودرو، روش نیوتن-اولر در [۱] استفاده شد که معادلات فضای حالت خودرو خودران را به صورت زیر به دست آورد. با تعیین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

$$x_1 = x_c, x_2 = \dot{x}_c, x_3 = y_c, x_4 = \dot{y}_c, \quad (12)$$

$$x_5 = \theta, x_6 = \dot{\theta}, x_7 = v, x_8 = \Phi$$

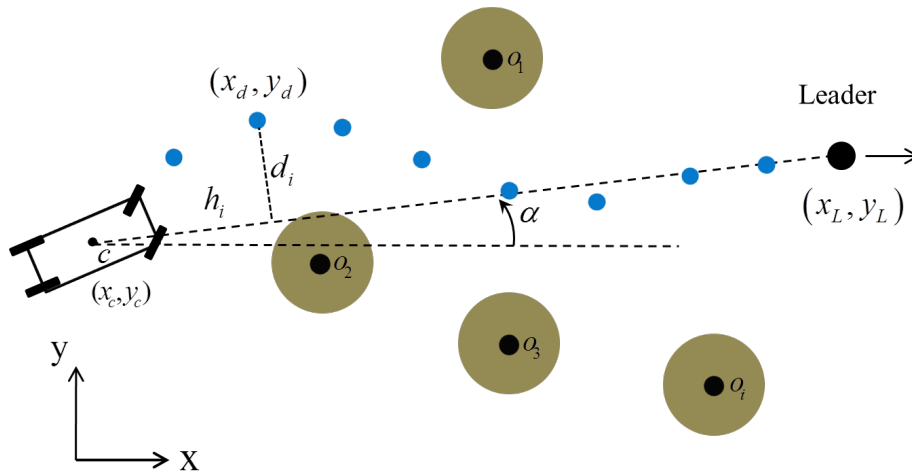
معادلات فضای حالت به صورت زیر به دست می‌آیند [۱]:

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



شکل ۲. یک خودرو خودران در حال 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:

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

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

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:

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

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، یک تابع 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:

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

که در آن

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:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{obs} + \mathbf{R}_{car}$$

$$L_{i,j} = \sqrt{(x_{d,i} - x_{o,j})^2 + (y_{d,i} - y_{o,j})^2}$$

$$J_{i,j} = \frac{1}{L_{i,j} + \varepsilon}$$

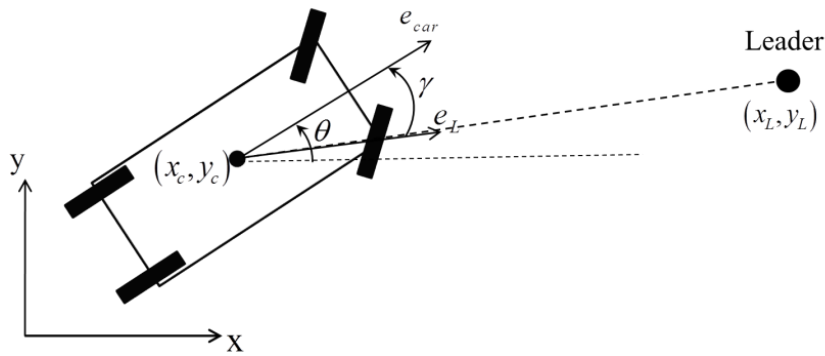
If $L_{i,j} < R$

$$J_{i,j} = pJ_{i,j}$$

end

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, w_3 و p وزن‌هایی هستند که باید طراحی شوند. در نهایت، مسأله بهینه‌سازی زیر مسیر بهینه را به ما می‌دهد.

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



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 $w_5 \tau_{1,i}^2 + w_6 \tau_{2,i}^2$).

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

9

$$\gamma_{cd,i} = \cos^{-1}(\mathbf{e}_{car} \cdot \mathbf{e}_{cd,i})$$

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

توجه داشته باشید که برای محاسبه $\gamma_{cd,i}$ از نقاط روی مسیر بهینه برای اجتناب از مانع استفاده می‌شود.

$$\text{منطق کنترل برای } \gamma \leq \gamma_0$$

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

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

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

$$\mathbf{e}_{car} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{e}_L = \frac{\begin{bmatrix} x_L - x_c & y_L - y_c & 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{(x_L - x_c)^2 + (y_L - y_c)^2}}, \quad (23)$$

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

با توجه به مقدار γ ، از دو الگوریتم کنترل ویژه استفاده شده است که در اینجا توضیح داده شده است.

$$\text{منطق کنترل برای } \gamma > \gamma_0$$

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

$$P_{o,3} = [-5 \quad -5] \text{ متر و } P_{o,2} = [0 \quad 11] \text{ متر، } P_{o,1} = [-10 \quad 0]$$

متر و 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 نقلیه 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 نقلیه خودران که در بین سه مانع حرکت می‌کند، نشان داده شده است. وسیله نقلیه با استفاده از برنامه‌ریزی مسیر پیشنهادی و طرح کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، رهبر مجازی را ردیابی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا اولین منطق 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 نقلیه 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 بدنه و زاویه فرمان خودرو را نشان می‌دهد. قید روی زاویه فرمان برآورده می‌شود که حداکثر 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 نقلیه به سرعت رهبر 3 متر بر ثانیه همگرا می‌شود.

گشتاورهای فرمان و چرخ جلو که مورد نیاز کنترل‌کننده 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 چهار مانع در نظر گرفته شده است. به شبیه‌سازی قبلی یک مانع با مختصات $(-10, 15)$ متر در شکل ۹ اضافه شده است. مسیر وسیله نقلیه خودران که در بین چهار مانع حرکت می‌کند، نشان داده شده است. وسیله نقلیه با استفاده از برنامه‌ریزی مسیر پیشنهادی و کنترل پیش‌بین مدل غیرخطی، رهبر مجازی را ردیابی می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود فاصله وسیله نقلیه تا موانع معقول است. شکل ۱۰ زاویه فرمان و بدنه خودرو،

آن شاخص‌های زیر در نظر گرفته شده است:

۱. در افق پیش‌بین اختلاف بین موقعیت خودرو و نقاط مسیر طراحی شده حداقل گردد (عبارت $((x_{d,i} - x_{c,i})^2 + (y_{d,i} - y_{c,i})^2)$).
۲. در افق پیش‌بین اختلاف بین سرعت خودرو و سرعت مسیر طراحی شده حداقل گردد (عبارت $((V_{d,i}(1) - \dot{x}_{c,i})^2 + (V_{d,i}(2) - \dot{y}_{c,i})^2)$).
۳. در افق پیش‌بین تلاش کنترلی کمینه گردد (عبارت $(w_8 \tau_{1,i}^2 + w_9 \tau_{2,i}^2)$).

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

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

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

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

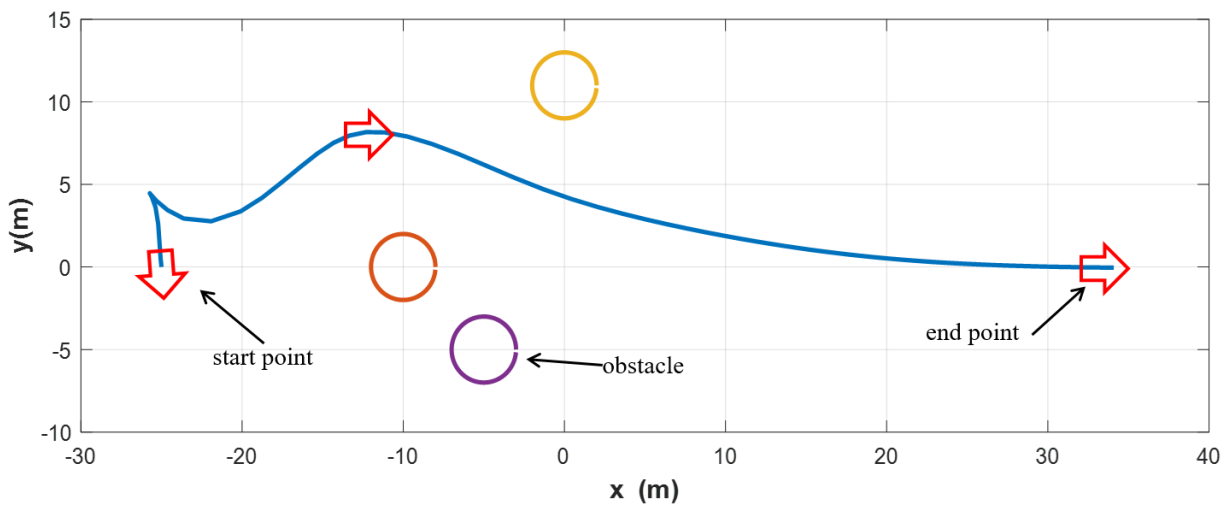
۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد روش طراحی مسیر پیشنهادی با کنترل‌کننده

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

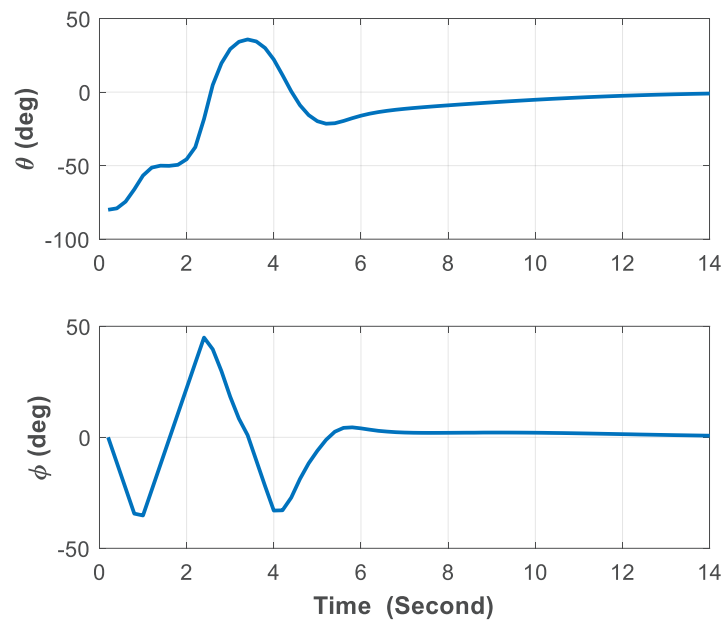
Table 1. Vehicle and controller parameters used in the simulations.

مقدار	نماد	مقدار	نماد
۱۰۰۰	$m(\text{kg})$	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	$\tau_{1,\max}(\text{N})$	۳۰۰۰۰	$\tau_{2,\max}(\text{N})$
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
۵	w_7	۱	w_8
۱	w_9	۱۰۰	p
۴	$R_{\text{car}}(\text{m})$		



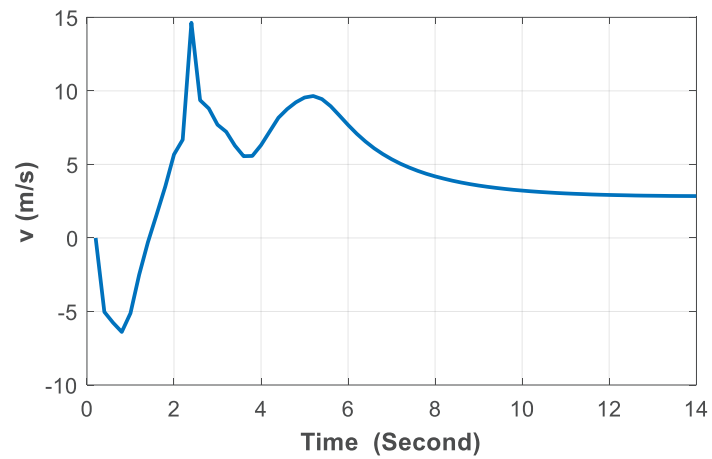
شکل ۵. مسیر خودرو خودران در حال عبور از موانع متعدد

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



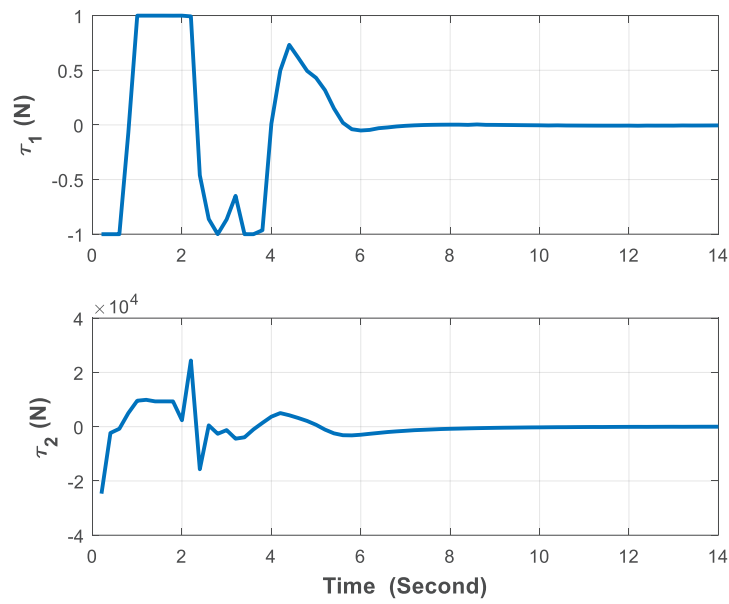
شکل ۶. پاسخ زمانی زاویه بدنه خودرو و زاویه فرمان

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



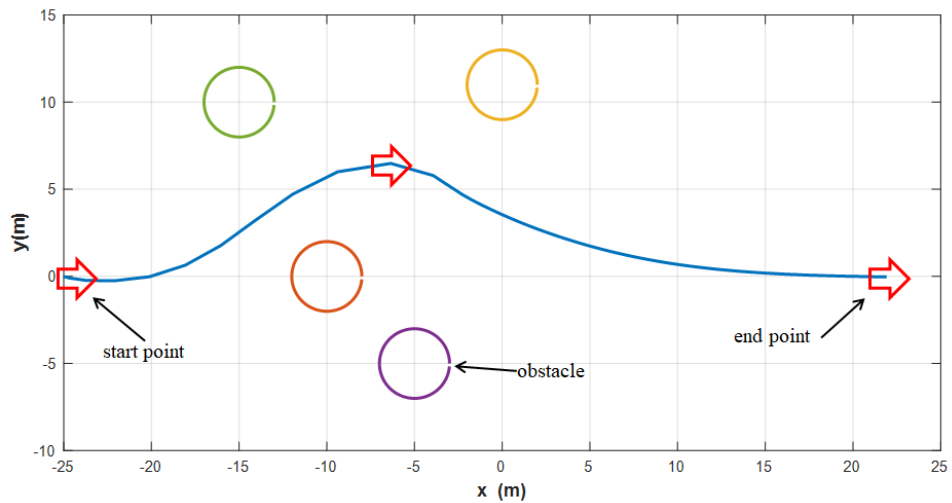
شکل ۷. پاسخ زمانی سرعت خودرو

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



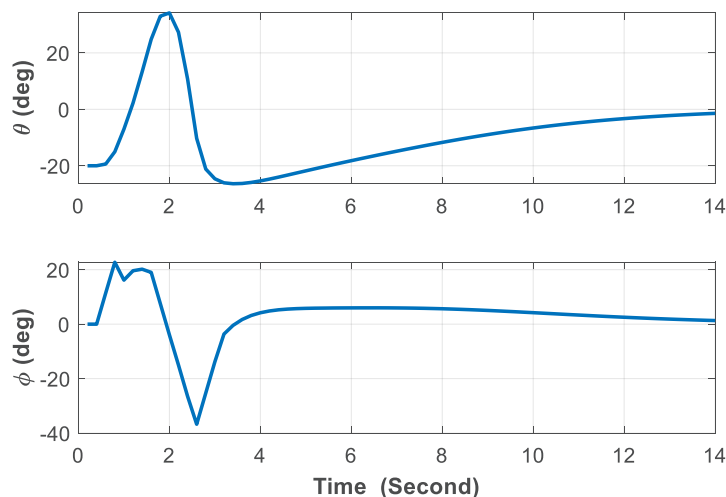
شکل ۸. گشتاورهای فرمان و چرخ جلوی خودرو

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



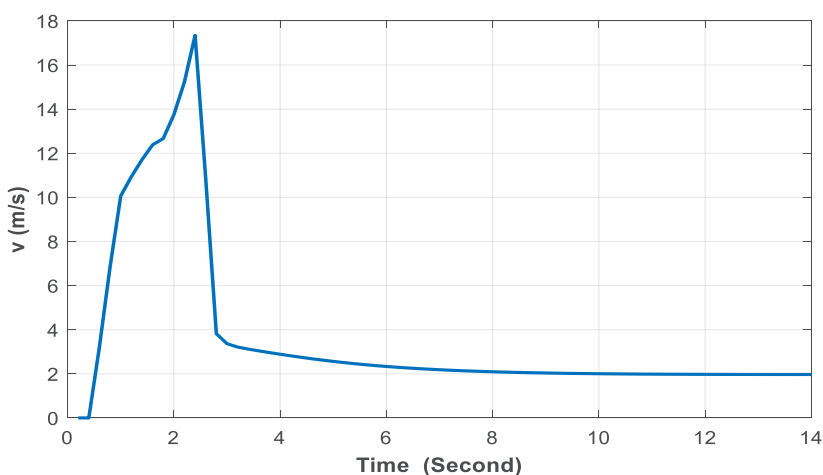
شکل ۹. مسیر خودرو خودران در حال عبور از موانع متعدد

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



شکل ۱۰. پاسخ زمانی زاویه بدنه خودرو و زاویه فرمان

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



شکل ۱۱. پاسخ زمانی سرعت خودرو

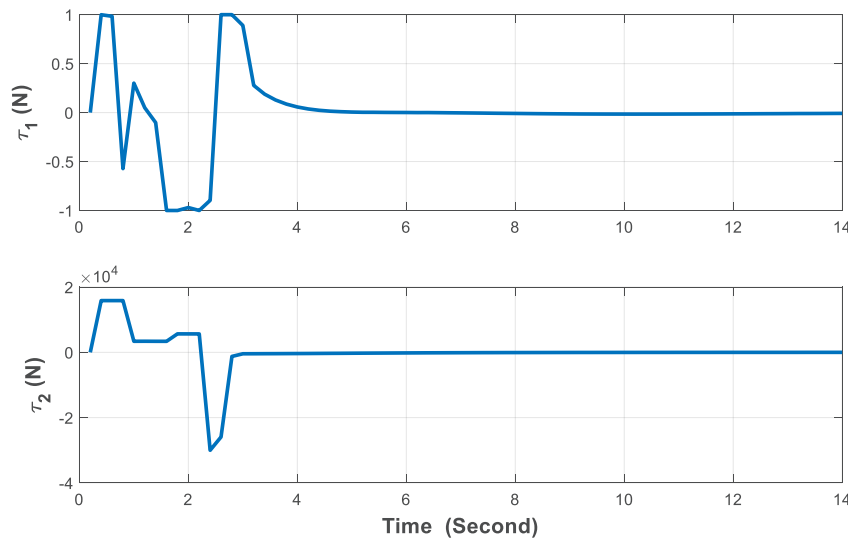
Fig. 11. The vehicle's front wheel and steering wheel torques.

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.

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 مسأله 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.

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. Adireddy, 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,

- 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 دهیم

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)



