ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):501-516

Trajectory Planning and Simultaneous Longitudinal and Lateral Control of Vehicle Based on the Surrounding Vehicles Decisions During the Lane Change Maneuver

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Rafat M.[1]
Azadi Sh.[1*]
Analooee A.[1]
Samiee S.[2]
Rezaei H.[1]

How to cite this article
Rafat M, Azadi Sh, Analooee A, Samiee S, Rezaei H. Trajectory Planning and Simultaneous Longitudinal and Lateral Control of Vehicle Based on the Surrounding Vehicles Decisions During the Lane Change Maneuver. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(8):501-516.

[1] Mechanical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
[2] Institute of Automotive Engineering, Graz University of Technology, Austria.

***Correspondence**
Address: Mechanical Engineering Department, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
Phone: -
Fax: -
azadi@kntu.ac.ir

Article History
Received: December 27, 2020
Accepted: February 14, 2021
ePublished: July 07, 2021

ABSTRACT

With the increasing number of road accidents and driver assistance systems development, the importance of automated vehicles has increased more than ever. As the issue of automated vehicles comes up, attending to their safety and the impact of the other vehicles in traffic flow on their performance dramatically increased. One of the most important problems for automated vehicles is designing and controlling the trajectory regarding the surrounding vehicles in transient dynamic traffic conditions during complicated maneuvers. Although various studies have been performed in the field of lane change in dynamic traffic conditions and even in critical high speed, considering the transient dynamic conditions has been limited to the beginning of the maneuver and no solution has been provided for the surrounding vehicles' immediate changes during the maneuver. The algorithm presented in this paper is able to design new safe optimized trajectories according to the sudden decisions of the surrounding vehicles during the lane change maneuver, also ensures collision avoidance in the whole maneuver via vehicle's simultaneous longitudinal and lateral control. After evaluating the decision-making unit's performance by real driving tests, the presented algorithm is simulated with different scenarios in complicated transient dynamic traffic conditions by using MATLAB software and its desired performance has been proven in the dynamic environment of IPG CarMaker, in the presence of surrounding vehicles.

Keywords Lane change, Path Planning, Decision Making, Sliding Mode Controller, Automated Vehicles.

CITATION LINKS

[1] Road Safety. [2] Review of advanced driver assistance systems (ADAS). [3] Framework for simulation-based lane change control ... [4] Discretionary Lane Change Model for Intelligent ... [5] A predictive model of discretionary lane change behavior considering ... [6] Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking ... [7] Path planning and stability control of collision avoidance system ... [8] Coupled longitudinal and lateral control for an autonomous ... [9] Autonomous vehicle active safety system based ... [10] Robust trajectory tracking error model-based predictive ... [11] Obstacle avoidance control of unmanned ground ... [12] Model Predictive Control-based Lane Change Control System ... [13] Implementation and development of a trajectory tracking control ... [14] Surround Vehicles Trajectory Analysis ... [15] Coordinated Adaptive Cruise Control... [16] Model Predictive Path Planning with Time-Varying ... [17] A Car-Following Model Considering Preceding Vehicle ... [18] A Deep Learning Method for Lane Changing Situation ... [19] A Novel Lane Change Decision-Making Model of Autonomous ... [20] Trajectory planning and integrated control ... [21] A Model Predictive Cooperative Adaptive ... [22] Autonomous vehicle collision avoidance system using path planning ... [23] How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle ... [24] Optimal Trajectory design for Automatic Lane Change in Autonomous Vehicles. [25] The Multilayer Perceptron Approach to Lateral Motion Prediction ... [26] Scenario Model Predictive Control for Robust Adaptive Cruise Control ... [27] General Behavior and Motion Model for Automated Lane Change. [28] On path planning methods for automotive collision avoidance. [29] Towards a decision making algorithm for automatic lane change maneuver ... [30] The Design of Driver Drowsiness Detection System Based ... [31] A novel design of differential evolution for solving discrete ... [32] MSC.Software ... [33] Modeling Active Perception Sensors for Real-Time Virtual Validation ...

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

طراحی مسیر و کنترل همزمان طولی و عرضی خودرو بر اساس تصمیمات خوردوهای اطراف در حین مانور تعویض خط

محسن رفعت
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
شهرام آزادی*
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
علی آنالویی
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
سجاد سمیعی
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی گراتز، اتریش
حمیدرضا رضایی
مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

چکیده
با گسترش روزافزون تصادفات جاده‌ای و به دنبال آن توسعه سیستم‌های کمک راننده، اهمیت خودروهای خودران بیش از پیش افزایش یافته است. همزمان با مطرح شدن بحث خودروهای خودران، لزوم توجه به ایمنی این خودروها و تاثیرات سایر خودروهای حاضر در جریان ترافیک بر عملکرد آنها نیز افزایش می‌یابد. طراحی و کنترل مسیر حرکت با در نظرگرفتن خودروهای اطراف در شرایط ترافیکی دینامیکی ناپایدار در حین مانورهای پیچیده از مهمترین مشکلات پیش‌روی خودروهای خودران می‌باشند. علی‌رغم پژوهش‌های مختلف در حوزه تعویض خط در شرایط ترافیکی پویا و حتی سرعت‌های بحرانی، درنظرگرفتن شرایط دینامیکی گذرا در آنها محدود به لحظه شروع مانور بوده و راه حلی برای تغییرات لحظه‌ای خودروهای اطراف در حین مانور ارائه نشده است. الگوریتم ارائه شده در این مقاله، قادر است با توجه به تصمیمات ناگهانی خودروهای اطراف در حین مانور، مسیرهای ایمن جدید را به صورت بهینه طراحی کند، همچنین اجتناب از برخورد در سراسر مانور را از طریق کنترل همزمان طولی و عرضی خودرو تضمین می کند. پس از ارزیابی عملکرد واحد تصمیم‌گیری توسط آزمون‌های رانندگی واقعی، الگوریتم ارائه شده با سناریوهای مختلف در شرایط پیچیده ترافیکی گذرای دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و عملکرد مطلوب آن در محیط دینامیکی IPG CarMaker در حضور خودروهای اطراف به اثبات رسیده است.

کلیدواژه‌ها: تعویض خط، طراحی مسیر، تصمیم‌گیری، کنترل‌کننده مود لغزان، خودروهای خودران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۶
*نویسنده مسئول: azadi@kntu.ac.ir

۱- مقدمه
امروزه علی‌رغم توسعه روزافزون سیستم‌های کمک راننده و نقش آن در جهت کاهش تصادفات جاده‌ای، با انتشار تعداد مرگ و میر و تلفات انسانی ناشی از تصادفات جاده‌ای در کنار نقش خطاهای انسانی به عنوان مهمترین عامل تاثیرگذار، اهمیت توسعه سیستم‌های کمک راننده و ایمنی در خودروها بیشتر مشخص می‌شود. طبق آخرین گزارشات سازمان جهانی سلامت عامل حدود ۸۰ درصد از تصادفات خطاهای انسانی می‌باشد[1]. با توسعه و به‌کارگیری سیستم‌های کمک راننده در اکثر خودروهای امروزی، پژوهش در خصوص خودروهای بدون راننده به عنوان راه‌حلی تاثیرگذار، سرعت بیشتری گرفته است. در کنار توسعه سیستم‌های کمک راننده به منظور کاهش نقش خطای انسانی[2]، خودروهای خودران نیز برای پیاده‌سازی در جاده‌های عمومی باید بتوانند در مانورهای رانندگی مانند سبقت‌گرفتن، نگه‌داشتن خط، تعویض خط موفق باشند. با توجه به تأثیر خودروهای اطراف، تعویض خط در جریان ترافیک ناپایدار به عنوان یکی از مهمترین و پیچیده‌ترین مانورهای رانندگی[3]، به عنوان موضوع اصلی این مقاله انتخاب شده است. بر خلاف پژوهش‌هایی که در حوزه تعویض خط اختیاری صورت گرفته است[4,5]، تمرکز اصلی این مقاله در خصوص تعویض خط‌های اجباری است به این معنی که خودروی تحت کنترل شرایط تعویض خط را بوجود می‌آورد. در ادامه برخی از مهمترین محدودیت‌های پژوهش‌های پیشین در این حوزه بررسی خواهد شد.

دیکسیت و همکاران بررسی جامعی بر روی پژوهش‌های پیشین به منظور مقایسه‌ی انواع روشهای مختلف طراحی مسیر حرکت و کنترل مسیر طراحی شده برای مانورهای سبقت‌گیری ارائه داده‌اند و به بررسی دقیق نقاط ضعف و قوت هریک از آنها پرداخته‌اند[6]. براساس نتایج ارائه شده در این مقاله، پژوهش‌های پیشین بر اساس چهار تکنیک مشهور طراحی مسیر حرکت یعنی میدان پتانسیل (potential fields)، تجزیه سلولی (cell decomposition)، روشهای بین رشته‌ای (interdisciplinary methods) و کنترل بهینه و همچنین شش روش رایج ردیابی مسیر یعنی کنترل‌کننده‌های هندسی و سینماتیک، روشهای کلاسیک، بازخورد حالت دینامیکی، شبکه عصبی، منطق فازی و کنترل پیش بینی مدل مبنا انجام شده است. اگرچه این محققین عملکرد روش‌های پیشین را بر اساس فاکتورهای مختلفی مانند الزامات محاسباتی، ایمنی، امکان‌سنجی در مانورهای سبقت‌گیری با سرعت بالا و اجرای زمان واقعی برای شناسایی مزایا و معایب هریک از آنها مورد بررسی قرار داده‌اند، از تغییرات ناگهانی در طول مانور به دلیل شرایط ترافیکی دینامیکی گذرا چشم‌پوشی کرده‌اند.

برخی از پژوهشگران سرعت خودرو را در حین مانور ثابت در نظر گرفته‌اند[7] و یا با درنظرگرفتن یک مدل دینامیکی خطی[8,9] یا مدل سینماتیکی[10,11] برای کنترل خودرو، سعی در ساده‌سازی مانور داشته‌اند. در نظر نگرفتن خودروهای اطراف در حین مانور تعویض خط[12,13]، بی توجهی به تغییرات سرعت خودروهای اطراف در حین مانور[14-16] و عدم توانایی تغییر و اصلاح مسیر حرکت در حین مانور تعویض خط[17-19] از مهمترین محدودیتهای پژوهش‌های پیشین به شمار می‌رود. اگرچه برخی از دیگر مقالات تعویض خط نیز به بررسی روش‌های جدید برای کنترل خودکار خودرو در سرعت‌های بحرانی در مانورهای تعویض خط[20] و یا ارائه

مسیرهای حرکت بهینه با شاخص‌های مختلفی از جمله بهینه‌سازی مصرف سوخت[21]، تغییرات شتاب جانبی[22]، انرژی جنبشی[23]، بهبود راحتی سرنشینان و کاهش زمان رسیدن به نقطه هدف[24] و غیره پرداخته‌اند، با این وجود این موارد موضوع اصلی بحث مقاله پیش رو نمی‌باشند. محدودیت های ذکر شده درکنار چشم‌پوشی از کنترل همزمان طولی و عرضی خودرو[25,26] و همچنین لحاظ نکردن شرایط ترافیکی پیچیده برای اجتناب از برخورد در حین مانور[27,28] مهمترین دلایلی هستند که اهمیت این پژوهش را برای خودروهای بدون راننده در مانورهای تعویض خط نشان می‌دهند. الگوریتم ارائه شده در این مقاله با ارائه ساختار جدیدی برای تعویض خط خودروهای بدون راننده در حضور خودروهای اطراف و توسعه قابلیت طراحی مسیرهای جایگزین درحین مانور تعویض خط به صورت برخط، تاثیر تصمیمات ناگهانی خودروهای اطراف ناشی از جریان ترافیکی گذرای پویا بر ایمنی خودروی تحت کنترل در حین مانور تعویض خط را تا حد ممکن کاهش می‌دهد.

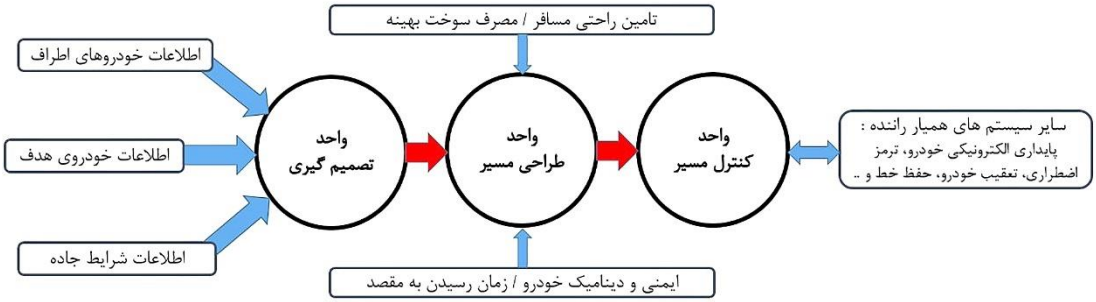
ادامه‌ی مقاله به شرح زیر تدوین شده است: ابتدا در بخش دوم، ساختار پیشنهادی جدید تعویض خط توصیف شده و با سایر روشهای مختلف تعویض خط مقایسه شده است. در ادامه این بخش علاوه بر ارائه جزئیات الگوریتم‌های تصمیم‌گیری و طراحی مسیر، الگوریتم کنترل‌کننده‌ی مودلغزانِ مقاوم به تغییر پارامترها نیز به منظور استفاده در واحد کنترل مسیر شرح داده شده است. در بخش سوم، یک مانور پیچیده واقعی در شرایط دینامیکی ناپایدار گذرا بررسی شده است. در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در بخش چهارم بررسی شده و در بخش پنجم بحث و نتیجه‌گیری‌ها ارائه شده‌اند.

۲- معرفی الگوریتم تعویض خط تطبیقی

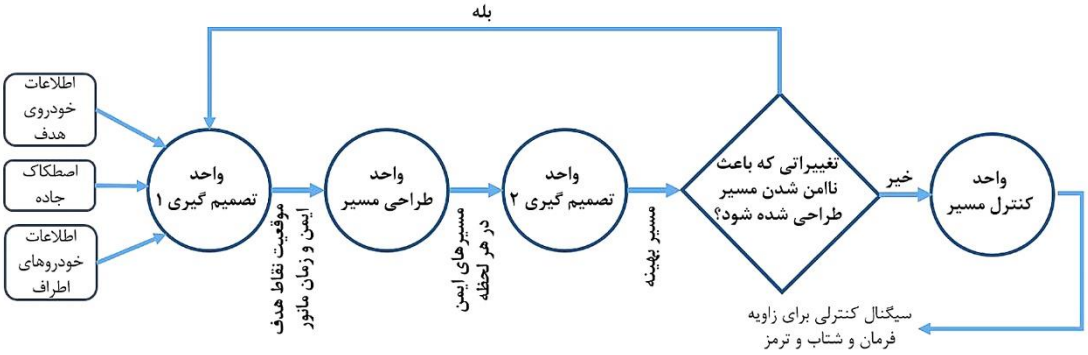
۲-۱- استراتژی تعویض خط

یک سیستم تعویض خط خودکار، شامل سه واحد اصلی است. واحد تصمیم‌گیری با دریافت اطلاعات محیطی (مانند خودروهای اطراف و وضعیت جاده) از سنسورها و سایر تجهیزات جانبی مسئول شناسایی نقاط ایمن به منظور انجام مانور مطلوب می‌باشد. واحد طراحی مسیر به کمک این اطلاعات باتوجه به محدودیت‌های دینامیکی خودرو و همچنین مسائلی نظیر ایمنی، راحتی و اجتناب از برخورد، مسیر مطلوب را برای رسیدن به مقصد تعیین‌شده توسط واحد اول طراحی می‌نماید. پس از طراحی مسیر تعویض خط مطلوب، این اطلاعات برای واحد کنترل مسیر ارسال می‌شود تا موقعیت طولی و عرضی خودرو را برای دستیابی به مسیر مطلوب طراحی شده ردیابی کند. ساختار شماتیک شکل ۱ نحوه عملکرد سیستم‌های تعویض خط متداول و چگونگی ارتباط آن با سایر سیستم‌های کمک‌راننده را نشان می‌دهد.

همانطور که در قسمت مقدمه اشاره شد، مهمترین نقطه ضعف روش‌های پیشین در محیط ترافیکی گذرا می‌باشد. روش‌هایی که تا به امروز برای مانور تعویض خط ارائه شده‌اند، حتی زمانیکه تغییر در وضعیت ترافیک و خودروهای اطراف را در نظرگرفته‌اند، به بررسی این تغییرات در لحظه شروع مانور می‌پردازند و از لحاظ‌کردن تغییرات در حین مانور تعویض خط خودداری می‌کنند. بنابراین، به محض شروع مانور تعویض خط، هرگونه تغییر در رفتار ترافیکی نادیده گرفته می‌شود و موقعیت‌های بعدی خودروی تحت کنترل تا انتهای مانور مطابق با مسیر از پیش تعیین‌شده و بدون تغییر می‌ماند. اگرچه احتمال وقوع تغییرات در حین مانور زیاد نیست، اهمیت بحث ایمنی برای پیاده‌سازی خودروهای بدون راننده به‌قدری حیاتی است که نمی‌توان به راحتی از شرایط دینامیکی گذرا چشم‌پوشی کرد. مهمترین دلیلی که در پژوهش‌های پیشین مانع از درنظرگرفتن تغییرات در حین مانور می‌شده است، ساختار سیستم‌های تعویض خط بوده که الگوریتم ارائه شده در این پژوهش با فراهم‌کردن ساختاری انعطاف‌پذیر این امکان را میسر کرده است. الگوریتم جامع ارائه شده همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، شامل تمامی واحدهای تصمیم‌گیری، طراحی و کنترل مسیر برای یک مانور تعویض خط کاملاً خودکار با درنظرگرفتن دینامیک طولی و عرضی خودرو می‌باشد. علاوه بر این، ساختار ارائه‌شده شرایط ترافیکی دینامیکی گذرا را درنظر گرفته و امکان طراحی مسیرهای جایگزین ایمن در هر لحظه از مانور را نیز فراهم می‌کند.



شکل ۱) نحوه عملکرد سیستم‌های تعویض خط متداول و چگونگی ارتباط آن با سایر سیستم‌های کمک‌راننده



شکل ۲) ساختار شماتیک الگوریتم تعویض خط ارائه شده

در این الگوریتم، ابتدا واحد تصمیم‌گیری شماره یک، بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از سنسورها و تجهیزات (اطلاعات خودروی تحت کنترل، خودروهای اطراف، جریان ترافیک و وضعیت جاده) زمان مناسب برای مانور و نقاط هدف ایمن را برای واحد طراحی مسیر تعیین می‌کند. در واحد طراحی مسیر، تمامی مسیرهای حرکت ایمن با سرعت‌های اولیه، شتاب‌ها و زمان‌های متفاوت برای مانور تعویض خط بصورت آفلاین طراحی شده و در قالب جدولی از ضرایب آماده انتخاب توسط واحد تصمیم‌گیری شماره دو می‌باشند. در هر مسیر انتخابی مجموعه‌ای از نقاط میانی وجود دارد که در صورت تغییر شرایط ترافیکی، امکان تغییر مسیر به کمک مسیرهای جایگزین طراحی‌شده را فراهم نمایند. علاوه‌براینکه مسیرهای جایگزین طراحی شده جدید می‌توانند کوتاه‌تر و یا طولانی‌تر از مسیر اولیه باشند، ممکن است شتاب متفاوتی نسبت به مسیر اولیه داشته باشند. پس از انتخاب یک یا چند مسیر بر اساس زمان مانور تعیین شده، واحد طراحی مسیر این مسیرها را به واحد تصمیم‌گیری شماره دو ارسال می‌کند؛ جاییکه یکی از مسیرهای نامبرده بر اساس حداقل شتاب عرضی (به عنوان معیاری برای تامین راحتی مسافر) انتخاب می‌شود. سرانجام کنترل‌کننده‌ی مود لغزانِ توسعه داده شده در این مقاله به عنوان واحد کنترل مسیر، وظیفه هدایت خودرو را در امتداد مسیر انتخابی در جهت طولی و عرضی بر عهده دارد.

۲-۲- واحد تصمیم گیری شماره یک

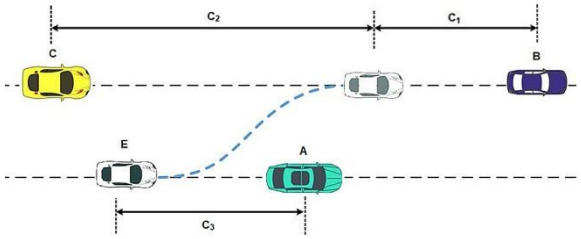
اصول اولیه به‌کاررفته در طراحی واحد تصمیم‌گیری شماره یک بر پایه پژوهش پیشین همین نویسندگان می‌باشد[29] که با تغییراتی منجر به بهبود عملکرد سیستم شده است. علی‌رغم اینکه واحد تصمیم‌گیری پیشین به دلیل ثابت درنظر گرفتن سرعت خودروی هدف در حین مانور، فقط می‌توانست زمان مناسب برای مانور را به عنوان خروجی محاسبه کند، واحد تصمیم‌گیری توسعه یافته‌ی جدید به همراه واحد طراحی مسیر قادر به محاسبه مختصات نقطه پایانی مسیر تعویض‌خط و زمان مانور هستند. بنابراین، حتی برای یک زمان مانور منحصر به فرد، مختصات نقطه پایانی می‌تواند متفاوت باشد که این امر، باعث درگیرشدن دینامیک طولی خودروی تحت کنترل همزمان با دینامیک عرضی آن در مانور تعویض‌خط شده و به‌طبع انعطاف‌پذیری و کارایی بیشتری به همراه می‌آورد. در این مقاله با تعیین زمان مناسب برای مانور با توجه به نقاط هدف مختلف ایمن (همانطور که در قسمت طراحی مسیر به تفصیل مورد بحث قرار خواهدگرفت)، مسیرهای حرکت مختلف با شتاب‌های مختلف بصورت آفلاین طراحی و به واحد تصمیم‌گیری شماره دو تحویل داده شده است. واحد تصمیم‌گیری شماره دو، مناسب‌ترین مسیر را در هر لحظه از مانور انتخاب نموده و آن را به واحد کنترل مسیر ارسال می‌نماید تا بهترین مانور را در هر زمان و بدون اتلاف وقت، به صورت آنلاین در دسترس قرار دهد. اگر مسیر تعویض خط طراحی شده در حین مانور به دلیل تغییر در شرایط ترافیکی ناامن شود، الگوریتم ارائه شده مسیرهای ایمن جدید با شتاب‌های طولی مختلف را برای رسیدن به نقاط هدف جدید طراحی کرده و به کمک کنترل همزمان طولی و عرضی خودرو، دستورات مناسب برای کنترل خودرو در مسیر جدید را به پدال گاز، پدال ترمز و فرمان ارسال می‌کند.

برای یافتن نقطه هدف ایمن و زمان رسیدن متناسب با آن در خط هدف، شرایط پیچیده ترافیکی بیشتری در توسعه الگوریتم جدید در نظر گرفته شده است. هر دو فاصله طولی و عرضی با خودروهای اطراف به منظور اجتناب از برخورد مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای ایمنی C_i، بر اساس رفتار راننده انسانی و از طریق شبیه ساز رانندگی و تست‌های واقعی تنظیم شده‌اند.

۲-۲-۱- فاصله طولی

در اینجا سه فاکتور در نظر گرفته شده به منظور بدست آوردن مسافت طولی ایمن بین خودروی تحت کنترل و خودروهای اطراف آن مطابق شکل ۳ بررسی شده‌اند.

در شکل ۳، E نمایانگر خودروی هدف و A نشاندهنده خودروی جلویی در همان خط است و B و C نمایانگر خودروهای جلو و پشت در خط هدف هستند. از تأثیر سایر خودروهای اطراف صرف نظر شده است. به منظور اجتناب از برخورد در پایان مانور تعویض‌خط وقتی خودروی تحت کنترل به خط هدف می‌رسد، فاصله آن با خودروهای B و C نباید به ترتیب از C_1 و C_2 کوچکتر



شکل ۳) معیارهای بررسی اجتناب از برخورد در جهت طولی (C_1، C_2 ، C_3)

باشد. در نقطه شروع مانور نیز حداقل فاصله یعنی C_3 باید بین خودروهای E و A در نظر گرفته شود. این مقدار در هر مانور با توجه به سرعت خودرو به عنوان ضریب ایمنی تعیین می‌شود. این مقادیر به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$C_1 = S_0 + v_{Ex}t_d + \frac{(v_{Bx} - v_{Ex})^2}{2a_{Ex}} \quad (۱)$$

$$C_2 = S_0 + v_{Ex}t_d + \frac{v_{Ex}^2}{2a_{Eb}} \quad (۲)$$

$$C_3 = S_0 + v_{Ex}t_d \quad (۳)$$

در معادلات فوق، S_0، v_{Ex} ، v_{Bx} و a_{Ex} به ترتیب فواصل توقف ایمن، سرعت طولی خودروی هدف و خودروی B در پایان مانور و حداکثر شتاب منفی خودروی هدف هستند. علاوه بر این، t_d زمان واکنش راننده است که به پارامترهای مختلفی از جمله وضعیت جسمی و روحی، سن و جنسیت راننده بستگی دارد و در صورت استفاده از سیستم ترمز اتوماتیک این مقدار قطعا کاهش می‌یابد. علاوه بر این، حداکثر شتاب منفی بر اساس شرایط مختلفی از جمله مقدار واقعی اصطکاک بین جاده و تایر تعیین می‌شود. در زمان مشخص شده به عنوان لحظه پایان مانور، موقعیت طولی و عرضی دو خودرو توسط معادلات (٤) و (٥) محاسبه می‌شوند:

$$x_B - x_E = S_0 + v_{Ex}t_d + \frac{v_{Ex}^2}{2a_{Eb}} + l_{Ef} + l_{Br} \quad (۴)$$

$$y_B = y_E \quad (۵)$$

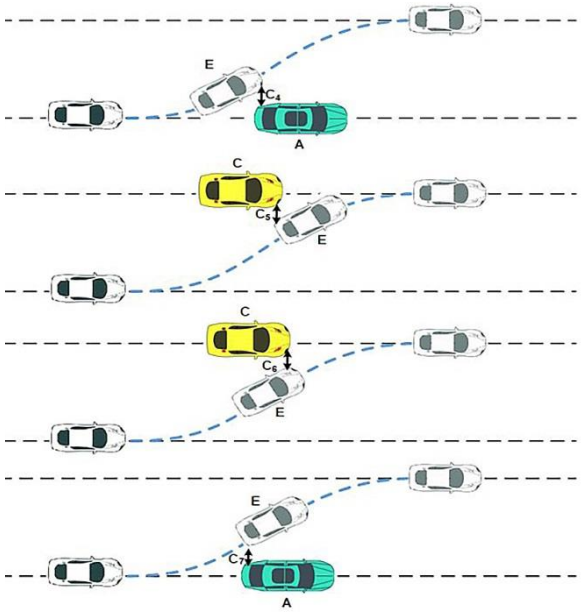
که x_B و y_B به ترتیب نشان‌دهنده‌ی موقعیت طولی و عرضی مرکز ثقل خودروی B و همچنین l_{Br} نشان‌دهنده‌ی فاصله طولی از مرکز ثقل خودروی B تا عقب خودرو می‌باشند. به همین شکل، x_E و y_E موقعیت طولی و عرضی مرکز ثقل خودروی هدف را نشان می‌دهند و l_{Ef} نشان‌دهنده فاصله طولی از مرکز ثقل خودرو هدف تا جلوی خودرو می‌باشد.

۲-۲-۲- فاصله عرضی

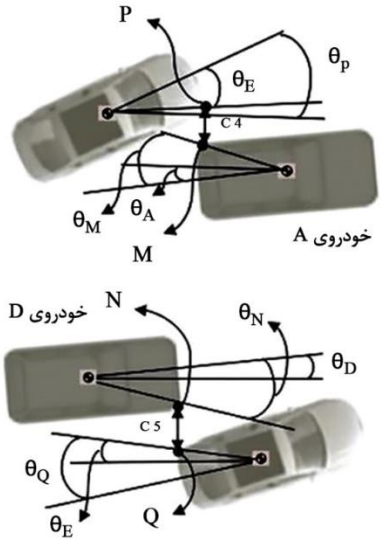
در شکل ۴ (الف) فواصل عرضی که برای اجتناب از برخورد در مانور تعویض خط مهم می‌باشند، ارائه شده‌اند. در این شکل، C4 و C7 به ترتیب فاصله بین گوشه جلو و عقب سمت راست خودروی E با گوشه عقب سمت چپ خودرو A را نشان می‌دهند. همچنین C5 و C6 فاصله بین گوشه عقب و جلوی سمت چپ خودروی هدف با گوشه جلویی سمت راست خودروی C. را نشان می‌دهند. با نگاهی دقیق‌تر به شکل، می‌توان فهمید که C4 محدودیت شدیدتری نسبت به C7 به‌حساب می‌آید و عملا اگر محدودیت موردنظر برای C4 برآورده شود، قید C7 نیز صحیح خواهد بود و همین وضعیت برای رابطه بین C5 و C6 نیز صدق می‌کند. بنابراین C4 و C5 به عنوان محدودیت‌های اصلی برای فواصل عرضی به‌حساب می‌آیند و تصویر دقیقتری از این مقادیر در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است.

روابط مورد نیاز برای محاسبه مقدار C_4 در طول مانور به شرح زیر می‌باشد:

$$y_A(t) - y_E(t) = C_4 + \overline{O_A\mathrm{M}}\sin(\theta_M - \theta_A(t)) + \overline{O_E\mathrm{P}}\sin(\theta_P - \theta_E(t)) \quad (۶)$$



(الف)



(ب)

شکل ۴) الف) معیارهای بررسی اجتناب از برخورد در جهت عرضی(C_4-C_7) ب) نمایش محدودیت‌های عرضی بین خودروی هدف و خودروی A (بالا) و C (پایین)

$$\overline{O_E\mathrm{P}} = \sqrt{(\frac{1}{2}W_E)^2 + (L_{Ef})^2} \quad (۷)$$

$$\theta_P = \tan^{-1}(\frac{W_E}{2L_{Ef}}) \quad (۸)$$

$$\overline{O_A\mathrm{M}} = \sqrt{(\frac{1}{2}W_A)^2 + (L_{Ar})^2} \quad (۹)$$

$$\theta_M = \tan^{-1}(\frac{W_A}{2L_{Ar}}) \quad (۱۰)$$

$$\tan(\theta_E(t)) = \frac{\partial y_E(t)}{\partial x_E(t)} = \frac{v_{yE(t)}}{v_{xE}} \quad (۱۱)$$

$$\tan(\theta_A(t)) = \frac{\partial y_A(t)}{\partial x_A(t)} = \frac{v_{yA(t)}}{v_{xA}} \quad (۱۲)$$

$$\sin(\theta_E(t)) = \frac{v_{yE(t)}}{\sqrt{(v_{xE})^2 + \left(v_{yE(t)}\right)^2}} \quad (۱۳)$$

$$\cos(\theta_E(t)) = \frac{v_{xE}}{\sqrt{(v_{xE})^2 + \left(v_{yE(t)}\right)^2}} \quad (۱۴)$$

معادله شماره (٦) فاصله عرضی بین خودروی هدف و خودروی A را در لحظه‌ای که مختصات طولی آنها یکسان می‌شود، بیان می‌کند. در این معادله، $y_A(t)$ و $y_E(t)$ به ترتیب موقعیت عرضی مرکز ثقل خودروهای A و E را نشان می‌دهند. $\overline{O_E\mathrm{P}}$ و $\overline{O_A\mathrm{M}}$ خطوط فرضی هستند که مرکز ثقل خودروها را به نقاط P و M وصل می‌کنند، در حالیکه θ_P زاویه بین O_EP و محور طولی خودروی هدف است و همچنین θ_M زاویه بین O_EM و محور طولی خودروی A می‌باشد. در معادلات فوق که برای محاسبه حداقل مقدار C_4 به‌منظور حفظ ایمنی استفاده شده است، L_{Ef} و L_{Ar} فاصله طولی بین مرکز ثقل خودروی E تا جلوی آن و فاصله طولی مرکز ثقل خودروی A تا عقب آن را نشان می‌دهد و W_A و W_E عرض خودروهای A و E می‌باشند. شرط همزمانی طولی نقاط P و M نیز توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$X_A - \overline{\mathrm{OM}}\cos\left(\theta_M - \theta_A(t)\right) = X_E + \overline{\mathrm{OP}}\cos(\theta_P - \theta_E(t)) \quad (۱۵)$$

از آنجا که رفتار خودروی C توسط سیستم اتوماتیک کنترل می‌شود، امکان تغییر سرعت ناگهانی تقریبا ناچیز است و از این رو یک قانون دو ثانیه‌ای[24] به جای روش محافظه کارانه در معادله (۲) استفاده شده است. بنابراین C_5 به شکل زیر محاسبه شده است:

$$y_E(t) - y_C(t) = C_5 + \overline{O_C\mathrm{N}}\sin\left(\theta_N - \theta_C(t)\right) + \overline{O_E\mathrm{Q}}\sin(\theta_Q - \theta_E(t)) \quad (۱۶)$$

$$X_E - X_C = y_E(t) - y_C(t) \quad (۱۷)$$

$$\overline{O_E\mathrm{Q}} = \sqrt{(\frac{1}{2}W_E)^2 + (L_{Er})^2} \quad (۱۸)$$

$$\theta_Q = \tan^{-1}(\frac{W_E}{2L_{Er}}) \quad (۱۹)$$

$$\overline{O_C\mathrm{N}} = \sqrt{(\frac{1}{2}W_C)^2 + (L_{Cf})^2} \quad (۲۰)$$

$$\theta_N = \tan^{-1}(\frac{W_C}{2L_{Cf}}) \quad (۲۱)$$

در معادلات فوق ، X_C و $y_C(t)$ بیانگر مختصات طولی و عرضی خودروی C هستند و v_{Cx} نشان‌دهنده سرعت طولی خودروی C در پایان مانور است. علاوه بر این، $\overline{O_E\mathrm{Q}}$ و $\overline{O_C\mathrm{N}}$ به ترتیب فاصله بین مرکز ثقل خودروی E تا Q و مرکز ثقل خودروی C تا نقطه N را نشان می‌دهند. θ_Q نشاندهنده زاویه بین O_EQ و محور طولی خودروی E است در حالیکه θ_C زاویه بین O_CN و محور طولی خودروی C را نشان می‌دهد. علاوه بر این، L_{Er} و L_{Cf} فاصله طولی بین مرکز ثقل خودروی E تا عقب آن و فاصله طولی مرکز ثقل خودروی C تا جلوی آن را نشان می‌دهند و W_C عرض خودرو C است.

با استفاده از معادلات فوق، الگوریتم تصمیم‌گیری ارائه شده، زمان مانور احتمالی را محاسبه می‌کند و این اطلاعات در ابتدای مانور برای طراحی مسیرهای ایمن متناسب با زمان‌های ایمن در اختیار واحد طراحی مسیر قرار می‌گیرد تا جدولی از تمامی مسیرهای ایمن ممکن تهیه شود و در ادامه‌ی مانور این اطلاعات به‌روز شده به همراه مسیرهایی که به صورت آفلاین از پیش طراحی شده‌اند به واحد تصمیم‌گیری شماره دو ارسال می‌شوند.

پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه زمان مانور بر اساس معادلات فوق، در جدول شماره (۱) آورده شده است.

۳-۲-۲- تست جاده

به منظور تعیین پارامترهای الگوریتم پیشنهادی بر اساس رفتار راننده‌ی انسانی، آزمایش‌های متنوع جاده‌ای با همکاری دانشگاه فنی گراتز در اتریش (TUG) انجام شده است. این آزمایش‌ها با گروه‌های مختلفی متشکل از رانندگان زن و مرد در سنین ۲۵ تا ۴۵ سال که دارای گواهینامه رانندگی بین‌المللی و حداقل دو سال سابقه رانندگی هستند، انجام شده است. تست‌ها در جاده‌های استاندارد و با سرعت‌های مختلف در کشور اتریش انجام شده و هر راننده برای دستیابی به بهترین نتیجه، هر مانور را سه بار اجرا نموده است. برای انجام آزمایش‌ها از خودروهای BMW 640i، Hyundai و Volkswagen Passat استفاده شده است. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، همه‌ی خودروها مجهز به تجهیزات جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌ها، جی پی اس (GPS)، رادار و سیستم ارتباطات بین دو خودرو (vehicle to vehicle communications system) بودند. موقعیت هر خودرو در ابتدا و انتهای مانور ردیابی شده و تمامی داده‌ها با استفاده از سیستم ضبط‌داده‌ی Dewetron با نرخ نمونه‌برداری بالا و در

جدول ۱) پارامترهای مورد نیاز

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
W_A	1.65 (m)	W_E	1.65 (m)
a_{bC}	9.81 μ (m/s²)	t_d	0.5 (s)
S_0	2 (m)	a_{bE}	9.81 μ (m/s²)
W_C	1.65 (m)		

شکل ۵) خودروهای تست، سنسورها و تجهیزات جمع‌آوری داده[30]

جدول ۲) مشخصات سنسورهای مورد استفاده در آزمایش‌ها[30]

Sensor model	Vehicle		Sensor type	Manufacturer	Sampling rate	Accuracy
	640 i	Passat				
ADMA-G	X	X	Inertial Measurement Unit (IMU)	GeneSys Elektronik	2000Hz	1mg
DAWE-CAM	X	X	Camera	DEWETRON	30 fps	-
WEB-CAM	X		Camera	Microsoft Commercial	30fps	-
Microphone	X		Microphone	PCB Piezotronics	2000Hz	-
DAQ_1	X		DEWE2-M4	DEWETRON	2000Hz	1mg
DAQ_2		X	DEWE 510	DEWETRON	2000Hz	1mg

شرایط زمان واقعی ضبط و همگام‌سازي شدند. مشخصات سنسورهای مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول شماره (۲) ارائه شده است.

پس از پردازش داده‌ها با نرم افزار DEWESOFT و استفاده از خروجی‌های آن بر روی نرم افزار MATLAB، نتایج حاصل از آزمون‌های واقعی برای پارامترهای معادلات قسمت تصمیم‌گیری استخراج شدند، که جزئیات این روش در[30] مورد بحث قرار گرفته است. تست‌های فوق در شرایط مختلف جاده‌ای و با موقعیت‌های متفاوت خودروهای اطراف انجام شده تا فواصل طولی و عرضیِ درنظر گرفته شده به منظور اجتناب از برخورد برای هریک از رانندگان داوطلب استخراج شده و به کمک روابط توضیح داده شده در ۲.۲.۱ و ۲.۲.۲ زمان‌های ایمن برای انجام مانور تعویض خط محاسبه شوند. با ردیابیِ موقعیت هر وسیله نقلیه در نقطه شروع و پایان مانور و پس از پردازش نتایج حاصل از تست‌های عملی با راننده‌های مختلف و فواصل انتخاب شده توسط آنها، مقادیر Ci بر اساس رفتار راننده انسانی تنظیم شده و برای محاسبه زمان مناسب در روابط فوق جایگذاری می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهند: شرکت کنندگان در آزمایش معمولاً در لحظه‌ی شروع مانور، فاصله‌ای بین ۳۵ تا ۵۵ متر از خودروی جلویی را حفظ می‌کنند (C3). از طرفی، در لحظه‌ی رسیدن خودروی Ego به خودروی هدف، بین خودروی Ego و خودروی A فاصله جانبی ۳/٦ تا ٤/۲ متر وجود دارد. از اینرو مقدار C4 برابر با ۳/۷۵ معادل عرض هر لاین در نظر گرفته می‌شود. رانندگان همچنین فاصله طولی بیشتری را با خودروی B نسبت به فاصله با خودروی A در نظر می‌گیرند. این فاصله معمولاً در محدوده ٤۰ تا ۵۵ متر است. بنابراین، مقدارC1 برابر با ٤۷ متر (یعنی مقدار متوسط این محدوده) انتخاب شد. نتایج حاصل از مانور سوم که انجامِ مانور cut-in در شرایط خاص بود، نشان می‌دهد که رانندگان به ترتیب مقادیر ۳/۷۵ و ۳۵ متر را برای C2 و C5 انتخاب کردند. پس از انجام محاسبات فوق و تست‌های عملی تشریح شده، نهایتا از نتایج حاصل از این تست‌ها به منظور تعیینِ زمان مناسب با هر مانور (با توجه به سناریوی طراحی شده برای این مانور) در واحد اول تصمیم‌گیری استفاده شده است.

۳-۲- واحد طراحی مسیر

واحد طراحی مسیر به عنوان مسئول طراحي مسيرهاي حركت مختلف با در نظرگرفتن وضعيت خودروهاي اطراف بر اساس شرايط ديناميكي خودرو، نوآوري اصلي اين مقاله است. نوآوری واحد طراحی مسیر ارائه شده، توانایی آن برای طراحی مجدد در حین مانور تعویض خط حتی در شرایط ترافیکی دینامیکی و ناپایدار (گذرا) است. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از روش بهینه‌سازی تفاضل تکاملی DE (differential evolution optimization method) برای در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی خودروی ego و همچنین استفاده از چندجمله‌ای مرتبه ۵ (5th order polynomial function)، کلیه مسیرهای حرکت ایمن ممکن را بر اساس اطلاعات دریافتی از واحد تصمیم‌گیری شماره یک آماده کرده و در اختیار واحد تصمیم‌گیری شماره دو قرار می‌دهد. عملکرد مطلوب الگوریتم DE به عنوان یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های تکاملی حتی در مسائل متغیر با زمان در حضور محدودیت‌های دینامیکی و بدون گیر افتادن در حداقل‌های محلی ثابت شده است[31].

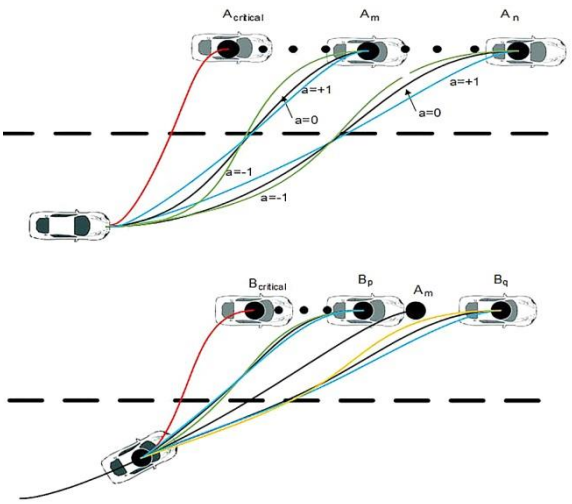
از آنجاییکه حتی بهترین روش‌های بهینه‌سازی به دلیل ماهیت بررسی و بهینه‌سازی، زمانی را به خود اختصاص می‌دهند و این امر محدودیت قابل توجهی برای اهداف زمان واقعی(real-time) به‌حساب می‌آید، استراتژی طراحی تعویض خط ارائه شده به گونه‌ای تعریف شده است که واحد طراحی مسیر به صورت آفلاین کار کند و همه مسیرهای ایمن اولیه و جایگزین را برای موقعیت‌های مختلف آماده کرده و همچنین تمام مسیرهای طراحی شده را در یک جدول جستجو (lookup table) با شناسه اختصاصی که به هر یک از مسیرها اختصاص یافته است، قرار دهد. پس از تعیین زمان مانور در واحد تصمیم‌گیری شماره یک و اختصاص این پارامتر به هر مسیر، مسیر مربوطه مورد نظر می‌تواند توسط هر شناسه در جدول جستجو مشخص شود و آماده انتخاب توسط واحد تصمیم‌گیری شماره دو باشد. الگوریتم ارائه شده با توجه به عدم اتلاف زمان برای انتخاب مسیر بهینه در مانور تعویض خط می‌تواند برای مسائل زمان واقعی استفاده شود. جزئیات

ساختار مفهومی واحد طراحی مسیر به شرح زیر توضیح داده شده است:

همانطور که در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است، خط قرمز رنگ که با نقطه پایان $A_{critical}$ مشخص شده است، در واقع سریعترین مانور تعویض خط ممکن با توجه به محدودیت‌های دینامیکی خودرو و شرایط جاده می‌باشد که به عنوان بحرانی‌ترین مسیر برای هر مانور تعویض خط (the most aggressive lane change trajectory) شناخته می‌شود و قطعا انتخاب هریک از مسیرهای سمت چپ این مسیر منجر به ناپایداری خودروی هدف می‌شود. بنابراین هر نقطه‌ای از سمت چپ $A_{critical}$ قابل انتخاب نیست و همچنین تمام نقاط دیگر در سمت راست $A_{critical}$ قابل استفاده هستند و از لحاظ تئوری می‌توانند به عنوان نقطه انتهایی مسیر تعویض خط انتخاب شوند. همانطور که در شکل ۶ (الف) مشخص شده، چندین مسیر تعویض خط مختلف با زمان مانور متفاوت بر اساس نقاط انتهایی مختلف با شتاب‌های طولی متفاوت وجود دارد. علاوه بر این، برای طراحی مسیرهای تعویض خط بین هر نقطه شروع و پایانی با استفاده از روش بهینه‌سازی DE و چندجمله‌ای مرتبه پنج، سه شتاب طولی مختلف (مثبت،صفر و منفی) در نظر گرفته شده است. به‌منظور یافتن مسیر(های) تعویض خط بین هر دو نقطه تنها لازم است که زمان مانور مشخص باشد.

ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی در محیط ترافیکی ناپایدار که در اثر تغییر موقعیت خودروهای اطراف در حین مانور تعویض خط، مسیر طراحی شده‌ی اولیه دیگر ایمن نخواهد بود، بیشتر مشخص خواهد شد. به‌منظور عملکرد صحیح در برابر تغییرات، چندین نقطه میانی برای هر مسیر اولیه درنظر گرفته می‌شود و برای پیدا کردن بحرانی‌ترین مسیرحرکت و سایر مسیرهای ایمن قابل دسترسی (feasible) در سمت راست آن، همان روند برای هر یک از این نقاط میانی تکرار شده است. همانطور که در سناریوی نمونه‌ی نشان داده شده در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود، با توجه به داده‌های تامین شده توسط واحد تصمیم‌گیری شماره یک، مسیری که با سرعت ثابت به A_m منتهی می‌شود ایمن به نظر رسیده و واحد کنترل باید مسیر مورد نظر را دنبال کند. یک تغییر ناگهانی در اثر شرایط ترافیکی گذرا همانطور که در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است باعث می‌شود تا مسیر فعلی در طول مانور تعویض خط دیگر ایمن نباشد. در این لحظه با توجه به ایده الگوریتم ارائه شده، واحد تصمیم گیری شماره دو قادر است یکی از مسیرهای ایمن جایگزین با نقاط پایانی $B_{critical}$ تا B_q را از میان مسیرهایی که پیشتر به صورت آفلاین توسط واحد طراحی مسیر طراحی شده، انتخاب کند و بدین طریق مسیر تعویض خط را با شرایط جدید تطبیق دهد.

علاوه بر تعداد نقاط پایانی و فاصله بین آنها، تعداد نقاط میانی در نظر گرفته‌شده در هر مسیر اولیه قابل تنظیم است و با افزایش



شکل ۶) الف) نقاط پایانی ممکن و مسیرهای مربوطه برای مانور تعویض خط ب) سناریوی نمونه برای طراحی مسیرهای جایگزین

علاوه بر تعداد نقاط پایانی و فاصله بین آنها، تعداد نقاط میانی در نظر گرفته شده در هر مسیر اولیه قابل تنظیم است و با افزایش تعداد نقاط میانی و پایانی، انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان الگوریتم ارائه شده افزایش می‌یابد. با توجه به این فرآیند، الگوریتم ارائه شده به وسیله گسسته‌سازی یک فضای پیوسته و همچنین تغییر در ساختار متداول روش‌های پیشین تعویض خط که فقط به صورت خطی از هر واحد به واحد دیگر دستوری ارسال می‌شده است و عملا ارتباط و هماهنگی پیوسته بین واحدهای تصمیم گیری و طراحی مسیر در حین مانور ممکن نبوده است، قابلیت استفاده در کاربردهای زمان واقعی را دارد.

۴-۲- واحد تصمیم‌گیری شماره دو

پس از محاسبه زمان مانور در واحد تصمیم‌گیری آنلاین شماره یک و طراحی کلیه مسیرهای ایمن ممکن با شتاب‌های مختلف در واحد طراحی مسیر آفلاین، این اطلاعات به واحد تصمیم‌گیری شماره دو ارسال می‌شود. واحد تصمیم‌گیری شماره دو وظیفه دارد در هر لحظه از مانور، بهترین مسیر را (از میان مسیرهای طراحی شده ایمن) براساس معیارهای مختلف بصورت آنلاین انتخاب کرده و آن را برای واحد کنترل مسیر ارسال کند. این واحد قادر است بر اساس پارامترهای مختلفی از جمله راحتی مسافر (Ride comfort)، مصرف سوخت و ایمنی یکی از این مسیرهای ازپیش طراحی شده را به عنوان مسیر تعویض خط مطلوب انتخاب نماید. در این مقاله، به منظور انتخاب بهترین مسیر از میان مسیرهای قابل قبول (نقطه هدف و زمان رسیدن توسط واحد طراحی مسیر و واحد تصمیم‌گیری شماره یک به عنوان عوامل انتخاب مسیرهای قابل قبول تعیین شده‌اند)، حداقل شتاب جانبی به عنوان عامل تصمیم‌گیری استفاده شده است.

۵-۲- واحد کنترل پیمایش مسیر

به منظور پیمودن مسیر طراحی شده، یک کنترل‌کننده‌ی یکپارچه طولی و عرضی طراحی شده است که بدین منظور یک مدل دوچرخه

پنج درجه آزادی مطابق شکل ۷ در نظر گرفته شده است. با درنظر گرفتن دستگاه مختصات تایدکس (TYDEX W-axis system) به عنوان دستگاه مختصات محلی مورد استفاده در بیان نیروهای وارد بر تایرها (شکل ۸)، معادلات فضای حالت این مدل در روابط (۲۲) تا (۲۶) بیان شده‌اند.

$$\dot{v}_X = \frac{F_{rX} + F_{fy}sin\delta_f + F_{fx}cos\delta_f}{m} + \Omega_z v_Y \quad (۲۲)$$

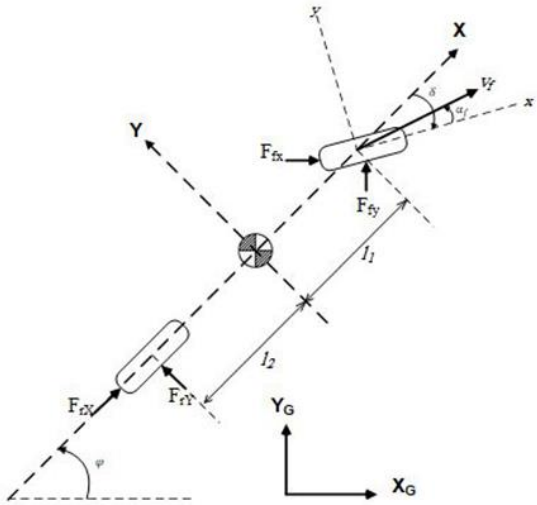
$$\dot{v}_Y = \frac{F_{rY} + F_{fy}cos\delta_f - F_{fx}sin\delta_f}{m} - \Omega_z v_X \quad (۲۳)$$

$$\dot{\Omega}_Z = \frac{(F_{fy}cos\delta_f - F_{fx}sin\delta_f)l_1 - F_{rY}l_2}{I_{ZZ}} \quad (۲۴)$$

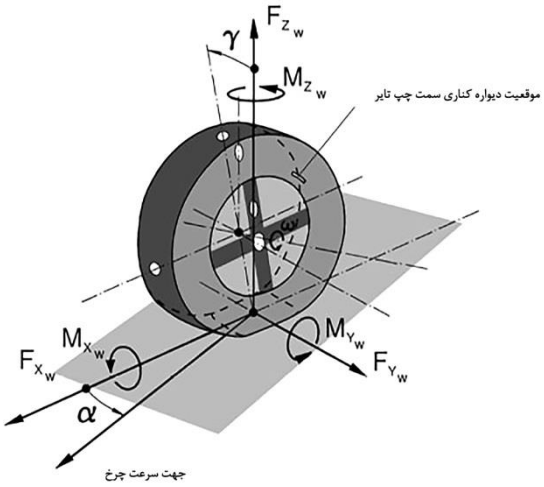
$$\dot{\Omega}_f = \frac{T_f - R_{ef}F_{fx} - M_{Rf}}{J_f + m_{Tf}R_{ef}^2} \quad (۲۵)$$

$$\dot{\Omega}_r = \frac{T_r - R_{er}F_{rX} - M_{Rr}}{J_r + m_{Tr}R_{er}^2} \quad (۲۶)$$

در معادلات فوق T، δ_f، v، Ω، F، m، I، R_e، M_R، J و m_T به ترتیب نشانگر گشتاور اعمال شده بر تایر، زاویه فرمان، سرعت، سرعت زاویه‌ای، نیرو، جرم بدنه، گشتاور اینرسی بدنه، شعاع مؤثر تایرها،



شکل ۷) مدل دوچرخه



شکل ۸) دستگاه مختصات محلی تایرها[32]

گشتاور مقاوم غلتشی (به دست‌آمده از معادلات ۳۰-۲۷)، گشتاور اینرسی تایرها و جرم تایرها هستند. علاوه بر این، زیرنویس‌های f و r نمایانگر جلو و عقب بوده و همچنین سایر پارامترها و دستگاه‌های مختصات در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.

$$M_{Rf} = R_{ef}C_{Rf}F_{fz} \quad (۲۷)$$

$$M_{Rr} = R_{er}C_{Rr}F_{rZ} \quad (۲۸)$$

$$F_{fz} = \frac{mgl_2}{l_1 + l_2} \quad (۲۹)$$

$$F_{rZ} = \frac{mgl_1}{l_1 + l_2} \quad (۳۰)$$

در این پژوهش، روش کنترلی مود لغزان به عنوان واحد کنترل پیمایش مسیر مطلوب و T و δ_f به عنوان ورودی‌های کنترلی در نظر گرفته شده‌اند. کنترل‌کننده‌ی طراحی شده باید مرکز ثقل خودرو را در هر لحظه از مانور منطبق بر مسیر طراحی‌شده قرار دهد. لذا مولفه‌های مختصات مرکز جرم خودرو توسط روابط (۳۱) و (۳۲) بیان شده‌اند. لازم به ذکر است که این دو معادله صرفا برای طراحی کنترل‌کننده استفاده می‌شوند و در محاسبه‌ی خطای موقعیت مرکز ثقل قابل استفاده نیستند. تعیین موقعیت مرکز ثقل در عمل نیاز به الگوریتم SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) دارد و در شبیه‌سازی‌ها ممکن است به روش‌های دیگر محاسبه شود که در این پژوهش به آن پرداخته نخواهد شد.

$$X_{G_{CG}} = \int (v_X \cos\psi - v_Y \sin\psi)dt \quad (۳۱)$$

$$Y_{G_{CG}} = \int (v_X sin\psi + v_Y cos\psi)dt \quad (۳۲)$$

خطا و سطح لغزش برای کنترل طولی توسط معادلات (۳۳) و (۳۴) تعریف شده‌اند و معادله (۳۵) از بسط‌دادن رابطه (۳۴) بدست می‌آید:

$$\tilde{X} = X_{G_{CG}} - X_{Gd_{CG}} \quad (۳۳)$$

$$h = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \int_0^t \tilde{X}\, dT \quad (۳۴)$$

$$h = \dot{\tilde{X}} + 2\lambda\tilde{X} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{X}\, dT \quad (۳۵)$$

با مشتق‌گیری از h نسبت به زمان خواهیم داشت:

$$\dot{h} = \ddot{\tilde{X}} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \Rightarrow \dot{h} = \ddot{X}_{G_{CG}} - \ddot{X}_{Gd_{CG}} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \quad (۳۶)$$

با جایگزین‌کردن رابطه (۳۱) در معادله (۳۶)، معادله‌ی (۳۷) به دست می‌آید:

$$\dot{h} = (\dot{v}_X - \Omega_Z v_Y)\cos\psi - (\dot{v}_Y + \Omega_Z v_X)\sin\psi - \ddot{X}_{Gd} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \quad (۳۷)$$

همچنین با جایگذاری روابط (۲۲) و (۲۳) در رابطه‌ی (۳۷) خواهیم داشت:

$$\dot{h} = \left(\frac{F_{rX} + F_{fy}sin\delta_f + F_{fx}cos\delta_f}{m}\right)\cos\psi - a_Y \sin\psi - \ddot{X}_{Gd_{CG}} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \quad (۳۸)$$

معادله (۳۸) شامل ورودی کنترلی T نیست. به منظور نمایان‌کردن T_f و T_r در $\dot{h}$، معادلات (۲۵) و (۲۶) برای F_{fx} و F_{rX} در روابط (۳۹) و (۴۰) حل شده‌اند. علاوه بر این، F_{fy} باید به عنوان تابعی از متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم در رابطه‌ی (۳۸) جایگزین شود. بدین منظور، از مدل خطی تایر طبق رابطه‌ی (۴۱) استفاده می‌شود که چگونگی ارتباط این مدل با متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم در روابط (۴۲) تا (۴۴) بیان شده است.

$$F_{fx} = \frac{T_f - \left(J_f + m_{Tf}R_{ef}^2\right)\dot{\Omega}_f}{R_{ef}} - C_{Rf}F_{zf} \quad (۳۹)$$

$$F_{rX} = \frac{T_r - (J_r + m_{Tr}R_{er}^2)\dot{\Omega}_r}{R_{er}} - C_{Rr}F_{zr} \quad (۴۰)$$

$$F_{fy} = -C_{\alpha f}\alpha_f \quad (۴۱)$$

$$\alpha_f = \delta_f + \tan^{-1}\left(\frac{v_{fY}}{|v_{fX}|}\right) \quad (۴۲)$$

$$v_{fY} = v_Y + \Omega_Z l_1 \quad (۴۳)$$

$$v_{fX} = v_X \quad (۴۴)$$

اکنون معادله (۳۸) را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned}\dot{h} &= f_f + bT - \ddot{X}_{Gd_{CG}} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \\ &- \frac{(J_r + m_{Tr}R_{er}^2)\dot{\Omega}_r}{mR_{er}}\cos\psi \\ &- \frac{C_{\alpha f}\left(\delta_f + \tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m} sin\delta_f \cos\psi \\ &- \frac{\left(J_f + m_{Tf}R_{ef}^2\right)\dot{\Omega}_f}{mR_{ef}} cos\delta_f \cos\psi - a_Y \sin\psi\end{aligned} \quad (۴۵)$$

که در آن:

$$f_f = -\frac{C_{Rr}F_{zr}}{m}\cos\psi - \frac{C_{Rf}F_{zf}}{m} cos\delta_f \cos\psi \quad (۴۶)$$

$$b_f = \frac{\cos\psi}{mR_e} \quad (۴۷)$$

$$R_e = R_{ef} \approx R_{er} \quad (۴۸)$$

$$T = cos\delta_f T_f + T_r \quad (۴۹)$$

علی‌رغم اینکه $\dot{h} = 0$ باید برای T حل شود، مقادیر متوسط f_f و b_f قبل از محاسبه T تعیین می‌شوند تا بتوانند کنترل‌کننده را همانطور که در ادامه توصیف شده است، مقاوم کنند.

$$\hat{f}_f = \frac{f_{fmax} + f_{fmin}}{2} \quad (۵۰)$$

$$\hat{b}_f = \frac{\cos\psi}{R_e\sqrt{m_{max}m_{min}}} \quad (۵۱)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}f_{fmin} &= -\frac{C_{Rrmax}F_{zrmax}}{m_{min}}\cos\psi \\ &- \frac{C_{Rfmax}F_{zfmax}}{m_{min}} cos\delta_f \cos\psi\end{aligned} \quad (۵۲)$$

$$\begin{aligned}f_{fmax} &= -\frac{C_{Rrmin}F_{zrmin}}{m_{max}}\cos\psi \\ &- \frac{C_{Rfmin}F_{zfmin}}{m_{max}} cos\delta_f \cos\psi\end{aligned} \quad (۵۳)$$

$$b_{fmin} = \frac{\cos\psi}{m_{max}R_e} \quad (۵۴)$$

$$b_{fmax} = \frac{\cos\psi}{m_{min}R_e} \quad (۵۵)$$

اکنون $\dot{h}$ می‌تواند به شکل زیر بازنویسی شود:

$$\begin{aligned}\dot{h} &= \hat{f}_f + \hat{T} - \ddot{X}_{Gd_{CG}} + 2\lambda\dot{\tilde{X}} + \lambda^2\tilde{X} \\ &- \frac{(J_r + m_{Tr}R_{er}^2)\dot{\Omega}_r}{mR_{er}}\cos\psi \\ &- \frac{C_{\alpha f}\left(\delta_f + \tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m} sin\delta_f \cos\psi \\ &- \frac{\left(J_f + m_{Tf}R_{ef}^2\right)\dot{\Omega}_f}{mR_{ef}} cos\delta_f \cos\psi - a_Y \sin\psi\end{aligned} \quad (۵۶)$$

حال با حل $\dot{h} = 0$ برای $\hat{T}$ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}\hat{T} &= -\hat{f}_f + \ddot{X}_{Gd_{CG}} - 2\lambda\dot{\tilde{X}} - \lambda^2\tilde{X} \\ &+ \frac{(J_r + m_{Tr}R_{er}^2)\dot{\Omega}_r}{mR_{er}}\cos\psi \\ &+ \frac{C_{\alpha f}\left(\delta_f + \tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m} sin\delta_f \cos\psi \\ &+ \frac{\left(J_f + m_{Tf}R_{ef}^2\right)\dot{\Omega}_f}{mR_{ef}} cos\delta_f \cos\psi + a_Y \sin\psi\end{aligned} \quad (۵۷)$$

سرانجام، ورودی کنترلی T توسط معادله (۵۸) بدست می‌آید که در آن $sat(h)$ که در رابطه‌ی (۵۹) بیان شده است تابع اشباع می‌باشد و به منظور جلوگیری از چترینگ (chattering) استفاده شده است. برای تضمین پایداری، محدوده ی k_f در معادله (۶۰) مشخص شده که در آن β_f و F_f توسط روابط (۶۱) و (۶۲) بیان شده‌اند. لازم به ذکر است، از آنجا که خودرو محرک جلو می‌باشد، توزیع گشتاور وارد بر چرخ ها در رابطه‌ی (۶۳) بیان شده که در آن ζ ضریب توزیع ترمز (brake proportioning) می‌باشد.

$$T = \hat{b}_f^{-1}\left[\hat{T} - k_f sat(h)\right] \quad (۵۸)$$

$$sat(h) = \min\left\{1، max\left\{-1، \frac{h}{\phi_f}\right\}\right\} \quad (۵۹)$$

$$k_f \geq \beta_f\left(F_f + \eta_f\right) + \left(\beta_f - 1\right)\left|\hat{T}_f\right| \quad (۶۰)$$

$$\beta_f = \sqrt{\frac{m_{max}}{m_{min}}} \quad (۶۱)$$

$$F_f = \left|\frac{f_{fmax} - f_{fmin}}{2}\right| \quad (۶۲)$$

$$\begin{cases} T_f = T\sec\delta_f \\ T_r = 0 \end{cases} ، T \geq 0 \qquad \begin{cases} T_f = \dfrac{T}{\cos\delta_f + \zeta} \\ T_r = \zeta T_f \end{cases} ، T < 0 \quad (۶۳)$$

به منظور طراحی کنترل‌کننده‌ی عرضی برای تعیین ورودی فرمان δ_f، سه در جه از درجات آزادی مدل را حذف کرده و فرض می‌کنیم تنها معادلات حرکت سیستم روابط (۲۳) و (۲۴) باشند. سپس خطا و سطح لغزش توسط معادلات (۶۴) و (۶۵) تعریف می‌شوند، همچنین معادله (۶۵) توسط معادله (۶۶) گسترش می‌یابد.

$$\tilde{Y} = Y_{G_{CG}} - Y_{Gd_{CG}} \quad (۶۴)$$

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)\tilde{Y} \quad (۶۵)$$

$$s = \dot{\tilde{Y}} + \lambda\tilde{Y} \quad (۶۶)$$

با مشتق‌گیری از معادله (۶۶) نسبت به زمان، $\dot{s}$ به شرح زیر بدست می‌آید:

$$\dot{s} = \ddot{Y}_{G_{CG}} - \ddot{Y}_{Gd_{CG}} + \lambda\dot{\tilde{Y}} \quad (۶۷)$$

با جایگذاری معادله (۳۲) در معادله (۶۷) داریم:

$$\dot{s} = (\dot{v}_X - \Omega_z v_Y)sin\Psi + (\dot{v}_Y + \Omega_z v_X)cos\Psi - \ddot{Y}_{Gd_{CG}} + \lambda\dot{\tilde{Y}} \quad (۶۸)$$

همچنین با جایگزین‌کردن $\dot{v}_Y$ از معادله (۲) خواهیم داشت:

$$\dot{s} = (\dot{v}_X - \Omega_z v_Y)sin\Psi + \left(\frac{F_{rY} + F_{fy}cos\delta_f - F_{fx}sin\delta_f}{m}\right)cos\Psi - \ddot{Y}_{Gd_{CG}} + \lambda\dot{\tilde{Y}} \quad (۶۹)$$

با توجه به حذف درجه آزادی حرکت طولی، می‌توان گفت $\dot{v}_X = 0$ و نیروهای طولی وارد بر تایرها را نیز می‌توان متحد با صفر درنظر گرفت. بنابراین خواهیم داشت:

$$F_{fx} = 0 \quad (۷۰)$$

همچنین به منظور دستیابی راحت‌تر به یک رابطه صریح برای δ_f، از ساده‌سازی زیر استفاده می‌شود:

$$\cos\delta_f \approx 1 \quad (۷۱)$$

توجه شود که ساده‌سازی‌های بالا توسط پسخورد خطای پیمایش جبران خواهند شد. با اعمال این ساده‌سازی‌ها خواهیم داشت:

$$\dot{s} = f + b\delta_f - \ddot{Y}_{Gd_{CG}} + \lambda\dot{\tilde{Y}} \quad (۷۲)$$

که در آن:

$$f = \left(\frac{-C_{\alpha r}\tan^{-1}\left(\frac{v_Y - \Omega_Z l_2}{|v_X|}\right) - C_{\alpha f}\left(\tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m}\right)cos\psi + \Omega_z v_Y sin\psi \quad (۷۳)$$

$$b = -\frac{C_{\alpha f}}{m}cos\psi \quad (۷۴)$$

لازم به ذکر است که به‌ترتیب از معادلات (۴۱) تا (۴۴) و (۷۵) تا (۷۸) به‌منظور به‌کارگیری مدل خطی برای نیروهای جانبی در تایرهای جلو و عقب خودرو استفاده شده است.

$$F_{rY} = -C_{\alpha r}\alpha_r \quad (۷۵)$$

$$\alpha_r = \tan^{-1}\left(\frac{v_{rY}}{|v_{rX}|}\right) \quad (۷۶)$$

$$v_{rX} = v_X \quad (۷۷)$$

$$v_{rY} = v_Y - \Omega_Z l_2 \quad (۷۸)$$

مشابه مورد قبل، برای مقاوم‌سازیِ کنترل‌کننده ، مقادیر متوسط f و b تعیین می‌شوند:

$$\hat{f} = \frac{f_{max} + f_{min}}{2} \quad (۷۹)$$

$$\hat{b} = -cos\Psi\sqrt{\frac{C_{\alpha f max} * C_{\alpha f min}}{m_{max} * m_{min}}} \quad (۸۰)$$

که در آن:

$$f_{max} = \left(\frac{-C_{\alpha r max}\tan^{-1}\left(\frac{v_Y - \Omega_Z l_2}{|v_X|}\right) - C_{\alpha f max}\left(\tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m_{min}}\right)cos\Psi + a_x sin\Psi \quad (۸۱)$$

$$f_{min} = \left(\frac{-C_{\alpha r min}\tan^{-1}\left(\frac{v_Y - \Omega_Z l_2}{|v_X|}\right) - C_{\alpha f min}\left(\tan^{-1}\left(\frac{v_Y + \Omega_Z l_1}{|v_X|}\right)\right)}{m_{max}}\right)cos\Psi + a_x sin\Psi \quad (۸۲)$$

$$b_{max} = -\frac{C_{\alpha f max}}{m_{min}}cos\Psi \quad (۸۳)$$

$$b_{min} = -\frac{C_{\alpha f min}}{m_{max}}cos\Psi \quad (۸۴)$$

بنابراین:

$$\dot{s} = \hat{f} + \hat{\delta}_f - \ddot{Y}_{Gd_{CG}} + \lambda\dot{\tilde{Y}} = 0 \Rightarrow \hat{\delta}_f = \ddot{Y}_{Gd_{CG}} - \lambda\dot{\tilde{Y}} - \hat{f} \quad (۸۵)$$

و مشابه قبل خواهیم داشت:

$$\delta_f = \hat{b}^{-1}\left[\hat{\delta}_f - ksat(s)\right] \quad (۸۶)$$

که در آن:

$$sat(s) = \min\left\{1، max\left\{-1، \frac{s}{\phi}\right\}\right\} \quad (۸۸)$$

$$k \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1)\left|\hat{\delta}_f\right|$$

$$\beta = \sqrt{\frac{b_{max}}{b_{min}}} \quad (۸۹)$$

$$F = \left|\frac{f_{max} - f_{min}}{2}\right| \quad (۹۰)$$

سرانجام، پس از تعیین پارامترها، ساختار تعویض خط ارائه‌شده در این پژوهش آماده‌ی اجرا در یک سناریوی پیچیده در حضور خودروهای اطراف در محیط IPG CarMake به منظور ارزیابی عملکرد آن می‌باشد.

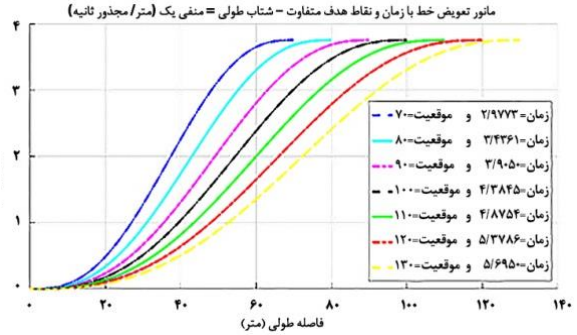
۳- شبیه‌سازی

۳-۱- طراحی مسیرهای ایمن

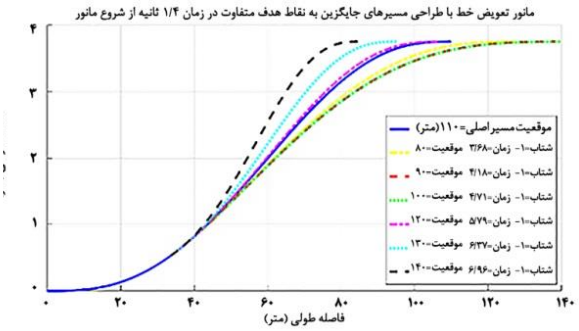
همانطور که در بخش ۲.۳ ذکر شد، با توجه به زمان مانور و موقعیت نقطه هدف و همچنین امکان سنجی دینامیکی خودرو، تمامی مسیرهای ایمن ممکن در هر مانور تعویض خط به همراه تمامی مسیرهای جایگزین به صورت آفلاین طراحی می‌شوند که در این قسمت نحوه طراحی این مسیرها بررسی شده است. در این مقاله، با در نظر گرفتن نه نقطه‌ی بیشتر با فاصله‌های ۱۰ متر از سمت راست بحرانی‌ترین مسیر و همچنین سه حالت با شتاب‌های مختلف طولی (مثبت، صفر و منفی) برای هر نقطه هدف، تمام مسیرهای ایمن ممکن با اعمال روش بهینه‌سازی DE بر روی معادله چندجمله‌ای مرتبه پنجم طراحی شده‌اند. به‌منظور واضح‌تر شدن این موضوع، نتایج یک سناریو نمونه به شرح زیر توضیح داده می‌شود؛

باتوجه به سناریوی رانندگی شبیه‌سازی شده در بزرگراهی با سرعت اولیه ۹۰ کیلومتر در ساعت و با درنظر گرفتن دینامیک خودروی

هدف و اصطکاک جاده، بحرانی‌ترین مسیر تعویض خط حدود ۲/۹۸ ثانیه به طول می‌انجامد در حالیکه همانطور که در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است، خودروی هدف در این مدت ۷۰ متر را در جهت طولی می‌پیماید. به‌منظور تشریح موضوع اصلی و شفافیت تصویر، باوجود چندین مسیر ایمن با شتاب‌های مختلف برای هر نقطه هدف، تنها مسیرهایی با شتاب (m/s2)1- برای کلیه نقاط هدف ایمن، در این شکل نمایش داده شده‌اند. به‌منظور استخراج بحرانی‌ترین مسیر و سایر مسیرهای عملی(feasible) در سمت راست آن به عنوان مسیرهای جایگزین (re-planning paths)، تعدادی نقطه میانی وجود دارد که برای هریک از مسیرهای ارائه شده همان روش تکرار می‌شود. به‌منظور شفاف‌سازی ساختار این الگوریتم برای مسیرهای جایگزین، مسیر اولیه‌ای با زمان مانور ۴/۸۷ ثانیه و مسافت طولی ۱۱۰ متر به عنوان مسیر اولیه در شکل ۹ (الف) انتخاب شد. شکل ۹ (ب) مسیرهای جایگزین طراحی شده را که از اولین نقطه میانی واقع در این مسیرحرکت شروع شده بودند، نشان می‌دهد تا توانایی روش ارائه شده را در شرایط دینامیکی ناپایدار(گذرا) اثبات کرده و همچنین جدول آفلاین مسیرهای طراحی‌شده را برای هرگونه تغییر در وضعیت خودروهای اطراف آماده کند. برای تکمیل این فرآیند، روند طراحی مسیرهای ایمن بر اساس نقاط میانی و نقاط



(الف)



(ب)

شکل ۹) الف) مسیرهای ایمن ممکن برای مانور تعویض خط با نقاط هدف متفاوت ب) مسیرهای ایمن ممکن به عنوان مسیرهای جایگزین در حین مانور تعویض خط

پایانی، تا اتمام طراحی تمام مسیرهای اولیه ممکن و مسیرهای جایگزین با شرایط اولیه متفاوت و ضرایب متفاوت اصطکاک جاده، تکرار شده است.

۲-۳- سناریوی تعویض خط در محیط ترافیکی متغیر

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ارائه شده، یک مانور تعویض خط در شرایط ترافیکی دینامیکی گذرا در این بخش بررسی شده است. الگوریتم پیشنهادی در این سناریو باید بتواند مسیر حرکت خود را با شرایط دینامیکی گذرا حاصل از تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در تصمیم‌گیری‌های خودروهای اطراف، در طول مانور تعویض خط انطباق دهد. از آنجاکه این تغییرات در حین مانور باعث می‌شوند که نقطه هدف دیگر ایمن نباشد، الگوریتم ارائه شده مجبور است مسیر جدیدی را با شتاب‌های مختلف دوباره طراحی کند. ازاین‌رو، این سناریو برای ارزیابی عملکرد سیستم در طراحی مسیرهای جایگزین بر اساس تصمیمات خودروهای اطراف در شرایط بحرانی مناسب است.

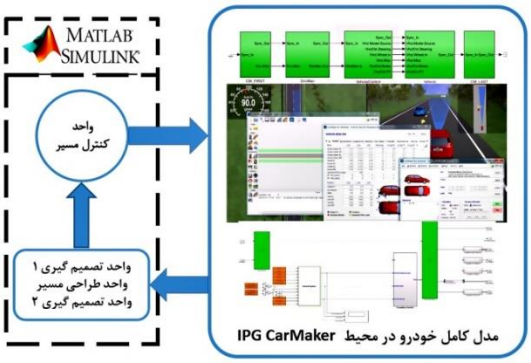
در این مانور سه خودروی A، B و C خودروهای حاضر در محیط ترافیکی اطراف خودروی هدف (E) با سرعت ثابت ۹۰ کیلومتر در ساعت هستند. در ابتدای مانور، خودروی A با سرعت ۹۰ کیلومتر در ساعت و با شتاب $-0.8\ (m/s^2)$ در جلوی خودروی هدف در همان خط و خودروی B و C به ترتیب با سرعت های ثابت ۱۰۰ و ۸۰ کیلومتر در ساعت در جلو و پشت خودروی هدف در خط مجاور قرار دارند. این سه خودرو در ابتدای مانور به ترتیب فاصله طولی برابر با ۷۰، ۱۸۰ و ۵۰ متر با خودروی هدف دارند. از ساختار تعویض خط ارائه شده انتظار می‌رود که بتواند در حضور تغییرات دینامیکی شرایط ترافیکی ناشی از تصمیمات لحظه‌ای خودروهای اطراف، مانور تعویض خط را بدون برخورد انجام دهد. با توجه به تغییرات در جریان ترافیک پس از گذشت یک ثانیه از لحظه شروع مانور تعویض خط، خودروی B و C در خط هدف با مقادیر $a_{B1} = +0.8\ (m/s^2)$ و $a_{C1} = +1.3\ (m/s^2)$ شروع به شتابگیری می‌کنند.

پس از گذشت ۰/۸ ثانیه از تغییرات قبلی، خودروی A به دلیل اتفاقات ترافیکی در خط اولیه و همچنین مناسب بودنِ فضای لازم برای تعویض خط در خط هدف، بدون توجه به خودروی E با انجام مانور cut-in و قطع کردن مسیر حرکت خودروی هدف باعث می‌شود تا شرایط برای خودروی هدف بحرانی شود و دوباره از مسیرهای جایگزین برای اصلاح مسیر استفاده کند. انتظار می‌رود ساختار تعویض خط جدید واکنش‌های مناسبی را نسبت به این تغییرات گذرا در محیط ترافیکی نشان دهد و در مقابل این چالش‌ها به کمک قابلیت‌های طراحی مسیرهای جایگزین آنلاین از هر نوع برخوردی در حین مانور اجتناب کند.

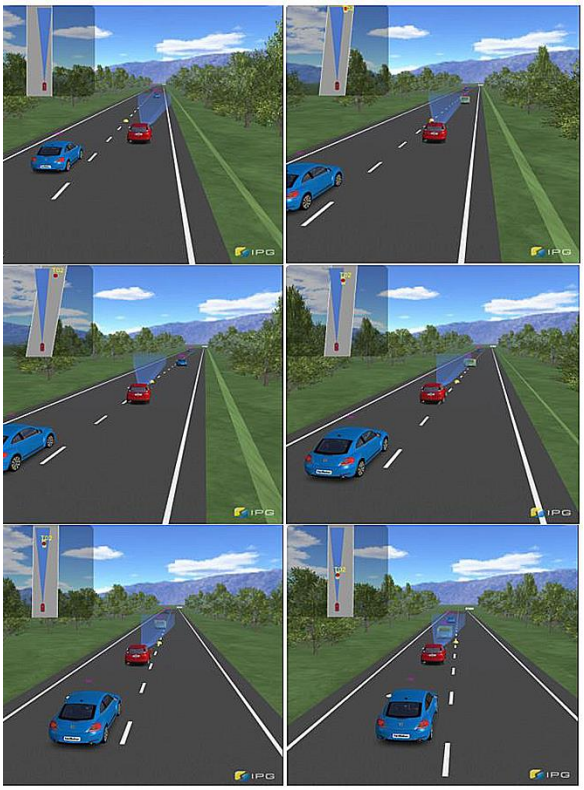
۳-۳- پیاده‌سازی سناریو

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ارائه شده در مانورهای مختلف تعویض خط در شرایط دینامیکی گذرا و در حضور خودروهای اطراف، از IPG CarMaker به عنوان یکی از بهترین سیستم‌های

(framework) شبیه‌سازی کنترل دینامیك خودرو برای انجام سناریوهای رانندگی برای مانورهای آفلاین و زمان واقعی[33] استفاده شده است. علیرغم اینکه بسیاری از تحقیقات پیشین بر اساس یک مدل دینامیکی خطی بود[13]، IPG CarMaker مدل پارامتری از دینامیک خودرو را با انواع زیر سیستم‌ها و همچنین چندین مدل تایر و راننده ارائه می‌دهد که این پارامترها می‌تواند همراه قابلیت استفاده از کدهای زبان برنامه‌نویسی C نیز از دیگر دلایل انتخاب این نرم افزار شبیه‌سازی دینامیکی در این مقاله می‌باشد که در شکل ۱۰ (الف) نحوه این ارتباط نشان داده شده



(ب)



(ب)

شکل ۱۰) الف) نحوه ارتباط بین IPG CarMaker و MATLAB / SIMULINK به منظور پیاده‌سازی مانور تعویض خط در حضور خودروهای اطراف ب) موقعیت خودروهای اطراف در شش لحظه فریزشده در حین مانور تعویض خط

برای هر سناریوی تست به صورت اختصاصی تعیین شوند. علاوه بر این، ارتباط بین IPG CarMaker و MATLAB / SIMULINK به است. شکل ۱۰ (ب) موقعیت خودروهای اطراف در حین مانور تعویض خط را در شش لحظه فریزشده از مانور نشان می‌دهد تا عملکرد برخطِ مطلوبِ الگوریتم ارائه شده در شرایط ترافیکی دینامیکی ناپایدار را اثبات نماید.

۴- نتایج و بحث

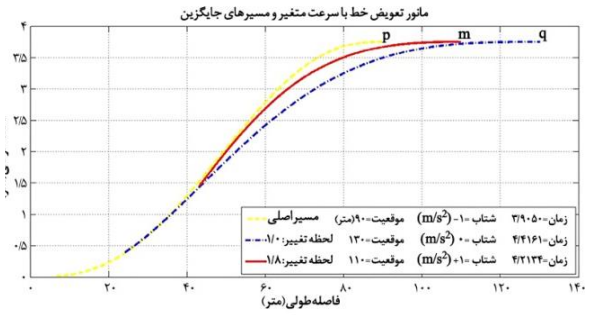
در این بخش جزئیات نتایج حاصل از پیاده‌سازی سناریوی بحرانی که در بخش ۳.۲ توضیح داده شد، ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۱۱ (الف) با خط تیره (dash line) نشان داده شده است، در ابتدای مانور، یک مسیر تعویض خط با توجه به اطلاعات اولیه جمع آوری شده توسط واحدهای تصمیم‌گیری و طراحی مسیر، انتخاب شده است. این مانور تعویض خط ۳/۹۱ ثانیه طول می‌کشد و در این مدت خودروی هدف مسافتی معادل ۹۰ متر را در جهت طولی با شتاب ثابت برابر با (m/s2) 1- می‌پیماید. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، در الگوریتم ارائه شده هر مسیر نهایی از میان سایر مسیرهای ایمن طراحی شده و بر اساس معیارهای واحد تصمیم گیری شماره دو انتخاب شده است.

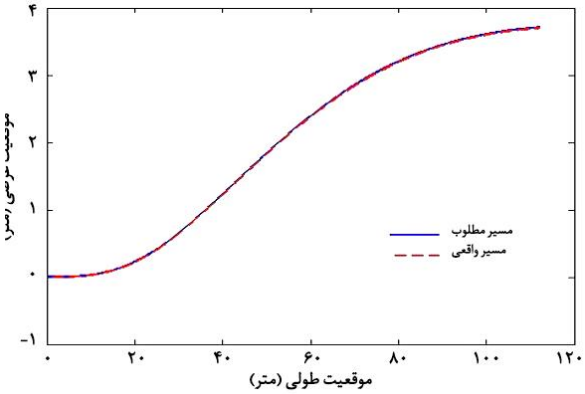
پس از گذشت یک ثانیه از ابتدای مانور و در اثر شتابگیری خودروهای B و C (که در بخش ۳.۲ توضیح داده شد)، نقطه انتهایی مسیر انتخابی (نقطه p در شکل ۱۱ (الف)) دیگر ایمن نخواهد بود و متعاقبا واحد تصمیم‌گیری شماره یک باید زمان مانور جدیدی برابر با ٤/٤٢ ثانیه انتخاب نماید. همانطور که با خط نقطه (dash dot) در شکل ۱۱ (الف) نشان داده شده است، واحد تصمیم‌گیری شماره دو مسیر جایگزین طراحی شده‌ای را بر اساس اطلاعات جدیدی که از واحد طراحی مسیر دریافت کرده، انتخاب می‌نماید. خودروی هدف باید مسیر جایگزینی که نقطه انتهایی آن (نقطه q) ۴۰ متر جلوتر از نقطه پایانی مسیر قبلی (نقطه p) است را با سرعت ثابت دنبال نماید.

همانطور که اشاره شد، پس از ۰/۸ ثانیه رانندگی در مسیر جایگزین، در اثر مانور cut-in سریعِ خودروی A، مسیر جایگزین نیز دیگر ایمن نخواهد بود و مسیری که بصورت خط پیوسته (solid line) در شکل ۱۱ (الف) نشان داده شده است و این‌بار ۲۰ متر عقب‌تر از مسیر قبلی و پشت سر خودروی A می‌باشد، برای اجتناب از برخورد تا انتهای مانور انتخاب می‌شود. نقطه m به عنوان نقطه هدف نهایی انتخاب شده است و خودروی هدف باید این مسیر را با شتاب ثابتی برابر با (m/s2) 1+ طی‌کند.

شکل ۱۱ (ب) مسیر واقعی پیموده شده در سناریوی فوق توسط خودروی هدف را در مقایسه با مسیر تعویض خط مطلوب که توسط واحد طراحی مسیر در حین مانور طراحی شده است، نشان می‌دهد.



(الف)



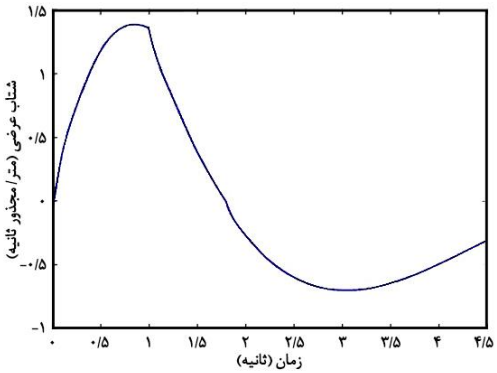
(ب)

شکل ۱۱) الف) مسیرهای تعویض‌خط با توجه به تغییرات ترافیکی دینامیکی گذرا ب) مسیرواقعی پیموده شده توسط خودرو هدف در مقایسه با مسیر تعویض خط مطلوب طراحی شده

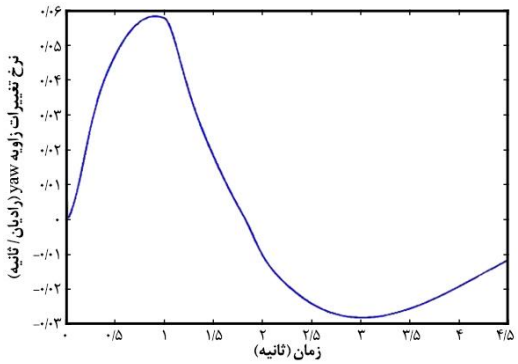
به‌منظور مشخص نمودن عملکرد مطلوب روش ارائه شده و بررسی پایداری خودرو، مهمترین پارامترهای دینامیکی خودروی هدف در حین این مانور پیچیده تعویض‌خط در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲، روش ارائه شده توانست علاوه بر طراحی مسیر اولیه تعویض خط در حضور خودروهای اطراف، نسبت به تغییرات بحرانی در شرایط ترافیکی گذرا در یک مانور زمان واقعی واکنش مناسبی نشان دهد. همچنین این روش توانست با دو بار طراحی مسیرهای جایگزین، راه‌حل مناسبی برای مقابله با تصمیمات ناگهانی و خطرناک خودروهای اطراف در حین مانور پیدا کند. بدین ترتیب با تغییرات موقعیت خودروهای اطراف با توجه به شرایط ترافیکی دینامیکی ناپایدار(گذرا) در حین مانور تعویض خط تطبیق یافته و همواره یك مسیر ممکن را براساس دینامیک خودرو طراحي کرده است.

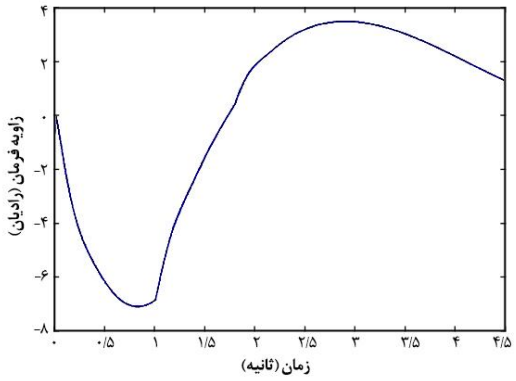
همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کنترل‌کننده‌ی توسعه یافته برای خودروی هدف نیز توانست مسیر حرکت را که شامل دو تغییر ناگهانی شدید در زمان مانور و موقعیت نقطه هدف است، دنبال کند. رفتار دینامیکی قابل قبول خودروی هدف در حین سناریوی پیچیده تعویض خط که در شکل ۱۲ نشان داده شده است نیز پایداری خودروی هدف و همچنین عملکرد الگوریتم را در شرایط ترافیکی دینامیکی گذرا اثبات می‌کند.



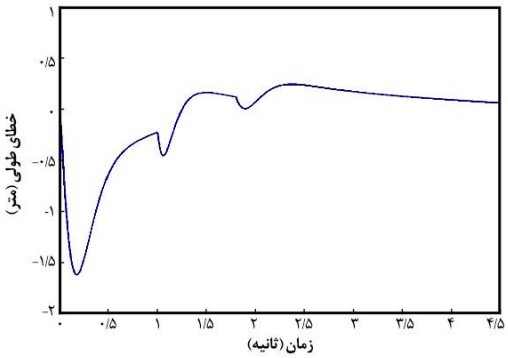
(الف)



(ب)



(پ)



(ت)

شکل ۱۲) الف) شتاب عرضی خودرو ب) نرخ تغییرات زاویه yaw پ) زاویه فرمان ت) خطای طولی در حین مانور تعویض‌خط

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختار تعویض‌خط جدیدی برای بهبود طراحی مسیر آنلاین(برخط) در شرایط ترافیکی متغیر ارائه شد. الگوریتم ارائه شده علاوه بر در نظر گرفتن اصطکاک جاده و شرایط خودروهای اطراف در واحد تصمیم‌گیری شماره یک، قادر به طراحی چندین مسیر با شتاب‌های مختلف و همچنین اجتناب از برخورد در کل زمان مانور می‌باشد. تمامیِ مسیرهای ایمن ممکن و همچنین مسیرهای ایمن جایگزین بر اساس تغییر موقعیت خودروهای اطراف در حین مانور تعویض‌خط در واحد طراحی مسیر طراحی شده‌اند تا کاملاً نسبت به تغییر شرایط ترافیکی دینامیکی ناپایدار مقاوم باشند. به‌منظور جلوگیری از زمان تلف شده در روش‌های متداول بهینه‌سازی، مسیرهای مختلفی در هر مانور بصورت آفلاین طراحی شده‌اند و در اختیار واحد تصمیم‌گیری شماره دو قرار می‌گیرند تا مسیری که حداقل شتاب عرضی را در طول مانور تعویض‌خط (برای تامین راحتی مسافر) در هر لحظه از مانور به صورت برخط انتخاب شود. توسعه کنترلر مقاوم طولی و عرضی خودرو به عنوان واحد کنترل مسیر، توانایی این الگوریتم را در سناریوهای پیچیده تحت شرایط مختلف دینامیکی ناپایدار برای بهبود عملکرد ساختار تعویض‌خط ارائه‌شده، اثبات کرده است. بدین ترتیب الگوریتم ارائه شده در این پژوهش برخلاف پژوهش‌های پیشین، قادر به اصلاح مسیر حرکت در حین مانور تعویض خط بوده و می‌تواند در هر لحظه از مانور مسیرهای بهینه‌ی ایمن جدیدی را در طراحی نموده و خودرو را بر اساس مسیر جدید طراحی‌شده با توجه تصمیمات آنیِ خودروهای اطراف هدایت نماید.

با وجود اینکه عملکرد مطلوب الگوریتم ارائه شده از طریق سناریوهای مختلف پیچیده‌ای در شرایط ترافیکی دینامیکی گذرا اثبات شده است، محدودیت‌هایی وجود دارد که می‌تواند برای بهبود ساختار تعویض‌خط ارائه شده در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. در نظر نگرفتن تأثیر انحنا و شیب جاده و همچنین شرایط بسیار بحرانی بدون وجود هیچ نقطه هدف ایمنی در خط هدف، محدودیت‌های این روش محسوب می‌شوند و رویکرد شبیه‌سازی جامع برای ارزیابی عملکرد سیستم در موقعیت‌های مختلف ترافیکی، چشم انداز مهمی برای مطالعه می‌باشد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تعارض منافع: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

سهم نویسندگان: محسن رفعت (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه / طراحی مسیر/ پژوهشگر اصلی / نگارنده بحث (۳۵٪) ؛ شهرام آزادی (نویسنده دوم)، بررسی پایداری / پژوهشگر کمکی / نگارنده بحث (۲۵٪) ؛ علی آنالویی (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه / طراحی کنترل‌کننده / پژوهشگر کمکی (۲۰٪) ؛ سجاد سمیعی (نویسنده چهارم)، قسمت تصمیم‌گیری / طراحی مسیر / پژوهشگر کمکی (۱۰٪) ؛ حمیدرضا رضایی (نویسنده پنجم)، پیاده‌سازی / پژوهشگر کمکی / نگارنده بحث (۱۰٪)

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

1- Road Safety, 2018. www.roadsafetymayo.ie/CausesofCollisions/.

2- Ziębiński A, Cupek R, Grzechca D, Chruszczyk L. Review of advanced driver assistance systems (ADAS). In13th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2017.

3- Choi S, Yeo H. Framework for simulation-based lane change control for autonomous vehicles. In2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2017 (pp. 699-704). IEEE.

4- Zhou ST, Zhang J, Li LH, Wu KR, Ran B. Discretionary Lane Change Model for Intelligent Connected Vehicles on Expressway. 19th COTA International Conference of Transportation Professionals 2019 (pp. 5671-5683).

5- Pourmahmoudi A, Ghaffari A, Javadi M, Khodayari A. A predictive model of discretionary lane change behavior considering human factors in the framework of time parameters. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2020;234(4):1034-46.

6- Dixit S, Fallah S, Montanaro U, Dianati M, Stevens A, Mccullough F, Mouzakitis A. Trajectory planning and tracking for autonomous overtaking: State-of-the-art and future prospects. Annual Reviews in Control. 2018;45:76-86.

7- Wnag C, Zhao W, Xu Z, Zhou G. Path planning and stability control of collision avoidance system based on active front steering. science China Technological sciences. 2017;60(8):1231-43

8- Chebly A, Talj R, Charara A. Coupled longitudinal and lateral control for an autonomous vehicle dynamics modeled using a robotics formalism. IFAC-PapersOnLine. 2017;50(1):12526-32.

9- Xu T, Yuan H. Autonomous vehicle active safety system based on path planning and predictive control. In2016 35th Chinese Control Conference (CCC) 2016 (pp. 8889-8895). IEEE.

10- Kayacan E, Ramon H, Saeys W. Robust trajectory tracking error model-based predictive control for unmanned ground vehicles. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2015;21(2):806-14.

11- Lei C, Chaofang H, Na W. Obstacle avoidance control of unmanned ground vehicle based on NMPC. In2017 Chinese Automation Congress (CAC) 2017 (pp. 6402-6406). IEEE.

12- Huang C, Naghdy F, Du H. Model predictive control-based lane change control system for an autonomous vehicle. In2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON) 2016 (pp. 3349-3354). IEEE.

13- Cai J, Jiang H, Chen L, Liu J, Cai Y, Wang J. Implementation and development of a trajectory tracking control system for intelligent vehicle. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2019;94(1):251-64.

14- Khosroshahi A, Ohn-Bar E, Trivedi MM. Surround vehicles trajectory analysis with recurrent neural networks. In2016 IEEE 19th International Conference

on Intelligent Transportation Systems (ITSC) 2016 (pp. 2267-2272). IEEE.
15- Dang R, Wang J, Li SE, Li K. Coordinated adaptive cruise control system with lane-change assistance. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015;16(5):2373-83.
16- Jalalmaab M, Fidan B, Jeon S, Falcone P. Model predictive path planning with time-varying safety constraints for highway autonomous driving. In2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR) 2015 (pp. 213-217). IEEE.
17- Zhao M, Wang SH, Sun D, Wang XJ. A car-following model considering preceding vehicle's lane-changing process. IEEE Access. 2019;7:89913-23.
18- Liu X, Liang J, Xu B. A deep learning method for lane changing situation assessment and decision making. IEEE Access. 2019;7:133749-59.
19- Liu Y, Wang X, Li L, Cheng S, Chen Z. A novel lane change decision-making model of autonomous vehicle based on support vector machine. IEEE Access. 2019;7:26543-50.
20- Sazgar H, Azadi S, Kazemi R. Trajectory planning and integrated control with the Nonlinear Bicycle Model for high-speed autonomous lane change. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):103-14.
21- Stanger T, del Re L. A model predictive cooperative adaptive cruise control approach. In2013 American Control Conference 2013 (pp. 1374-1379). IEEE.
22- Shim T, Adireddy G, Yuan H. 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. 2012;226(6):767-78.
23- Shamir T. How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle: Design and analysis of an optimal trajectory. IEEE Transactions on Automatic Control. 2004;49(4):607-10.
24. Noruzi, A., Kazemi, R., Azadi, Sh., Optimal Trajectory design for Automatic Lane Change in Autonomous Vehicles. The first national smart city conference, Iran, 2016.
25- Yoon S, Kum D. The multilayer perceptron approach to lateral motion prediction of surrounding vehicles for autonomous vehicles. In2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2016 (pp. 1307-1312). IEEE.
26- Schmied R, Moser D, Waschl H, del Re L. Scenario model predictive control for robust adaptive cruise control in multi-vehicle traffic situations. In2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2016 (pp. 802-807). IEEE.
27- Tehrani H, Do QH, Egawa M, Muto K, Yoneda K, Mita S. General behavior and motion model for automated lane change. In2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2015 (pp. 1154-1159). IEEE.
28- Madås D, Nosratinia M, Keshavarz M, Sundström P, Philippsen R, Eidehall A, Dahlén KM. On path planning methods for automotive collision avoidance. In2013 IEEE intelligent vehicles symposium (IV) 2013 (pp. 931-937). IEEE.
29- Samiee S, Azadi S, Kazemi R, Eichberger A. Towards a decision-making algorithm for automatic lane change manoeuvre considering traffic dynamics. PROMET-Traffic&Transportation. 2016;28(2):91-103.
30- Samiee, S., The Design of Driver Drowsiness Detection System Based on Vehicle-driver Interaction and Controlling the Vehicle Autonomously. PhD. Thesis, Mechanical Engineering faculty, K. N. Toosi University of Technology, 2015.
31- Ali IM, Essam D, Kasmarik K. A novel design of differential evolution for solving discrete traveling salesman problems. Swarm and Evolutionary Computation. 2020;52:100607.
32. MSC.Software, 2002. PAC2002 Magic-Formula tire model.
33- Cao, P., Modeling Active Perception Sensors for Real-Time Virtual Validation of Automated Driving Systems. PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Technical University of DARMSTADT, 2017.