



طراحی مانور اجتناب از برخورد با خودروی منحرف مسیر مخالف به کمک کنترل پیش‌بین

مسعود عبداللهی نیا، علی غفاری*، شهرام آزادی

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲

کلمات کلیدی:

انحراف به چپ
اجتناب از برخورد
طراحی مسیر
کنترل پیش‌بین
بهینه‌سازی مقید

خلاصه: انحراف به چپ در مسیرهای دوطرفه، از شرایط حساسی است که می‌تواند سبب برخورد شدید خودروها از روبرو شود. بدلیل تلفات زیاد این تصادفات، ارائه‌ی سیستم‌های هوشمند هدایت خودرو در چنین شرایطی ضرورت دارد و مورد توجه نبوده است. مقاله‌ی حاضر، به طراحی مسیر ایمن و مانورپذیر عدم برخورد با خودروی منحرفی از مسیر روبرو می‌پردازد. رویکرد اصلی، استفاده از کنترل پیش‌بین با افق ۲ ثانیه و مدل پیش‌بین خطی است که حول شرایط کاری، تطابق خوبی با رفتار غیرخطی دارد. برای پیش‌بینی حرکت خودروی مهاجم، رویکردی محافظه‌کارانه مدنظر است و حرکت تا افق ۰/۷ ثانیه، با شتاب جانبی بالایی در دو جهت مدل می‌شود. برای عدم برخورد خودروها، روش نوینی براساس فضاهای اشغالی آینده‌ی خودروی مهاجم ارائه شده، قیدهای اجتناب از برخورد بسادگی مدل‌سازی می‌شوند. هم‌چنین برای تشخیص جهت مناسب مانور اجتنابی، الگوریتمی نوآورانه ارائه شده که در تقابل دور و نزدیک خودروها، معیارهای مختلفی دارد. مجموعه‌ی نهایی، با کنترل فرمان‌پذیری مدل پیش‌بین، مسیر مرجع ایمن خودرو را با شتاب جانبی مقید تولید می‌کند. ارزیابی مجموعه‌ی نهایی با چهار شبیه‌سازی صورت می‌گیرد که تقابل دور و نزدیک و شرایط بحرانی انتخاب جهت 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 توسعه‌ی خودروهای خودران و سیستم‌های پیشرفته‌ی کمک‌راننده^۱ است. در دهه‌ی اخیر، توسعه‌ی سیستم‌های چندسنسوری و ترکیب داده‌ها^۲، دقت تشخیص محیط را بهبود داده و توسعه‌ی عملگرهای برقی خودرو، امکان محول کردن هدایت خودرو به سیستم‌های هوشمند را فراهم می‌کند. بر همین اساس، سیستم‌های هوشمند اجتناب از تصادف^۳ در حال توسعه‌ی روزافزون هستند [۳]. یکی از شرایط بسیار حساس رانندگی، برخورد خودروها از روبرو^۴ است که تنها در کشور آمریکا، منجر به مرگ بیش از ۳۵۰۰ نفر در سال می‌شود و سهم حدوداً ۱۱ درصدی از تلفات رانندگی این کشور را دارد [۴]. در بسیاری از کشورها

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 بی‌درنگ 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 درون‌یابی منحنی [۱۵-۱۱] 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^۵ [۱۸ و ۱۹]، A^* ، D^* و تعمیمات آن‌ها [۲۲-۲۰] هستند. این رویکردها معایب و چالش‌های خاص خود را دارند. به طور کلی، عدم امکان تعریف قیدهای حرکتی خودرو، مناسب نبودن برای موانع متحرک و محیط‌های شلوغ، محاسبات سنگین و نفرین ابعادی^۶، ناهموازی

- 1 Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)
- 2 Sensor/data fusion
- 3 Collision Avoidance Systems
- 4 Head-on collision

5 State Lattice

6 Curse of dimensionality

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghaffari@kntu.ac.ir

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.



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 کنترل‌کننده پیش‌بین برای طراحی و تعقیب مسیر اجتنابی استفاده می‌شود.

کیم و همکاران [۲۹] از مدل پیش‌بین سینماتیکی جرم نقطه‌ای با هدف طراحی مسیر در سناریوهای ساده‌ی شهری با شتاب‌های عرضی بسیار کم استفاده کرده‌اند و نتایج رضایت‌بخش بوده است. نیلسون و همکاران [۳۰] با مدل پیش‌بین مشابه، به طراحی مسیر اجتناب از موانع در جاده‌ی یک‌طرفه پرداخته‌اند و برای تقلید سینماتیک غیرهولونومیک^۴، قیدهایی را بر روی سرعت عرضی مدل پیش‌بین تعریف کرده‌اند. قیدهایی 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 می‌شود. جلال‌معاب [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 می‌شوند. امور 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 می‌کند. لاتارولو و راستلی [۲] نیز، از مدل جرم نقطه‌ای با لحاظ جرک در راستای طولی، برای طراحی مسیر در فرآیند سبقت‌گیری در جاده‌ی دوطرفه استفاده کرده‌اند و قیدهایی اجتناب از برخورد، بر اساس موقعیت عرضی مانع و به صورت خطی تعریف 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^۵ پرداخته است. ایدمن [۳۴] به کنترل یکپارچه‌ی حرکت طولی و عرضی خودرو با مدل پیش‌بین سینماتیک دوچرخ خطی متغیر با زمان^۶ پرداخته است و در هر مقطع زمانی، سرعت خودرو تا انتهای افق پیش‌بینی ثابت و مشخص است. قیدهایی اجتنابی نیز به صورت میدان پتانسیل با فرم مربعی در تابع هزینه وارد می‌شوند. دیکسیت و همکاران [۳۵] از مدل مشابهی با هدف طراحی مسیر خودرو برای سبقت‌گیری در

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 می‌گیرند.

تیان‌یو و همکاران [۲۳ و ۲۴] و هم‌چنین لیو و همکاران [۲۵] به بهینه‌سازی پروفایل سرعت طی شدن مسیرهای منحنی مشخص، تحت قیدهایی پایداری خودرو و اجتناب از موانع پرداخته‌اند. این رویکردها، بهیچ‌یک یکه‌پارچه در حوزه‌ی مکان-زمان ندارند و هم‌چنین ممکن است منحنی‌های هندسی غیر بهینه‌ی 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 می‌شوند. برای این منظور یک تابع فاصله‌ی پیشنهادی ارائه شده است که مشتق‌پذیر از مرتبه‌ی دوم بوده و بهره‌وری 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 می‌شود. تامیزوکا و همکاران در پژوهش دیگری [۵] الگوریتم نوآورانه‌ی رگولاتور مربعی خطی تکرار شونده‌ی مقید^۱ را ارائه داده‌اند که امکان حل مسأله‌ی بهینه‌سازی برای سیستم‌های غیرخطی را، به صورت مقید فراهم می‌کند. در این الگوریتم، موانع محیط به شکل بیضی تعریف و قیدهایی غیرخطی حاصل از آنها، به کمک بسط تیلور مرتبه‌ی اول، خطی‌سازی و در نهایت به فرم مربعی، وارد تابع هزینه می‌شوند. ژانگ و همکاران [۲۷] با اقتباس از پژوهش پَتل و گولارت [۲۸]، یک رویکرد نوین را برای بازنویسی دقیق قیدهایی غیرمشتق‌پذیر و غیرمحدب اجتناب از برخورد، به کمک اصل دوگانگی قوی در بهینه‌سازی محدب^۲ ارائه داده‌اند و حرکت در فضای n بعدی با هدف اجتناب از موانع را مدل‌سازی کرده‌اند.

کنترل مدل پیش‌بین^۳ از شاخص‌ترین رویکردهای بهینه‌سازی در طراحی

1 Constrained Iterative Linear Quadratic Regulator (CILQR)

2 Strong duality of convex optimization

3 Model Predictive Control (MPC)

4 Non-holonomic kinematics

5 Kinematic bicycle model

6 Linear Time Varying (LTV)

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

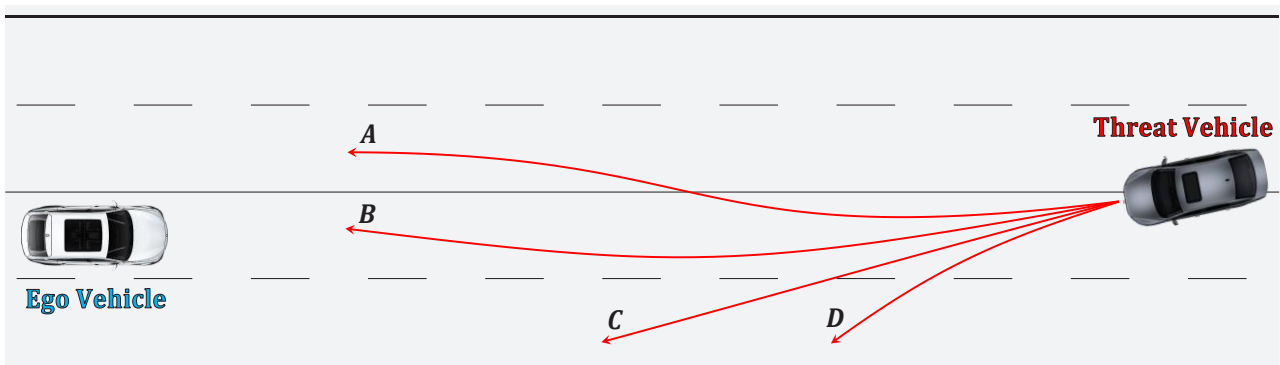
در جمع‌بندی رویکردهای قیدهای اجتنابی، استفاده از توابع فاصله و قیدهای غیرخطی و غیرمحدب به شکل دایره، بیضی، چندضلعی و ... [۵] و ۲۶-۲۸ و ۳۸ و ۴۲ و ۴۴]، عمدتاً محاسبات سنگین و بهره‌وری پایینی دارند. تعریف موانع به شکل میدان‌های پتانسیل و وارد کردن آنها در تابع هزینه نیز [۹ و ۱۰ و ۳۴]، با چالش انتخاب تابع مناسب همراه است و معمولاً مرزهای خطر به خوبی مشخص نمی‌شوند. اما استفاده از قیدهای خطی و تقسیم فضای هندسی جاده به چند زیربخش محدب، بهره‌وری محاسباتی بسیار بالا و کارایی مناسبی دارد و در مقالات متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۳۲-۳۰ و ۳۵ و ۳۶ و ۴۱ و ۴۳]. از آنجایی که تعریف قیدها وابسته به رفتار آینده‌ی موانع است، رویکردهای مختلف مدل‌سازی و پیش‌بینی حرکت موانع در مرجع [۴۵] بررسی و دسته‌بندی شده است. از میان این رویکردها، تحلیل دسترس‌پذیری^۲ [۴۶ و ۴۷] برای تخمین فضاهای اشغالی آینده‌ی خودروهای محیط، تحت قیدهای حرکتی خودرو یا قیدهای رفتاری راننده، کاربرد دارد و تضعیف این قیدها، منجر به تخمین‌های محافظه‌کارانه‌ای 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 برای ارزیابی احتمال برخورد روبرو، بر اساس پارامترهایی نظیر رفتار راننده‌ها، 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 و یا با حرکت مشخص فرض شده‌اند. اما در پژوهش حاضر، نحوه‌ی حرکت 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

جاده‌ی یکطرفه پرداخته‌اند و برای مانع، از ترکیب قیدهای خطی مورب و میدان پتانسیل استفاده شده است. شی و همکاران [۳۶] از دو کنترل‌کننده‌ی پیش‌بین برای طراحی و تعقیب مسیر خودرو در بزرگراهی با سه لاین و سبقت از موانع ثابت و متحرک استفاده کرده‌اند. مدل پیش‌بین 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 [۳۷ و ۳۸] متمرکز بر طراحی مانور سبقت و کنترل حرکت طولی و جانبی خودرو بر اساس مدل پیش‌بینی بوده‌اند که تقریب خطی از مدل سینماتیکی دوچرخ است و قیدهای اجتنابی نیز، بر اساس فواصل دواپری که بر روی خودرو و موانع هستند، تعریف می‌گردد. سپس با خطی‌سازی مسأله و قیدها در هر مقطع، به حل آن با روش برنامه‌ریزی مربعی ترتیبی^۱ می‌پردازند.

کُنگ و همکاران [۳۹] به صورت تجربی به مقایسه‌ی مدل‌های دوچرخ سینماتیکی و دینامیکی برای کنترل پیش‌بین پرداخته‌اند و نتایج نشان می‌دهند که مدل سینماتیکی علاوه بر محاسبات سبک‌تر، خطاهای پیش‌بین کمتری را نیز در سرعت‌های مختلف و مسیرهای منحنی و مواج دارد. با این حال، در مواردی که استفاده از مدل دینامیکی دوچرخ خطی در کنار تایلر خطی، پرداخته شده است. شی و همکاران [۳۶] از این مدل پیش‌بین برای لایه‌ی تعقیب مسیر استفاده کرده‌اند. چن و ژانگ [۴۰] مدل مشابهی را برای کنترل پیش‌بین خودرو در عدم برخورد با عابر پیاده در سرعت ۳۰ کیلومتر بر ساعت به کار برده‌اند. حاجیلو و همکاران [۴۱] نیز، از چنین مدلی برای کنترل پیش‌بین خودرو در عدم برخورد با موانع ثابت ناگهانی، استفاده کرده‌اند. البته در مدل آنها، بحث ترمزگیری نامتقارن برای ایجاد یک گشتاور کمکی برای تغییر 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 می‌شود.

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



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.

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 مسیری 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 پیش‌بین 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 می‌گیرد. در مرحله‌ی دوم نیز، یک تابع هزینه‌ی مربعی براساس خطاهای خروجی‌های آینده‌ی سیستم ایجاد می‌شود که با توجه به خطی بودن مدل پیش‌بین، 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 می‌کند.

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

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 ایمن‌تر عبور از کنار خودروی منحرف، نوآوری دیگری است که در مقاله‌ی حاضر به آن پرداخته شده است.

در ادامه، در بخش ۲ به توصیف اولیه‌ی مسأله پرداخته شده و الگوریتم کنترل پیش‌بین از منظر مدل پیش‌بین، قیدهای ورودی و تابع هزینه، مشخص می‌شود. بخش ۳ به مدلسازی حرکت خودروی مهاجم، نحوه‌ی تعریف قیدهای اجتناب از برخورد و رویکرد تشخیص جهت مانور اجتنابی اختصاص دارد. در بخش ۴ نیز، عملکرد الگوریتم در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و نتایج ارائه می‌شود.

۲- توصیف مسأله و الگوریتم کنترل پیش‌بین

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

- 1 Ego vehicle
- 2 Threat vehicle

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

$$\begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V/L \end{bmatrix} \delta \quad (2)$$

مدل پیش‌بین کنترل‌کننده نیز با گسسته‌سازی این معادلات با زمان نمونه‌برداری T_s ، حاصل می‌شود و ماتریس‌های فضای حالت گسسته‌ی آن، مطابق رابطه‌ی (۳) هستند:

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & VT_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} \frac{(VT_s)^2}{L} \\ \frac{VT_s}{L} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

به منظور مقایسه‌ی رفتار مدل خطی‌سازی شده و مدل غیرخطی اولیه، ابتدا لازم است که دامنه‌ی مجاز برای زاویه‌ی δ چرخ‌ها مشخص گردد. از آنجایی که شعاع انحنای مسیر در رابطه‌ی (۱)، تقریباً به صورت زیر است:

$$\rho \approx \frac{L}{\tan \delta} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن حداکثر شتاب جانبی ۷ متر بر مجذور ثانیه، حداکثر مقدار مجاز برای زاویه‌ی δ به ازای هر سرعت، مشخص می‌شود:

$$a_L = 7 \text{ m/s}^2 \rightarrow \delta_{\max} \approx \tan^{-1} \left(\frac{7L}{V^2} \right) \quad (5)$$

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.)

کنترلی آینده را که الزاماً بهینه نیستند، محاسبه می‌کند. سپس با رویکرد کنترل با افق پسرو^۱، اولین درایه از این ورودی‌های بهینه یا زیر بهینه^۲ را به مدل پیش‌بین اعمال می‌کند و نقطه‌ی آینده از مسیر مرجع خودرو، تحت قیده‌های حرکتی خودرو و قیده‌های اجتناب از برخورد، محاسبه می‌شود. همچنین می‌توان تمامی درایه‌ها تا افق کنترلی را نیز، به مدل خودرو اعمال کرد و دنباله‌ی کامل‌تری از نقاط آینده‌ی 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، برعهده‌ی واحد کنترلی دیگری است که در پژوهش حاضر بررسی نمی‌شود. اما روال کار، تمهیدات و نوآوری‌های مربوط به تعریف قیده‌های اجتناب از برخورد، در بخش آینده (بخش ۳) ارائه شده است.

۲-۱- مدل پیش‌بین و قیده‌های ورودی

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

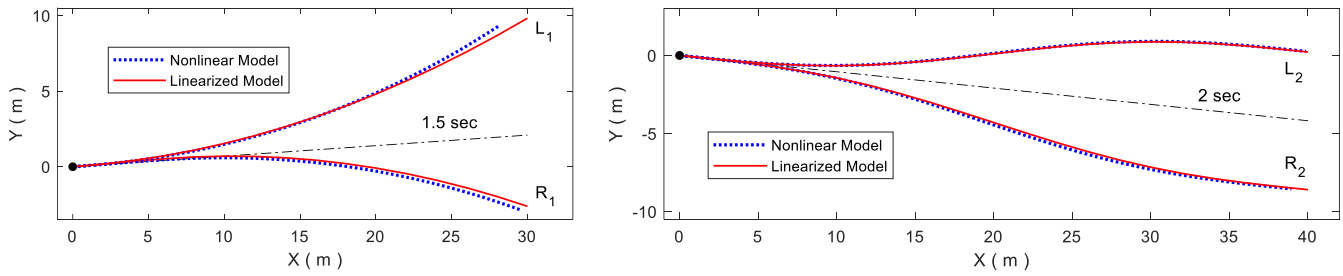
$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos \theta \\ \dot{y} &= V \sin \theta \\ \dot{\theta} &= V/L \tan \delta \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، x و y مختصات حرکت خودرو در راستاهای طولی (افقی) و جانبی (قائم) هستند. θ زاویه‌ی جهت‌گیری خودرو نسبت به محور x ، 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.

ورودی‌های کنترلی سیستم در حالت کلی، V و δ در نظر گرفته می‌شوند. اما در پژوهش حاضر که متمرکز بر حرکت جانبی خودرو است، طبیعتاً V ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها ورودی کنترلی سیستم، زاویه‌ی δ 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 می‌کند. به همین جهت می‌توان معادلات رابطه‌ی (۱) را، حول شرایط کاری معمول (حرکت مستقیم) خطی‌سازی کرد [۳۵]. با توجه

- 1 Receding horizon control
- 2 Suboptimal



شکل ۲. مقایسه‌ی رفتار مدل پیش‌بین خطی با مدل دوچرخ سینماتیکی غیرخطی.

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

$$-\frac{20\pi}{180} \leq \frac{\delta(k+i+1) - \delta(k+i)}{T_s} \leq \frac{20\pi}{180} ; \quad (7)$$

$$i = 0, 1, \dots, N_C - 1$$

۲-۲- تابع هزینه

در مقطع زمانی k ، بردار متغیرهای حالت سیستم تا افق پیش‌بین N_p به صورت رابطه‌ی زیر است:

$$\vec{\mathbf{X}}_k = \begin{Bmatrix} \vec{x}(k+1) \\ \vec{x}(k+2) \\ \vdots \\ \vec{x}(k+N_p) \end{Bmatrix} = M \vec{x}(k) + Q \begin{Bmatrix} \delta(k) \\ \delta(k+1) \\ \vdots \\ \delta(k+N_C-1) \end{Bmatrix} = M \vec{x}(k) + Q \vec{\mathbf{U}}_k \quad (8)$$

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

در ادامه، دو شبیه‌سازی ۱٫۵ و ۲ ثانیه‌ای، برای مقایسه‌ی رفتار مدل‌های غیرخطی و خطی روابط (۱) و (۳) انجام شده است. در شکل ۲، پاسخ‌های دو مدل در این شبیه‌سازی‌ها دیده می‌شود. در هر دو شبیه‌سازی، خودرو سرعت ثابت ۲۰ متر بر ثانیه را دارد. زاویه‌ی اولیه‌ی چرخ در شبیه‌سازی سمت چپ، ۲ درجه است و با نرخ ۲۰ درجه بر ثانیه، به سمت دامنه‌های +۴ و -۴ درجه تغییر می‌کند. زاویه‌ی اولیه‌ی جهت‌گیری خودرو نیز ۴ درجه است. در خصوص شبیه‌سازی سمت راست، زاویه‌ی اولیه‌ی جهت‌گیری خودرو -۶ درجه است و زاویه‌ی چرخ نیز، یک نوسان کامل سینوسی با دامنه‌ی ۴ درجه و دوره‌ی ۲ ثانیه راه، 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 δ 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 δ نیز، مسیر طراحی شده را با ماهیت واقعی سیستم فرمان‌پذیری خودرو، هماهنگ‌تر می‌کند.

در مجموع با در نظر گرفتن افق کنترلی N_C ، تعداد قیدهای دامنه و نرخ زاویه‌ی چرخ، برابر با $4N_C$ خواهد بود که نیمی از آنها مطابق رابطه‌ی (۶)، و نیم دیگر مطابق رابطه‌ی (۷) است.

$$V = 20 \frac{m}{s} \rightarrow -\frac{4\pi}{180} \leq \delta(k+i) \leq \frac{4\pi}{180} ; \quad (6)$$

$$i = 0, 1, \dots, N_C - 1$$

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر، مقدار ثابت
 ۲- متر برای سیگنال مرجع y_r در نظر گرفته می‌شود که در واقع، موقعیت
 عرضی خط مرکزی لاین حرکتی خودرو است.
 با جایگذاری رابطه‌ی (۱۱) در رابطه‌ی (۱۲)، بردار خطاهای آینده به
 صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\bar{\mathbf{E}}_k = Q_y \bar{\mathbf{U}}_k + \bar{\mathbf{P}} \quad (۱۳)$$

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

$$\bar{\mathbf{P}} = M_y \bar{x}(k) - \bar{\mathbf{Y}}_r \quad (۱۴)$$

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

$$J = \bar{\mathbf{E}}_k^T W_e \bar{\mathbf{E}}_k + \bar{\mathbf{U}}_k^T W_u \bar{\mathbf{U}}_k \quad (۱۵)$$

ماتریس‌های وزنی W_u و W_e متقارن و مثبت معین هستند و اهمیت
 کمینه شدن هر یک از جملات تابع هزینه‌ی مربعی 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 W_u
 مقادیر بسیار کوچکی در نظر گرفته می‌شود و الگوریتم کنترل پیش‌بین در
 محاسبات خود، حساسیتی برای کوچک نگه داشتن ورودی‌های کنترلی آینده
 نخواهد داشت.

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

$$M = \begin{bmatrix} A_d \\ A_d^2 \\ \vdots \\ A_d^{N_p} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

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

$$Q_P = \begin{bmatrix} B_d & [0] & [0] & [0] \\ A_d B_d & B_d & [0] & [0] \\ \vdots & \ddots & \ddots & [0] \\ A_d^{N_p-1} B_d & \cdots & A_d B_d & B_d \end{bmatrix}_{(2 \times N_p) \times (N_p)} \quad (۱۰)$$

از آنجایی که سیستم دارای یک ورودی δ با افق کنترلی N_c است،
 ماتریس Q دارای $1 \times N_c$ ستون خواهد بود که $N_c - 1$ ستون اول آن،
 با $N_c - 1$ ستون اول از ماتریس Q_P یکسان است. اما ستون آخر ماتریس
 Q ، 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 می‌شود.

با در نظر گرفتن موقعیت جانبی خودرو به عنوان خروجی هدف سیستم و
 تعریف سیگنال مرجع دلخواه y_r برای آن، می‌توان بردار خطای خروجی را تا
 افق پیش‌بین بدست آورد. موقعیت جانبی خودرو، خروجی اول سیستم است.
 پس در بردار $\bar{\mathbf{X}}_k$ از رابطه‌ی (۸)، درایه‌های فرد مربوط به موقعیت‌های
 جانبی آینده‌ی خودرو تا افق پیش‌بین هستند. به این ترتیب می‌توان
 سطرهای فرد ماتریس‌های M و Q را در نظر گرفته، ماتریس‌های جدید
 M_y و Q_y را تشکیل داد. سپس بردار موقعیت‌های جانبی خودرو تا افق
 پیش‌بین و در مقطع زمانی k را، به صورت زیر نوشت:

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = M_y \bar{x}(k) + Q_y \bar{\mathbf{U}}_k \quad (۱۱)$$

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

$$\bar{\mathbf{E}}_k = \bar{\mathbf{Y}}_k - \begin{Bmatrix} y_r(k+1) \\ y_r(k+2) \\ \vdots \\ y_r(k+N_p) \end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{Y}}_k - \bar{\mathbf{Y}}_r \quad (۱۲)$$

همین اساس، در ادامه به مدل‌سازی حرکت آینده‌ی خودروی مهاجم پرداخته شده و در گام دوم، رویکرد جدیدی برای تعریف قیدهای اجتناب از برخورد با این فضای متحرک، ارائه می‌گردد.

با تعریف قیدهای مذکور، مسأله هنوز کامل نیست و باید یک الگوریتم تصمیم‌سازی نیز به منظور تشخیص جهت مناسب‌تر و ایمن‌تر عبور از کنار خودروی مهاجم طراحی شود. لذا در گام سوم این بخش، رویکرد نوینی برای این منظور ارائه می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی 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 اولیه‌ی 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 سرعت‌گیری خودروی مهاجم وجود ندارد و احتمال آن تقریباً صفر است. لذا با فرض اینکه خودروی مهاجم در بدترین حالت، سرعت خود را حفظ می‌کند، 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 راه، در زمان محدودی تخمین زد.

به این ترتیب، ابتدا یک مرز حاشیه‌ای برای نقاط جلویی خودروی مهاجم در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر، این فاصله در راستای طولی برابر با ۲ متر از سپر جلویی خودروی مهاجم و در راستای عرضی نیز برابر با ۱٫۲ متر از سمت چپ و راست آن است. سپس با فرض اینکه خودروی مهاجم در زمان t_p ، یک قوس دایره‌ای را با سرعت ثابت V و شتاب جانبی a_L ، به سمت چپ و راست طی می‌کند، این مرز حاشیه‌ای در طول زمان t_p توسعه داده می‌شود و حداکثر فضاهای اشغالی خودرو در دو جهت بدست می‌آید.

در شکل ۳، فضاهای اشغالی دو خودروی مختلف به عنوان نمونه مشاهده می‌شود. برای هر کدام از این خودروها سرعت اولیه، حداکثر شتاب

$$\min_{\bar{U}_k} \frac{1}{2} \bar{U}_k^T H \bar{U}_k + f^T \bar{U}_k ; \quad (16)$$

$$\text{such that } \begin{cases} A \cdot \bar{U}_k \leq b \\ A_{eq} \cdot \bar{U}_k = b_{eq} \\ lb \leq \bar{U}_k \leq ub \end{cases}$$

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:

$$H = Q_y^T W_e Q_y + W_u \quad (17)$$

$$f = \bar{P}^T W_e Q_y \quad (18)$$

۳- الگوریتم اجتناب از برخورد

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

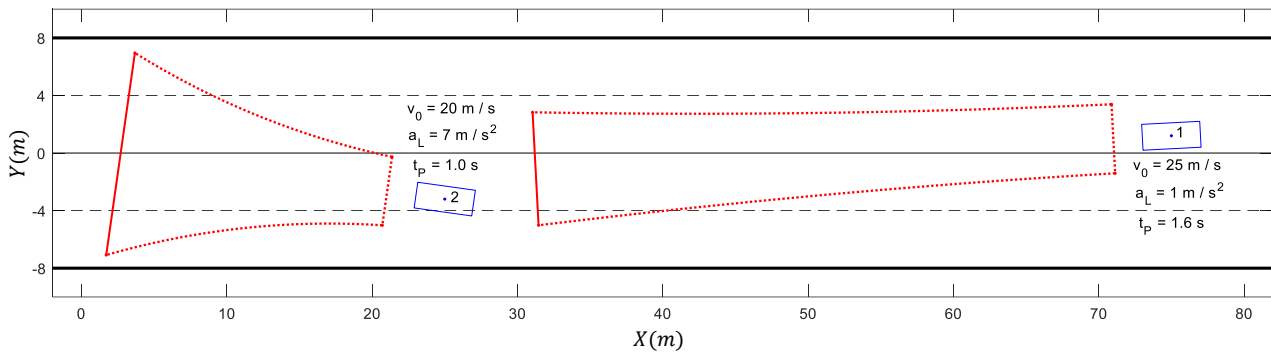
(۱) قیدهای مربوط به مرز چپ و راست جاده.

(۲) قیدهای مربوط به خودروی مهاجم از مسیر روبرو.

در ابتدای کار، به پیاده‌سازی قیدهای مربوط به مرزهای جاده پرداخته می‌شود و سپس بحث عدم برخورد با خودروی مهاجم روبرو، مدنظر قرار می‌گیرد. 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 +۷ تا -۷ متری حفظ کند. به این ترتیب $2N_p$ قید به فرم نامساوی‌های زیر، به مسأله اضافه می‌شود:

$$-7 \leq M_y \bar{x}(k) + Q_y \bar{U}_k \leq 7 \quad (19)$$

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 پیش‌روی خودروی اصلی، ترسیم می‌شود. بر



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

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

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:

$$N_{Col} \approx \left\lfloor \frac{TTC}{T_S} \right\rfloor \quad (21)$$

اگر این گام زمانی پرخطر، در داخل افق پیش‌بین و یا در نزدیکی ورود به آن باشد، می‌توان از چند مقطع قبل و بعد از آن را به عنوان حاشیه‌ی 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 می‌شود. در مقطع زمانی k ، موقعیت عرضی خودرو برای گام‌های آینده در بازه‌ی $N_{Col} - b$ تا $N_{Col} + a$ ، مقید است که بزرگ‌تر از لبه‌ی بالایی فضای اشغالی خودروی مهاجم باشد (موقعیت عرضی h). در شرایط شکل ۴ و عبور از سمت چپ، پارامتر h غیر منفی است. یعنی اگر فضاهای اشغالی کاملاً در مسیر اصلی باشند، h برابر با صفر و قیدها نسبت به خط ممتد تعریف می‌شوند.

در صورتی که زمان برخورد احتمالی بیشتر از 0.7 ثانیه باشد، بهتر است که پارامتر حاشیه‌ی a به نحوی تعیین شود که تا انتهای افق پیش‌بین را پوشش دهد. به این ترتیب برای فواصل دور، موقعیت عرضی خودرو از گام $N_{Col} - b$ تا N_P مقید است که بزرگ‌تر از لبه‌ی بالایی فضای اشغالی

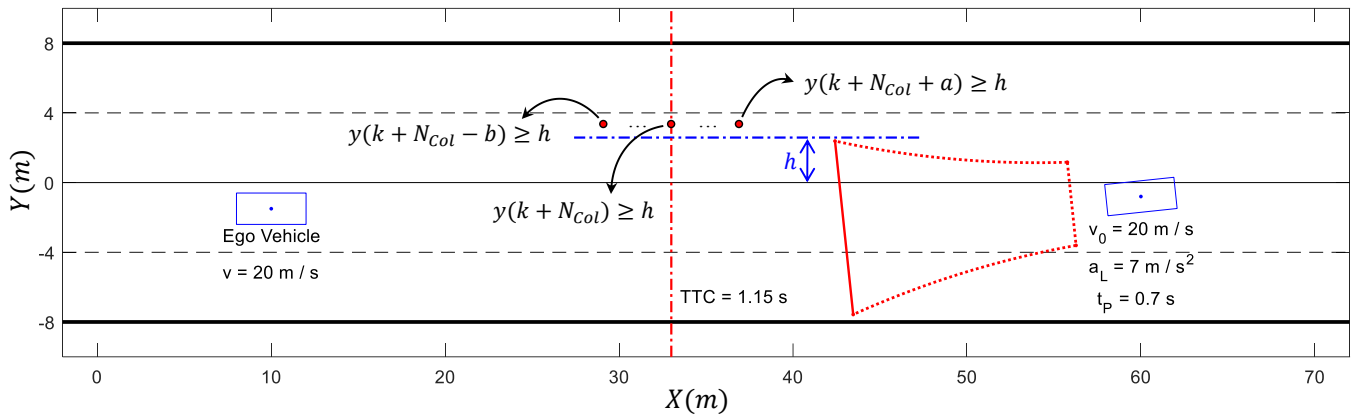
جانبی مورد انتظار و زمان تقریبی برخورد، مشخص شده است.

بدیهی است هر اندازه که شتاب جانبی a_L و زمان پیش‌بینی t_p مقادیر بیشتری داشته باشند، فضای اشغالی بزرگ‌تر شده، تخمین محافظه‌کارانه‌تری از حرکت آینده‌ی خودروی مهاجم حاصل می‌شود. اما بزرگ بودن فضای تخمینی آینده به ویژه در بعد عرضی، می‌تواند تقریباً تمام عرض جاده را پوشش دهد و امکان‌پذیری^۱ حل مسأله و محاسبه‌ی مسیر ایمن را با مشکل مواجه کند. در پژوهش حاضر، شتاب جانبی 7 متر بر مجذور ثانیه با زمان پیش‌بینی 0.7 ثانیه، در نظر گرفته شده است که تخمین کوتاه مدت و محافظه‌کارانه‌ای را از حرکت جانبی خودرو ارائه می‌دهد و در عین حال، عرض فضای اشغالی حاصل نیز تناسب منطقی و خوبی با پهنای جاده دارد. در خصوص زمان پیش‌بینی، باید یک پارامتر مهم را تحت عنوان زمان احتمالی برخورد^۲، 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:

$$TTC \approx \frac{D_{rel} - 2 \times \left(\frac{L}{2}\right)}{V_{rel}} \quad (20)$$

در شرایطی که زمان برخورد کمتر از 0.7 ثانیه باشد، لازم است که زمان پیش‌بینی حرکت خودروی مهاجم، همان زمان برخورد احتمالی در نظر گرفته شود.

- 1 Feasibility
- 2 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.

می‌شوند:

$$A \cdot \vec{U}_k - sV_s \leq b \quad (22)$$

در مواقعی که تمامی قیدها با شکل سخت خود ارضا می‌شوند، مقدار برابر با صفر است و پاسخ مسأله بهینه خواهد بود. اما در باقی مواقع، مقدار مثبت کمینه‌ای 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 0.01 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 بیشتر از یک ثانیه برابر با 0.01 و برای زمان برخورد کمتر از یک ثانیه نیز، برابر با 0.005 در نظر گرفته می‌شود. در واقع برای شرایطی که زمان برخورد احتمالی کوتاه است، قیدهای خودروی مهاجم سخت‌تر از قیدهای مرز جاده هستند و عدم برخورد با خودروی مهاجم، اهمیت بیشتری نسبت به خروج از حاشیه‌های مجاز جاده دارد. اما برای فواصل دورتر، سیستم حساسیت یکسانی نسبت به عدم برخورد و عدم خروج از جاده دارد.

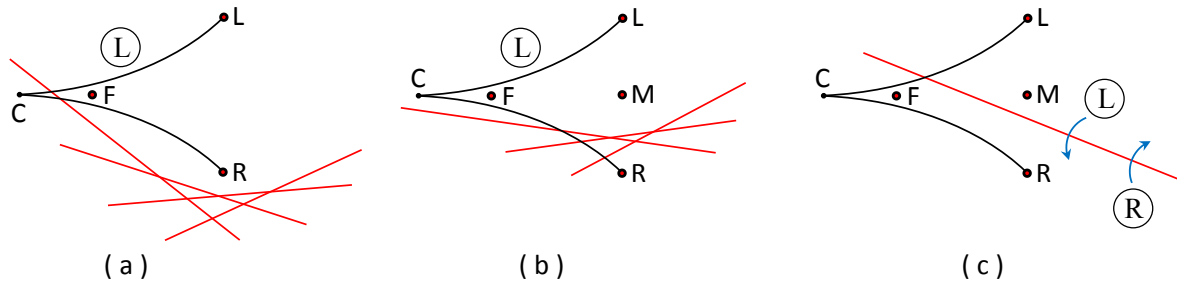
خودروی مهاجم باشد.

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

با مشخص شدن قیدهای مرز جاده و خودروی مهاجم، لازم است که تدبیری برای نرم کردن این قیدها^۱ لحاظ شود. در غیر اینصورت ممکن است در شرایط خاصی، رسیدن به پاسخ بهینه‌ای که تمامی قیدهای سخت^۲ مسأله را ارضا کند، میسر نباشد. برای رفع این چالش، یک متغیر بهینه‌سازی تضعیفی^۳ با نماد s که غیرمنفی است، به بردار متغیرهای \vec{U}_k ، تابع هزینه و قیدها اضافه می‌شود. به این ترتیب، مسأله‌ی بهینه‌سازی جدیدی حاصل می‌شود که از متغیر برای نرم کردن بعضی از قیدها کمک می‌گیرد و در عین حال، تابع هزینه‌ی جدید نیز باعث کمینه ماندن متغیر می‌شود.

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

- 1 Constraint softening
- 2 Hard constraints
- 3 Slack variable



شکل ۵. جهت مناسب مانور در فواصل دور، با توجه به راستا و نرخ تغییرات راستای خودروی مهاجم.

Fig. 5. Suitable swerve direction for far distances, with respect to motion line of threat vehicle.

نقطه‌ی M ، از میانگین مختصات نقاط L و R حاصل می‌شود. نقطه‌ی F نیز، از میانگین مختصات آستانه‌های چپ و راست در افق زمانی 0.3 ثانیه، محاسبه می‌شود. نقطه‌ی F در واقع نقش نقطه‌ی C را با یک حاشیه‌ی امنیت 0.3 ثانیه‌ای ایفا می‌کند.

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 ایمن‌تر 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 ایمن‌تر است. اما در صورتی که چرخش راستا ساعتگرد باشد، انحراف خودرو به سمت راست ایمن‌تر 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 احتمالی، لازم است که اولین تصمیم تا آخرین لحظه حفظ شود. زیرا تغییرات

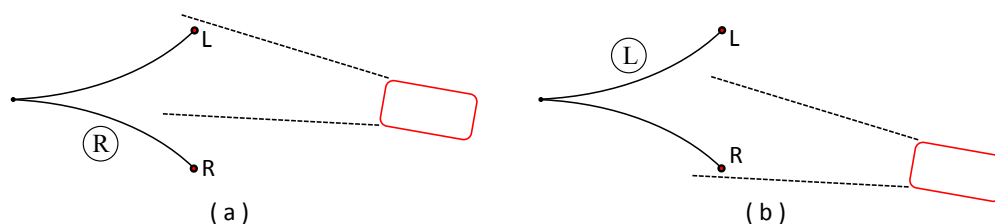
در پایان این بخش، مسأله‌ی مهمی که در خصوص رویکرد ارائه شده باقی می‌ماند، بحث تصمیم‌گیری سیستم برای عبور از سمت چپ یا راست مانع است که در ادامه، یک الگوریتم نوآورانه برای آن ارائه می‌شود.

۳-۳- الگوریتم تشخیص جهت مناسب مانور اجتنابی

الگوریتم تشخیص جهت، دارای دو فاز عملکردی دور و نزدیک است که هر کدام، معیارهای تصمیم‌گیری خاص خود را دارند. در صورتی که زمان احتمالی برخورد بزرگ‌تر از 1 ثانیه باشد، فاز دور فعال است و برای زمان‌های برخورد کمتر از 1 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 امکان‌پذیر 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 قیده‌های زاویه، دو مسیر پیش‌بین با حداکثر انحراف ممکن به سمت چپ و راست مدل‌سازی 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 امکان‌پذیر مسیرهای چپ و راست مشاهده می‌شوند. جهت‌های ایمن مانور اجتنابی نیز، با دایره مشخص شده‌اند.

نقطه‌ی C مرکز هندسی (یا ثقل) خودروی اصلی است. نقاط L و R نیز، حداکثر انحراف ممکن خودرو را، تا افق زمانی 1 ثانیه مشخص می‌کنند.



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

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

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 شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. در تمامی این شبیه‌سازی‌ها، تنها خودروی اصلی و خودروی مهاجم در جاده هستند و سرعت هر کدام ۲۰ متر بر ثانیه فرض شده است. خودروی اصلی از مختصات (۰، -۲) متری شروع به حرکت می‌کند. نقطه‌ی شروع خودروی مهاجم نیز مطابق شکل ۷ و بسته به شبیه‌سازی مورد نظر، در حوالی مختصات (۲، ۱۵۷) متری قرار دارد. زمان این شبیه‌سازی‌ها نیز ۷ ثانیه است.

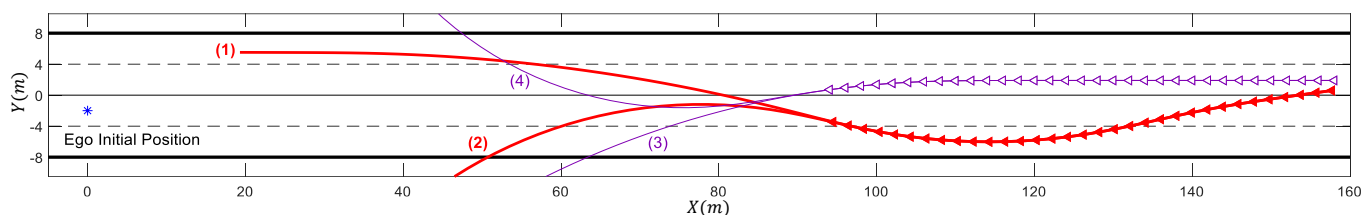
در شبیه‌سازی‌های اول و دوم، خودروی مهاجم از فواصل دورتر از ۱۲۰ متری، با زاویه‌ی انحراف ۸ درجه‌ای و شتاب جانبی ۳/۵ متر بر مجذور ثانیه، وارد مسیر خودروی اصلی می‌شود. الگوریتم طراحی مسیر از فاصله‌ی ۱۲۰ متری خطر را تشخیص داده، شروع به کار می‌کند. خودروی مهاجم با ادامه‌ی انحراف شدید، پس از حدود ۲ ثانیه با شتاب جانبی ۵/۲ متر بر مجذور ثانیه اقدام به بازگشت به مسیر اصلی خود می‌کند و زمانی که به حوالی خط ممتد جاده و موقعیت طولی ۸۰ متری در شکل ۷ می‌رسد، دو مانور مختلف (۱) و (۲) را ادامه می‌دهد. این مانورها برای شبیه‌سازی‌های اول و دوم هستند. مانور (۲) 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 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 منحرف می‌شود.

در شبیه‌سازی سوم، خودروی مهاجم از فاصله‌ی حدوداً ۴۰ متری

مکرر تصمیم در لحظات پایانی، تنها مانع فاصله گرفتن خودروی اصلی از مسیر احتمالی خودروی مهاجم می‌شود. روال تصمیم‌گیری 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 ایمن‌تر است. اما در صورتی که هر دو نقطه داخل یا خارج فضای مذکور باشند، روال تصمیم‌گیری بر اساس الگوریتم شکل ۵ انجام می‌شود.

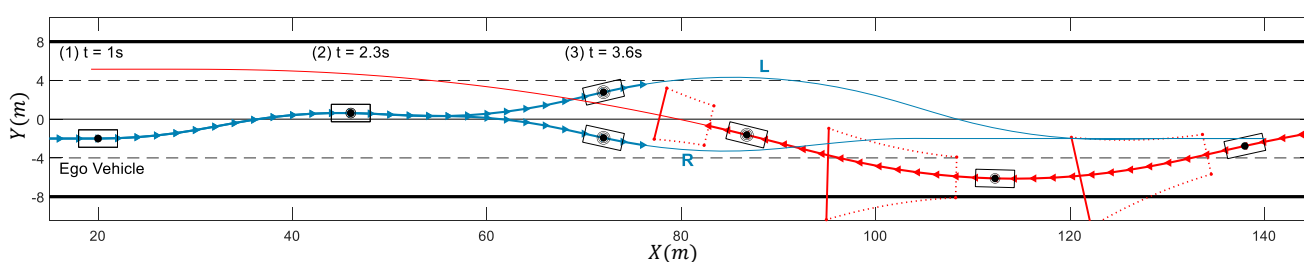
۴- شبیه‌سازی‌ها و نتایج

پس از پیاده سازی الگوریتم کنترل مدل پیش‌بین در نرم‌افزار متلب و تعریف قیدها، به ارزیابی الگوریتم به کمک چهار شبیه‌سازی پرداخته می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها به نحوی طراحی شده‌اند که ضمن ارزیابی عملکرد سیستم در مواجهه‌ی 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 سانتی‌متری در شرایط اولیه‌ی خودروی مهاجم، الگوریتم اگر لازم باشد می‌تواند دو مانور اجتنابی ایمن با جهت‌های متمایز را طراحی کند. کنترل‌کننده‌ی مدل پیش‌بین، با افق پیش‌بینی ۲۰، افق کنترلی ۵ و گام زمانی ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مسأله‌ی کنترل پیش‌بین و طراحی مسیر در هر مقطع زمانی، برای ۲ ثانیه‌ی آینده حل می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها فرض شده است که خودروی اصلی به کمک سنسورهای رادار، لایدار، دوربین و سایر سنسورهای اینرسی، امکان رصد



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).

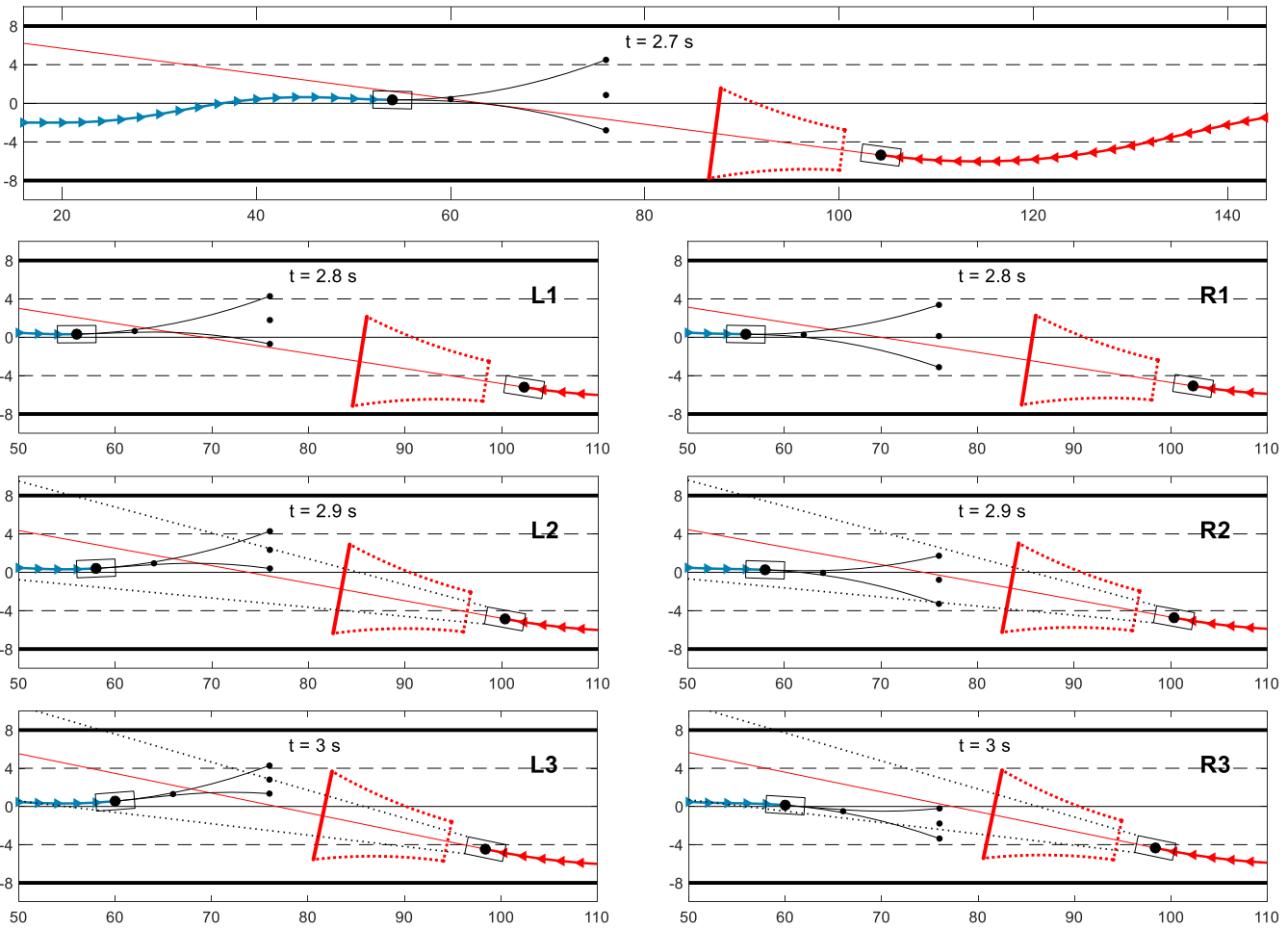
Fig. 8. Threat detection from 120m and collision avoidance maneuvers to left and right (first simulation).

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 ۰٫۱ ثانیه را نشان می‌دهند. 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 ۱۲۰ متر می‌رسد و الگوریتم طراحی مسیر شروع به کار می‌کند. الگوریتم تعیین جهت، مانور اجتنابی از سمت چپ را انتخاب می‌کند. با توجه به اینکه خودروی مهاجم و فضاهای اشغالی آینده‌اش تا افق زمانی ۰٫۷ ثانیه، کاملاً در مسیر خودروی اصلی قرار دارند، لذا قیده‌های اجتناب از برخورد، نسبت به خط ممتد جاده با موقعیت عرضی صفر تعریف می‌شوند. به این ترتیب خودروی اصلی به سمت خط ممتد جاده متمایل می‌شود. در مقطع زمانی (۲)، خودروی اصلی کمی از خط ممتد عبور کرده است، در حالی که خودروی مهاجم با شتاب جانبی ۵٫۲ متر بر مجذور ثانیه، قصد بازگشت به مسیر اصلی خود را دارد. پس از ۰٫۴ ثانیه از مقطع زمانی (۲)، راستای خودروی مهاجم، یک وضعیت مرزی را برای الگوریتم تعیین جهت ایجاد می‌کند که در نمای

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 شبیه‌سازی‌های اول و سوم، مسیر حرکت و تغییر جهت خودروی مهاجم به گونه‌ای است که الگوریتم تعیین جهت مانور، در یک مقطع زمانی از اواسط شبیه‌سازی، در مرز انتخاب جهت چپ یا راست قرار می‌گیرد. در هر یک از این شبیه‌سازی‌ها برای ارزیابی حساسیت عملکرد الگوریتم در چنین شرایطی، تغییرات چند سانتی‌متری در موقعیت اولیه‌ی خودروی مهاجم اعمال می‌شود و الگوریتم می‌تواند ۲ مانور اجتنابی ایمن با جهت‌های متمایز را، برای دو مسیر بسیار مشابه با اختلاف چند سانتی‌متری، طراحی کند.



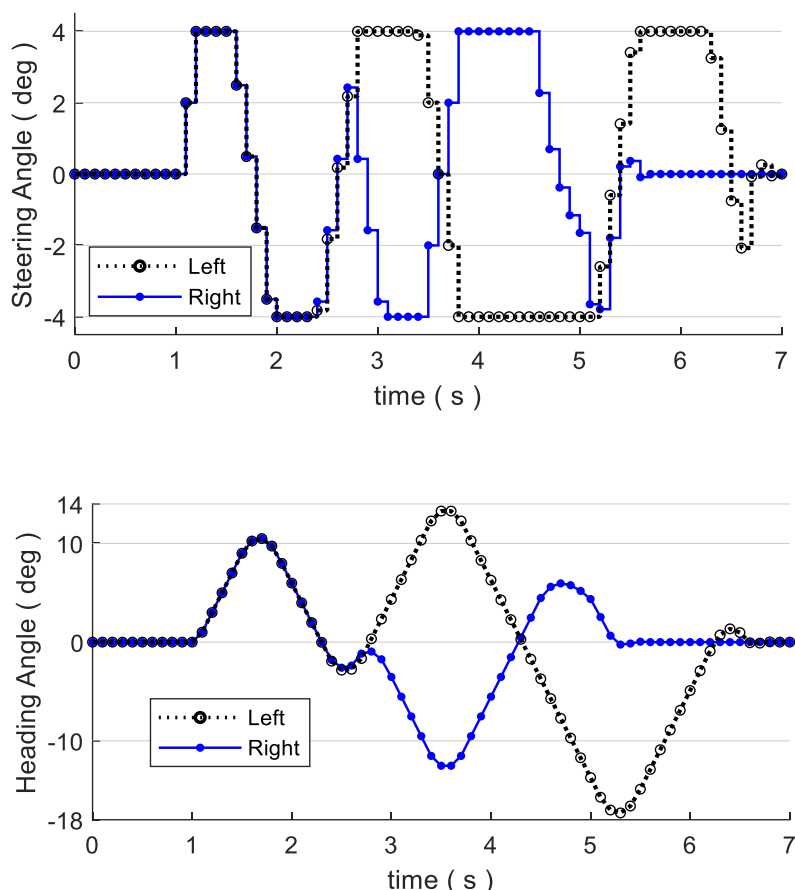
شکل ۹. وضعیت مرزی تعیین جهت مانور در شبیه‌سازی اول و سه مقطع زمانی آینده برای مانورهای چپ و راست.

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

لذا تعیین جهت، مطابق الگوریتم شکل ۵ ادامه می‌یابد. اما از مقطع زمانی L_2 و R_2 ، زمان برخورد کمتر از ۱ ثانیه می‌شود و تعیین جهت بر اساس الگوریتم شکل ۶ ادامه می‌یابد. به این ترتیب، الگوریتم تعیین جهت به خوبی توانسته است که تمایز لازم را در وضعیت مرزی مذکور ایجاد کند. در واقع نکته‌ی حائز 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

بالایی شکل ۹، قابل مشاهده است.

مطابق نمای بالایی شکل ۹، راستای خودروی مهاجم بین نقاط M و R و منطبق بر نقطه‌ی 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 فاصله‌ی چند سانتی‌متری 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 L_1 تا L_3 و R_1 تا R_3 از شکل ۹، سه مقطع زمانی پس از تعیین جهت چپ و راست مشاهده می‌شوند. در مقاطع L_1 و R_1 ، زمان برخورد احتمالی دو خودرو هنوز بیشتر از ۱ ثانیه است و



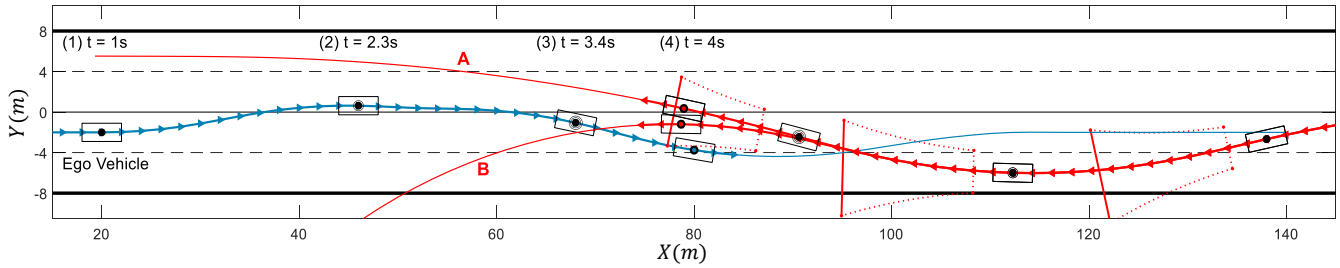
شکل ۱۰. زاویه‌ی چرخ و زاویه‌ی جهت‌گیری خودرو در مانورهای چپ و راست شبیه‌سازی اول.

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

۴-۲- شبیه‌سازی دوم

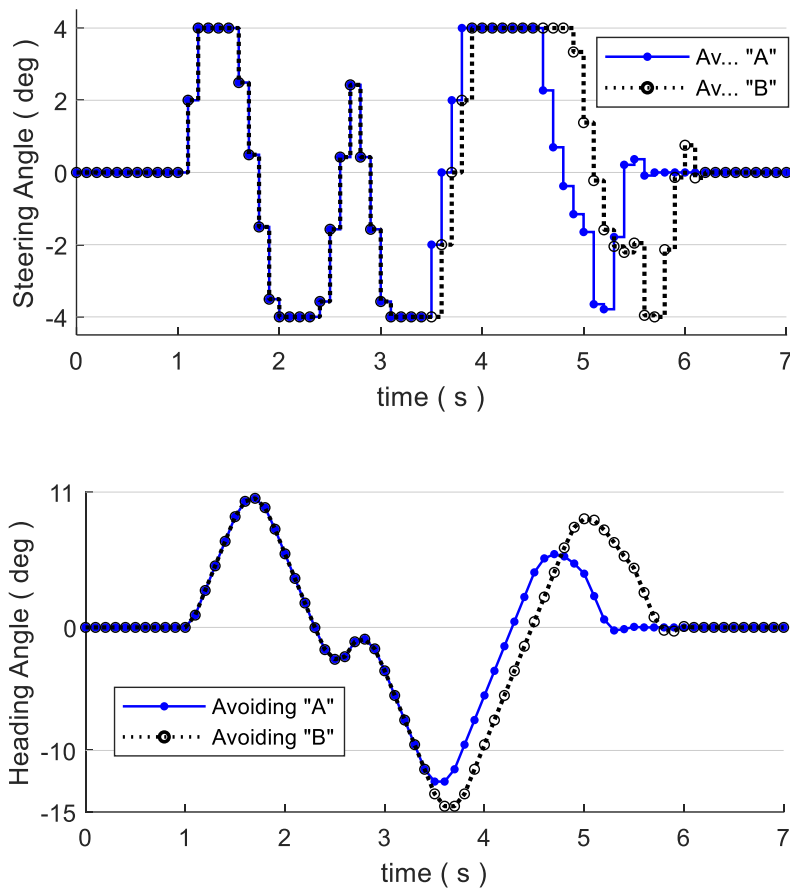
در این شبیه‌سازی به ارزیابی مقاوم بودن سیستم طراحی مسیر، نسبت به تغییر جهت ناگهانی و شدید خودروی مهاجم در فواصل بسیار نزدیک پرداخته می‌شود. در شکل ۱۱، نمای کلی مواجهه‌ی دو خودرو قابل مشاهده است. خودروی مهاجم دو مانور A و B را انجام می‌دهد. مانور A، دقیقاً همان مانور شبیه‌سازی اول است و از شرایط اولیه‌ی آغاز شده که منجر به تعیین جهت سمت راست برای مانور اجتنابی خودروی اصلی می‌شود. 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 مسیر مخالف منحرف می‌شود. از آنجایی که فاصله‌ی دو خودرو بسیار نزدیک شده است، الگوریتم تعیین جهت دیگر نمی‌تواند 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.

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 می‌شود 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 می‌گردد. در نمای راست از شکل ۱۰، خروجی کنترل‌کننده‌ی مدل پیش‌بینی (زاویه‌ی چرخ‌های جلو) برای دو مانور اجتنابی چپ و راست شبیه‌سازی اول، مشاهده می‌شود. مطابق انتظار، این خروجی مقید به دامنه‌ی ۴ درجه‌ای و نرخ تغییرات ۲۰ درجه بر ثانیه است. در نمای چپ از شکل ۱۰ نیز، زاویه‌ی جهت‌گیری خودروی اصلی در دو مانور، قابل مشاهده است. با توجه به منحنی‌های مسیر ارائه شده در شکل ۸، از ارائه‌ی موقعیت جانبی خودروی اصلی صرف نظر می‌شود.



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.

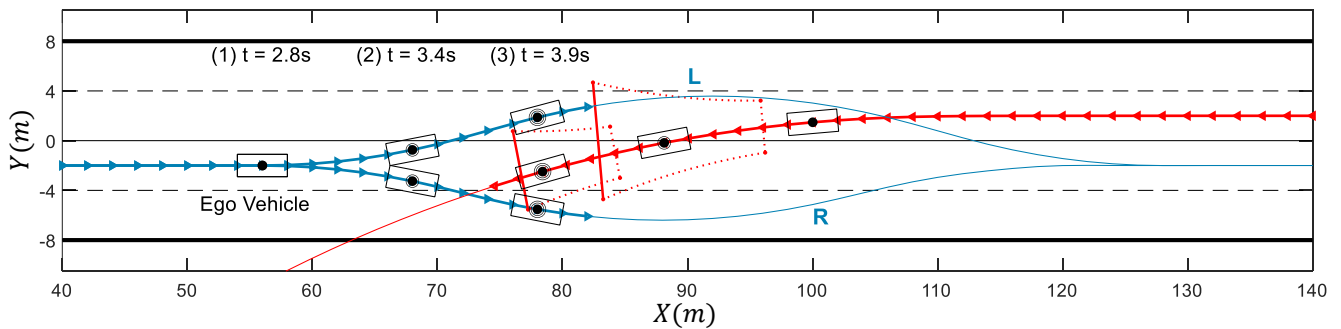


شکل ۱۲. زاویه‌ی چرخ و زاویه‌ی جهت‌گیری خودرو برای اجتناب از برخورد با مانورهای A و B خودروی مهاجم در شبیه‌سازی دوم.

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 می‌شود. در نمای چپ شکل ۱۲ نیز، زاویه‌ی جهت‌گیری 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 می‌شود. در نمای راست از شکل ۱۲، خروجی کنترل‌کننده‌ی مدل پیش‌بینی (زاویه‌ی چرخ‌ها) برای



شکل ۱۳. تشخیص خطر از فاصله 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).

توجه به فاصله‌ی نزدیک خودروها، نتیجه‌ی آن برای لحظات آینده، ثابت بماند. در نمای راست از شکل ۱۵، خروجی کنترل‌کننده‌ی مدل پیش‌بین (زاویه‌ی چرخ‌ها) برای دو مانور اجتنابی چپ و راست شبیه‌سازی سوم، مشاهده می‌شود. در نمای چپ شکل ۱۵، نیز، زاویه‌ی جهت‌گیری خودروی اصلی قابل مشاهده است.

۴-۴- شبیه‌سازی چهارم

در شکل ۱۶، نمای کلی مواجهه‌ی خودروها در شبیه‌سازی چهارم مشاهده می‌شود. خودروی مهاجم دو مانور A و B را انجام می‌دهد. مانور A، دقیقاً همان مانور شبیه‌سازی سوم است و از شرایط اولیه‌ی آغاز شده که منجر به تعیین جهت سمت چپ برای مانور اجتنابی خودروی اصلی می‌شود. 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 می‌گردد. از آنجایی که فاصله‌ی دو خودرو بسیار نزدیک شده است، الگوریتم تعیین جهت دیگر نمی‌تواند جهت 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.

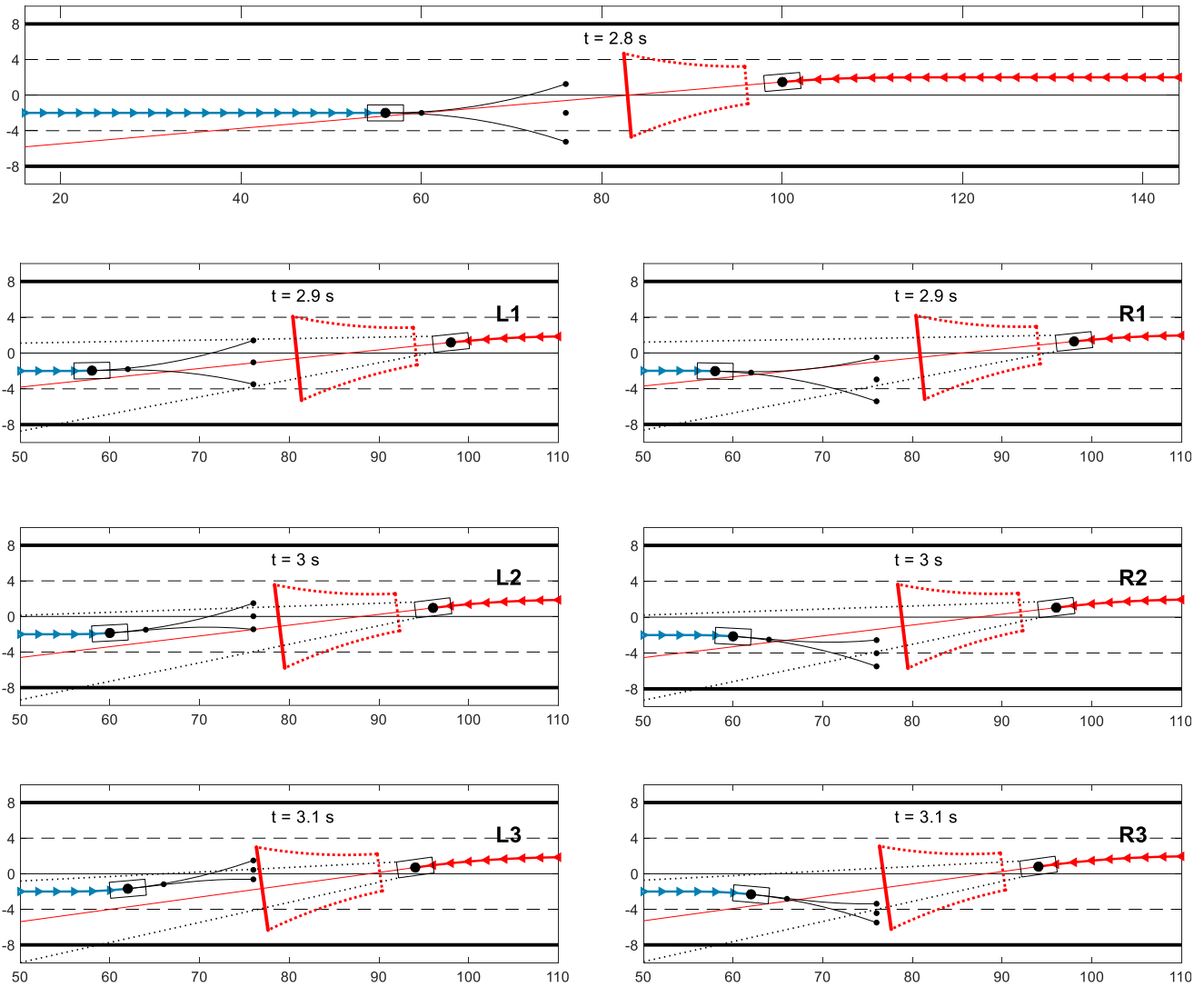
مطابق شکل ۱۶، سیستم طراحی مسیر به خوبی توانسته است که مانور ایمنی را از سمت چپ خودروی مهاجم، حتی با وجود مانور بحرانی B، طراحی کند. در مقطع زمانی (۳)، عبور خودروها از کنار هم و با حاشیه‌ی مناسبی دیده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده و زاویه‌ی جهت‌گیری خودرو در این شبیه‌سازی، کاملاً مشابه منحنی‌های نقطه‌چین شکل ۱۵ است.

به مانور اجتناب از A).

۴-۳- شبیه‌سازی سوم

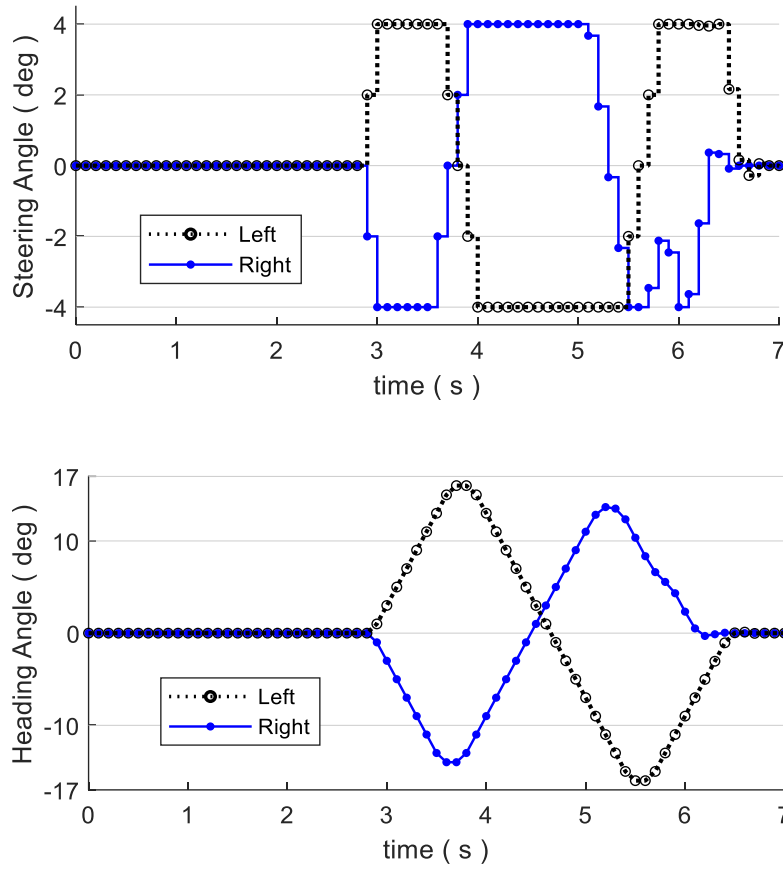
در این شبیه‌سازی، خودروی مهاجم از فاصله‌ی کمتر از ۴۵ متری خودروی اصلی، انحراف به چپ با شتاب جانبی ۳٫۵ متر بر مجذور ثانیه را شروع می‌کند. در شکل ۱۳، نمای کلی مواجهه‌ی دو خودرو دیده می‌شود. در مقطع زمانی (۱)، تشخیص خطر و طراحی مسیر اجتنابی، شروع می‌شود. مشابه شبیه‌سازی اول، در این شبیه‌سازی نیز یک وضعیت مرزی برای الگوریتم تعیین جهت پیش می‌آید که در نمای بالایی شکل ۱۴، قابل مشاهده است. در مقطع زمانی ۲٫۸ ثانیه، راستای خودروی مهاجم بین نقاط M و L و منطبق بر نقطه‌ی F از شکل ۵ قرار می‌گیرد و با توجه به نرخ پادساعتگرد آن، انحرافات جزئی از این شرایط می‌تواند منجر به انتخاب جهت چپ یا راست توسط الگوریتم تعیین جهت شود. لذا در این شبیه‌سازی نیز، دو موقعیت اولیه با فاصله‌ی چند سانتی‌متری 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 L_۱ تا L_۳ و R_۱ تا R_۳ از شکل ۱۴، سه مقطع زمانی پس از تعیین جهت چپ و راست مشاهده می‌شوند. در نماهای L_۱ و R_۱، زمان برخورد احتمالی خودروها کمتر از ۱ ثانیه است و لذا تعیین جهت بر اساس الگوریتم شکل ۶ صورت می‌گیرد. از طرفی با دقت در نمای L_۱، ملاحظه می‌شود که نقاط انتهایی مسیرهای امکان‌پذیر چپ و راست خودروی اصلی (نقاط L و R از شکل ۶)، هر دو در فضای داخلی نقطه‌چین‌ها قرار دارند. لذا تعیین جهت در نمای L_۱، باید بر اساس الگوریتم شکل ۵ صورت گیرد و با



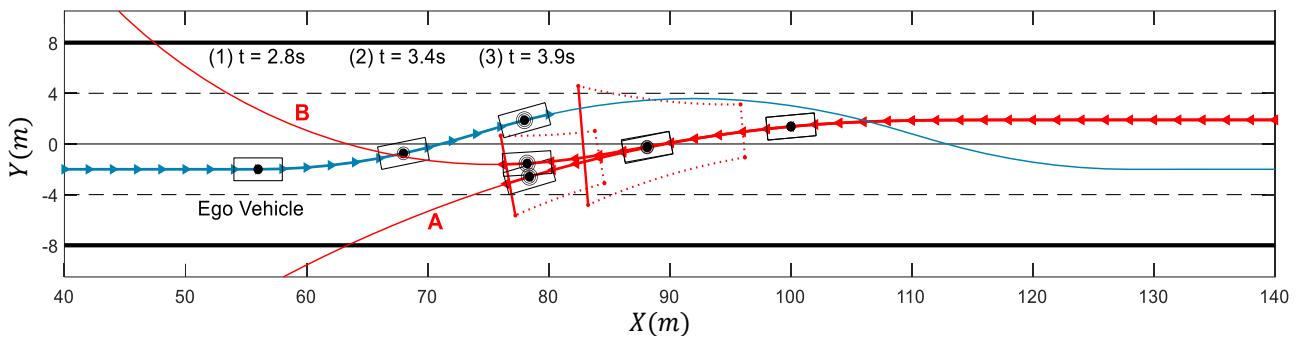
شکل ۱۴. وضعیت مرزی تعیین جهت مانور در شبیه‌سازی سوم و سه مقطع زمانی آینده برای مانورهای چپ و راست.

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 جهت‌گیری 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 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- نتیجه گیری

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 مدل‌های خطی‌سازی 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 قیده‌های حرکتی خودرو و قیده‌های 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، قیده‌های مربوط به زاویه‌ی فرمان‌پذیری خودرو، نرخ این زاویه و هم‌چنین مرزهای جاده‌ی دوطرفه، تعریف شده‌اند. در گام دوم، یک تخمین محافظه‌کارانه از حرکت آینده‌ی خودروی مهاجم روبرو، بر اساس تحلیل دسترس‌پذیری در نظر گرفته می‌شود. سپس یک روش نوین برای تعریف قیده‌های ساده و خطی اجتناب از برخورد، نسبت به فضا‌های آینده‌ی خودروی مهاجم، ارائه می‌شود. در گام بعدی، یک الگوریتم نوآورانه با هدف تشخیص جهت ایمن‌تر مانور اجتنابی، مطرح می‌گردد و در گام آخر نیز، به ارزیابی مجموعه‌ی نهایی در چهار سناریوی مختلف پرداخته می‌شود. 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 می‌شود.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

V	سرعت خودرو، m/s
L	فاصله‌ی محورهای خودرو، m
T_S	زمان نمونه‌برداری، s
a_L	شتاب جانبی خودرو، m/s^2
D_{rel}	فاصله‌ی نسبی خودروها، m
V_{rel}	سرعت نسبی خودروها، m/s
TTC	زمان تقریبی برخورد احتمالی، s

علائم یونانی

θ	زاویه‌ی جهت‌گیری خودرو، rad
δ	زاویه‌ی چرخ جلو (ورودی کنترلی)، rad
N_P	افق پیش‌بینی
N_C	افق کنترل
N_{Col}	افق برخورد احتمالی
\vec{U}_k	بردار ورودی‌های کنترلی بهینه تا افق کنترل
\vec{Y}_k	بردار موقعیت‌های جانبی خودرو تا افق پیش‌بینی
\vec{Y}_r	بردار موقعیت‌های جانبی مرجع خودرو تا افق پیش‌بینی
\vec{E}_k	بردار خطای موقعیت‌های جانبی خودرو تا افق پیش‌بینی
ρ	شعاع انحنای مسیر حرکت خودرو، m

- 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 real-time 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. Milanés, 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
- [1] 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, Real-time 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

- 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. Sjöberg, 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 interpolation-based 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



