

ردیابی مسیر خودروی خودران جهت انجام مانور حفظ خط با استفاده از روش کنترل پیش بین مدل تطبیقی (AMPC)

چکیده: خودروهای خودران با هدف بهبود ایمنی جاده ها، مشکلات ترافیکی و راحتی مسافران طراحی شده اند. برای این منظور، سیستم های حفظ خط (LK) راهکارهای مهم و مناسبی هستند. وظیفه اصلی این قبیل از خودروها، پیش بینی فعالیت ها و اهداف عابران پیاده و سایر وسایل نقلیه می باشد. این پژوهش به پیاده سازی مدلی جهت توسعه عملکرد حفظ خط برای یک خودروی خودران می پردازد. در واقع مدل سازی و تشخیص خط با جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ انجام شده است که امکان توسعه خودروهای خودران را با ارائه الگوریتم های بینایی کامپیوتری فراهم می کند. همچنین با استفاده از اطلاعات به دست آمده از فاز تشخیص خط، مسیر لازم برای مکانیزم حفظ خط ایجاد خواهد شد. در این پژوهش به منظور دنبال کردن مسیر، از یک کنترلر با استفاده از تئوری کنترل پیش بینی مدل (MPC) استفاده شده است، به طوریکه پس از محاسبه مقادیر زاویه فرمان، خودروی خودران مسیر پیش بینی شده را دنبال خواهد نمود. در نهایت نتایج روش کنترلی پیشنهادی یعنی روش کنترل پیش بینی مدل تطبیقی (AMPC) با نتایج حاصل از روش کنترلی تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) صحت سنجی و ارزیابی می شوند.

واژه های راهنما: خودروی خودران، حفظ خط (LK)، روش کنترل پیش بینی مدل (MPC)، زاویه فرمان

علی ریزه‌وندی
دانشجوی دکتری

شهرام آزادی*

دانشیار،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی خواجه
نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

Ali Rizehvandi
PhD Student

Shahram Azadi*
Associate Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, K. N.
Toosi University of
Technology, Tehran,
Iran

Tracking of autonomous vehicle path to perform the lane keeping maneuver using the Adaptive Model Predictive Control (AMPC) method

Abstract: Autonomous vehicles are designed to improve road safety, traffic problems and passenger comfort. For this purpose, lane keeping (LK) systems are important and suitable solutions. The main task of such cars is to predict the activities and goals of pedestrians and other vehicles. This research deals with the implementation of a model to develop the lane keeping (LK) function for an autonomous car. In fact, modeling and lane detection have been done with the automatic driving system toolbox in MATLAB R2022a software, which enables the development of self-driving cars by providing computer vision algorithms. Also, by using the information obtained from the lane detection phase, the necessary path for the lane keeping mechanism will be created. In this research, in order to follow the path, a controller using Model Predictive Control (MPC) theory has been used, so that after calculating the values of the steering angle, the self-driving car will follow the predicted path. Finally, the results of the proposed control method, i.e., the adaptive model predictive control method (AMPC) are verified and evaluated with the results of the proportional-integral-derivative (PID) control method.

Keywords: Autonomous vehicle, Lane keeping, Model predictive control (MPC), Steering angle

۱- مقدمه

بر این اساس شش سطح تعریف شده است، از وضعیتی که در آن همه چیز توسط انسان کنترل می‌شود (سطح ۰) تا اتوماسیون کامل خودرو تحت هر شرایط خاصی از رانندگی (سطح ۵).

جدول ۱ دسته‌بندی سیستم‌های خودران

سطح ۰	نیازمند تسلط و کنترل کامل راننده و فاقد هرگونه تجهیزات کنترل خودکار
سطح ۱	دارای یک یا دو سیستم کنترل هوشمند مانند سیستم کروز کنترل
سطح ۲	دارای دو یا چند سیستم کنترل هوشمند مانند سیستم حفظ مسیر و سیستم کروز کنترل تطبیقی که در کار مشترک با یکدیگر، از دقت مورد نیاز راننده می‌کاهند- مانند سیستم اتوپایلوت تسلا
سطح ۳	در این سطح خودرو به تجهیزاتی مجهز است که این امکان را برای راننده فراهم می‌سازد که در طی زمان مشخصی خودرو را به حال خود رها سازد و خودرو بدون نیاز به راننده به مسیر خود ادامه دهد و سپس راننده در یک موعد مناسب کنترل خودرو را مجدداً به دست گیرد- مانند خودروی لکسوس گوگل
سطح ۴	در این سطح خودرو تمام خودکار بوده که بدون حضور راننده در جاده حرکت کرده و کلیه وظایف رانندگی را بی نیاز از عامل انسانی به‌طور مستقیم انجام می‌دهد.
سطح ۵	در این سطح خودرو کاملاً خودران بوده و دیگر نیازی به تجهیزات رانندگی مانند پدال گاز و فرمان نبوده و راننده عملاً به یک مسافر تبدیل می‌شود.

در سرتاسر جهان، بسیاری از مردم زمان زیادی را صرف رانندگی و فعالیت‌های مرتبط با آن می‌کنند. در واقع تصادفات رانندگی عامل اصلی مرگ و میر و جراحات در اکثر کشورها است. طبق گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیش از ۱ میلیون نفر در جاده‌ها جان خود را به دلیل تصادفات رانندگی از دست می‌دهند. به همین دلیل، در چند سال اخیر بسیاری از تحقیقات دانشگاهی و شرکت‌های خودروسازی بر توسعه سیستم‌های کمک راننده پیشرفته (ADAS) و سطوح مختلف سیستم‌های خودران متمرکز شده‌اند.

با توجه به رصدخانه ایمنی جاده اروپا (ERSO)، سیستم کمک راننده پیشرفته (ADAS) را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: «سیستم‌های ایمنی هوشمند مبتنی بر وسیله نقلیه که می‌تواند ایمنی جاده را از نظر اجتناب از تصادف، کاهش شدت تصادف و حفاظت و مراحل پس از تصادف بهبود بخشد [۱]. در واقع این سیستم را می‌توان به عنوان سیستم‌های یکپارچه درون خودرو تعریف کرد که وظیفه اصلی آن کمک به راننده در هنگام وقوع تصادف می‌باشد.

خودروهای خودران را می‌توان وسایل نقلیه‌ای در نظر گرفت که بدون دخالت انسان، با استفاده از الگوریتم‌های اجرا شده توسط پردازنده برای شبیه‌سازی رفتار راننده و تصمیم‌گیری، وظیفه حمل‌ونقل را انجام می‌دهند. برای دستیابی به خودروهای خودران، نیاز به کسب اطلاعات محیطی از انواع حسگرها مانند لیدار، رادار، دوربین و GPS می‌باشد. الگوریتم‌های ادراک امکان تحقق برنامه‌ریزی مسیر و مرحله کنترل را می‌دهند. آنها عملکردهای مختلفی مانند حفظ خطوط، توقف اضطراری، پارک خودرو و اجتناب از موانع را انجام می‌دهند. این توابع سیگنال لازم را برای محرک‌هایی که به خودروی خودران فرمان می‌دهند، ارائه می‌کنند.

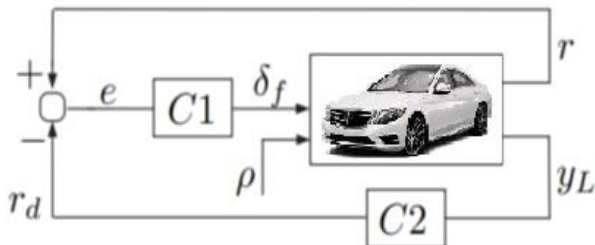
در سال ۲۰۱۴ انجمن مهندسان خودرو (SAE) یک طبقه-بندی را برای سیستم‌های خودران، مطابق جدول (۱) معرفی کرد. طبقه‌بندی بر اساس میزان مسئولیت و دقت مورد نیاز راننده است.

این پژوهش به توسعه عملکردهای تشخیص خط و حفظ خطوط می‌پردازد؛ به طوری که به یک خودروی خودران اجازه می‌دهد تا خط جلوی اتومبیل را تشخیص دهد و یک مسیر خاص تولید شده با اطلاعات محیط جاده را دنبال کند. سیستم رانندگی خودکار با استفاده از نرم افزار متلب و سیمولینک نسخه ۲۰۲۲ پیاده‌سازی شده است و به دو قسمت بلوک تشخیص خط و بلوک کنترل نگهدارنده خط متصل به یکدیگر تقسیم شده است (مطابق شکل (۱)).



شکل ۱ بلوک‌های تشخیص خط و حفظ خط

پارامتر اول توسط یک ژيروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که پارامتر دوم توسط سنسور بینایی محاسبه می‌شود. در حقیقت کنترلر اول برای رد اغتشاشات ثابت و تأثیر تغییرات پارامتر در طول محاسبه زاویه فرمان استفاده، در حالی که کنترلر دوم با هدف کنترل اغتشاشات به کار برده شده است (مطابق با شکل (۲)).



شکل ۲ سیستم کنترلی مورد استفاده در خودروی خودران

بوجاربارو و همکاران حل مسائل مربوط به حفظ خط را با یک کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی پیشنهاد کردند [۱۱]. در این پژوهش کنترلر طولی داده شده و سرعت طولی ثابت در نظر گرفته شده است. به همین دلیل، کار فقط بر روی توسعه کنترل حرکت جانبی خودرو متمرکز شده بود. هدف کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) به حداقل رساندن انحراف جانبی از خط مرکزی و خطای زاویه انحراف خودرو بوده است. به‌طوریکه قیدها به تعدیل زاویه فرمان موجود در سیستم فرمان مربوط می‌شدند. نتایج گویای عملکرد مناسب کنترلر برای سناریوهایی با انحنای شدید در سرعت بالا است. همچنین یک استراتژی کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) غیرخطی برای کنترل فرمان خودروی خودران توسط لیوننت ارائه شد که الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده، زاویه فرمان چرخ جلو را محاسبه کرده و در نهایت تابع هزینه را به حداقل می‌رساند [۱۲].

در این پژوهش از روش کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی (AMPC) برای ردیابی مسیر خودروی خودران جهت انجام مانور حفظ خط استفاده می‌شود؛ به‌طوریکه روش کنترلی پیشنهاد شده به خوبی و به‌طور بهتری نسبت به [۱۲] خودروی خودران را جهت انجام مانور یاد شده، کنترل می‌نماید.

نوآوری مطالعه حاضر نسبت به تحقیقات پیشین، از جمله [۱۲] کنترلر طولی و عرضی همزمان خودروی خودران با استفاده از روش کنترلر پیش‌بینی مدل تطبیقی (AMPC) جهت مانور حفظ خط و در نظر گرفتن انحنای مسیر در هنگام کنترل خودروی خودران همچنین پیاده‌سازی سیستم تشخیص خط با استفاده از جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار (Automated Driving System) در نرم افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ می‌باشد.

در ادامه اطلاعاتی در مورد بلوک کنترلی نگهدارنده خط که در این پژوهش استفاده می‌شود، ارائه خواهد شد. سپس، مدل دینامیکی مورد استفاده برای عملکرد کنترلی معرفی می‌شود و

در شکل (۱) کنترلر نگهدارنده خط از روش کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) برای کنترل عملکرد حفظ خط استفاده می‌کند. به‌طوریکه با کنترلر زاویه فرمان چرخ‌های جلو، سبب می‌شود که خودروی خودران مسیر منحنی را دنبال کند. برای محاسبه زاویه فرمان، کنترلر کننده پیش‌بینی مدل (MPC) تابع هزینه را که انحراف جانبی و زاویه انحراف نسبی را محاسبه می‌کند، به حداقل می‌رساند. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی برای توسعه سیستم حفظ خط انجام شده است.

سیستم حفظ خط نوعی فناوری ایمنی فعال است که به طور پیشگیرانه به راننده کمک می‌کند تا وسیله نقلیه را در مسیر خود نگه دارد [۳]. با حمایت از راننده با وظایف کنترل جانبی، آسایش و ایمنی را ارتقا می‌دهد [۴]. سیستم کمکی حفظ خط (LKAS) با تنظیم فرمان برای نگه داشتن خودرو در خط خود، جابجایی ناخواسته خط را شناسایی می‌کند [۵]. همچنین دوربین به عنوان ورودی حسگر برای LKAS عمل می‌کند و خطوط و ویژگی‌های خطوط را تشخیص می‌دهد. اطلاعات از صحنه رانندگی خودرو مانند افست جانبی، زاویه سمت، انحنای خط و غیره، بازیابی شده و به کنترلر کننده LKAS [۶] ارسال می‌شود. این اطلاعات برای انجام تنظیمات برای حفظ وسیله نقلیه در وسط خط شناسایی شده استفاده می‌شود. ورودی‌های اضافی مانند فعال‌سازی چراغ‌های کناری و فرمان برای جلوگیری از مداخله غیرمجاز وسیله نقلیه بررسی می‌شوند [۷].

همچنین شو و همکاران بر روی یک کنترلر کننده برای پیاده‌سازی یک سیستم حفظ خط با استفاده از تئوری کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) مطالعاتی را انجام دادند [۸]. به‌طوریکه خروجی زاویه فرمان چرخ جلو است که عملکرد کنترلر کننده پیش‌بینی مدل (MPC) را به حداقل می‌رساند. تولید مسیر مرجع بر اساس پنج نقطه پیش‌نمایش از سنسورها انجام می‌گیرد. همچنین یک کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) خطی که سیستم‌های حفظ خط و اجتناب از مانع را برای جاده‌های با انحنای کم تشخیص می‌دهد توسط توری و همکاران ارائه شده است [۹]. کنترلر توسعه یافته در این کار به دو مرحله متوالی تقسیم شده است: مرحله اول پروفیل‌های ترمز یا دریچه گاز را بر اساس افق پیش‌بینی محاسبه می‌کند، سپس در مرحله دوم کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) را با استفاده از مدل‌های خطی متغیر با زمان که توسط پروفیل‌های مرحله اول به دست می‌آید، محقق می‌کند؛ به عبارت دیگر دستورات زاویه فرمان را بر اساس دستور بهینه شکست یا دریچه گاز تخمین می‌زند.

یک رویکرد متفاوت دیگر برای پیش‌بینی یک مسیر برای خودرو خودران توسط مارینو و همکاران در سال ۲۰۰۹ پیشنهاد شد [۱۰]. در این پژوهش به مطالعه یک کنترلر تناسبی-مشتقی-انتگرالی (PID) که از سیستم بینایی استفاده می‌کند پرداخته شد، به‌طوریکه ورودی کنترلر زاویه فرمان چرخ جلو است که بر اساس نرخ انحراف و افست جانبی طراحی شده است.

در این پژوهش، مدل سینماتیکی خودرو به عنوان یک فرمان و فقط چرخ جلو در نظر گرفته شده است؛ بنابراین مقدار زاویه فرمان چرخ عقب یا δ_r صفر در نظر گرفته شده است. همچنین نقطه C در شکل (۳)، مرکز جرم (C.M) خودرو را نشان می‌دهد. فواصل این نقطه تا نقاط A و B به ترتیب با l_f و l_r نشان داده شده است. مجموع این دو عبارت طول خودرو می‌باشد که با L نشان داده می‌شود.

$$L = l_f + l_r$$

از آنجایی که خودرو دارای حرکت مسطح است، سه مختصات برای توصیف حرکت خودرو لازم است: یعنی X، Y و Ψ . مختصات اینرسی مرکز جرم خودرو و Ψ جهت خودرو را نشان داده که به آن زاویه انحراف (یاو) می‌گویند. همچنین بردار V سرعت مرکز جرم خودرو را نشان می‌دهد. این بردار با محور طولی خودرو زاویه β یا زاویه لغزش ایجاد می‌کند. نقطه O مرکز چرخش خودرو است. خط OC نیز همان شعاع مسیر خودرو (R) است و عمود بر بردار سرعت V می‌باشد. معادلات کلی مدل سینماتیکی خودرو را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

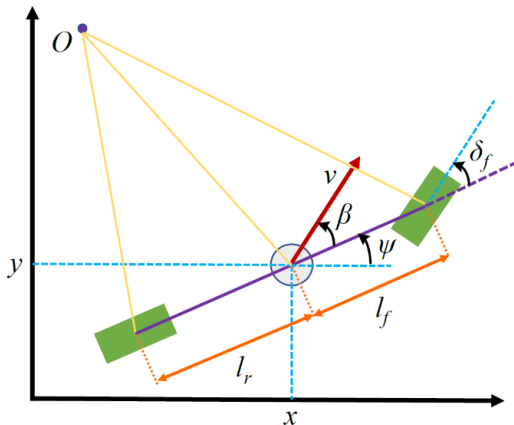
$$\dot{X} = V \cos(\Psi + \beta) \quad (1)$$

$$\dot{Y} = V \sin(\Psi + \beta) \quad (2)$$

$$\dot{\Psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} \tan(\delta_f) \quad (3)$$

۲-۲- مدل دینامیکی خودرو

هنگامی که سرعت خودرو افزایش می‌یابد و انحنای مسیر متناسب با زمان تغییر می‌کند به دلیل ایجاد لغزش‌های جزئی دیگر بردار سرعت هر چرخ با صفحه تقارن چرخ موازی نمی‌باشد.



شکل ۴ مدل دینامیکی خودرو

سپس به تئوری کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) برای اجرای مانور حفظ خط پرداخته می‌شود. پس از آن نحوه شبیه‌سازی مسئله در نرم افزار متلب مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفته و با کنترلر PID مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

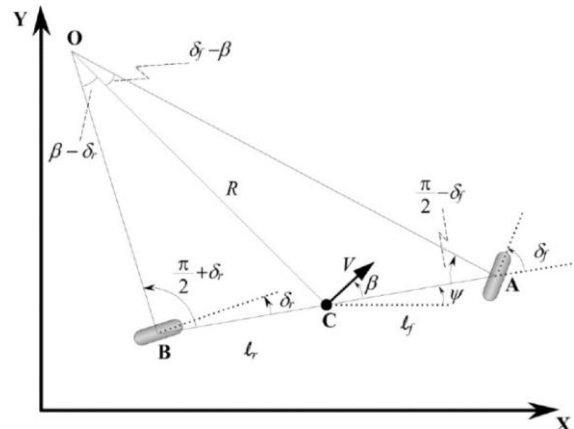
۲- مدل سازی

معرفی دینامیک جانبی خودرو در داخل کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) سبب می‌شود که عملکرد کنترلر با دقت بیشتری برای مانور حفظ خط انجام پذیرد. در واقع در طول طراحی کنترلر پیش‌بینی مدل (MPC) در نظر گرفتن مدل دینامیک خودرو برای انجام مانور رانندگی مستقل و پیش‌بینی دقیق تغییرات حرکت خودرو بسیار مهم و ضروری می‌باشد. از این‌رو در ادامه، هر دو مدل سینماتیکی و دینامیکی خودرو با مفروضات و قیده‌های آن‌ها ارائه می‌شوند.

۲-۱- مدل سینماتیکی خودرو

سینماتیک شاخه‌ای از مکانیک کلاسیک است که حرکت نقاط، اجسام و گروه‌های اجسام را بدون در نظر گرفتن نیروهایی که بر حرکت تأثیر می‌گذارند توضیح می‌دهد. معادلات حرکت توصیف شده توسط یک مدل سینماتیکی صرفاً به روابط هندسی که سیستم را کنترل می‌کنند اشاره دارد. در حقیقت، شروع یک مسئله سینماتیک شامل توصیف هندسه سیستم و تعیین مقادیر اولیه موقعیت، سرعت و شتاب نقاط سیستم می‌باشد.

در این پژوهش مطابق شکل (۳) مدل سینماتیکی برای خودرو در نظر گرفته شده است. این شکل یک مدل دو چرخه را نشان می‌دهد که در آن دو چرخ جلو و دو چرخ عقب به ترتیب با یک تاپر مرکزی در نقاط A و B نشان داده شده‌اند. زاویه فرمان برای چرخ جلو با δ_f نشان داده شده است، در حالی که δ_r زاویه فرمان برای چرخ عقب را نشان می‌دهد.



شکل ۳ مدل سینماتیکی خودرو

با اعمال قانون دوم نیوتن برای حرکت خودرو در امتداد محور y و محور z ، روابط (۷) و (۸) حاصل می‌شوند.

$$m\ddot{e}_1 = 2C_{\alpha f}\delta_f + \dot{e}_1 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f} - \frac{2}{V_x}C_{\alpha r} \right] + \dot{e}_2 \left[2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r} \right] + \dot{e}_2 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r \right] + \dot{\Psi}_{des} \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r \right] \quad (۷)$$

$$I_z\ddot{e}_2 = 2C_{\alpha f}l_f\delta_f + \dot{e}_1 \left[-\frac{2}{V_x}l_fC_{\alpha f} + \frac{2}{V_x}l_rC_{\alpha r} \right] + \dot{e}_2 \left[2C_{\alpha f}l_f + 2C_{\alpha r}l_r \right] + \dot{e}_2 \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f^2 - \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r^2 \right] - I_z\dot{\Psi}_{des} + \dot{\Psi}_{des} \left[-\frac{2}{V_x}C_{\alpha f}l_f^2 + \frac{2}{V_x}C_{\alpha r}l_r^2 \right] \quad (۸)$$

در نهایت، معادلات فضای حالت بر حسب متغیرهای خطا به صورت زیر باز تعریف می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \ddot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \ddot{e}_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} & \frac{0}{m} & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{mV_x} \\ 0 & \frac{0}{m} & \frac{0}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{I_zV_x} & \frac{-2L_fC_{\alpha f} + 2L_rC_{\alpha r}}{I_z} & \frac{2l_f^2C_{\alpha f} + 2l_r^2C_{\alpha r}}{I_zV_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \\ e_2 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2L_fC_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f + \begin{bmatrix} -2C_{\alpha f}l_f + 2C_{\alpha r}l_r - V_x \\ \frac{0}{mV_x} \\ 0 \\ \frac{-2C_{\alpha f}l_f^2 - 2C_{\alpha r}l_r^2}{I_zV_x} \end{bmatrix} \dot{\Psi}_{des} \quad (۹)$$

۳- طراحی کنترلر

در این بخش تئوری روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، ایده اصلی روش کنترل پیش‌بین مدل و معماری مورد استفاده برای خودروهای خودران مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس کنترلر مورد استفاده در این پژوهش مورد تبیین قرار می‌گیرد.

۳-۱- روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)

کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) یک تکنیک پیشرفته است که برای خودکارسازی فرآیندهای کنترل صنعتی با در نظر گرفتن

بنابراین، به جای اتخاذ یک مدل سینماتیکی، یک مدل دینامیکی برای مطالعه حرکت جانبی خودرو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این پژوهش از مدل دو درجه آزادی یا مدل دوچرخه برای بیان دینامیک خودرو (مطابق با شکل ۴) استفاده شده است. همچنین معادلات فضای حالت دینامیک خودرو مطابق زیر می‌باشند:

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mV_x} & 0 & V_x + \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{mV_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2L_fC_{\alpha f} - 2L_rC_{\alpha r}}{I_zV_x} & 0 & \frac{2l_f^2C_{\alpha f} + 2l_r^2C_{\alpha r}}{I_zV_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \Psi \\ \dot{\Psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2L_fC_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} \delta_f \quad (۴)$$

این معادله طبق [۱۱] یک مدل دینامیکی از حرکت جانبی و انحرافی خودرو را با در نظر گرفتن اثرات نیروهای تایلر، جرم خودرو، سرعت طولی و ورودی فرمان را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، معادله (۴) مدل دینامیکی یک خودرو را از نظر حرکت جانبی و انحرافی آن نشان می‌دهد که در آن $C_{\alpha r}$ و $C_{\alpha f}$ به ترتیب نشان‌دهنده سفتی پیچیدگی لاستیک‌های جلو و عقب است. همچنین m جرم خودرو، V_x سرعت طولی خودرو، همچنین L_f و L_r به ترتیب فاصله از مرکز جرم تا محورهای جلو و عقب است.

در این پژوهش، هدف پیاده‌سازی یک سیستم کنترل فرمان با استفاده از روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) برای مانور حفظ خط می‌باشد. بدین منظور، اتخاذ یک مدل دینامیکی برای خودرو بسیار حائز اهمیت است.

حال در ادامه انحراف جانبی e_1 و زاویه انحراف نسبی e_2 ، دوباره مدل‌سازی می‌شوند. به‌منظور تعریف مجدد مدل دینامیکی، سرعت طولی (V_x) و شعاع (R) ثابت در نظر گرفته شده‌اند. شعاع (R) را به‌صورت معکوس انحنای مسیر و همچنین نرخ انحراف خودرو را می‌توان به عنوان تابعی از انحنا مطابق زیر تعریف نمود:

$$\dot{\Psi}_{des} = kV_x \quad (۵)$$

بنابراین شتاب مورد نظر خودرو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{\Psi}_{des} \cdot V_x = kV_x^2 \quad (۶)$$

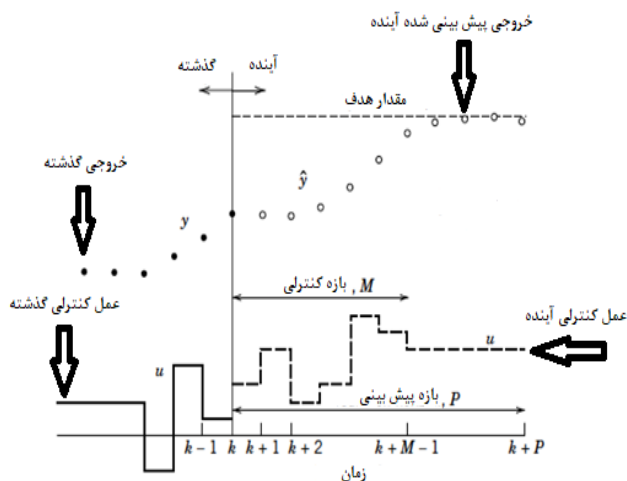
وضعیت خودرو را برای ایجاد شرایط اولیه جدید در هر گام زمانی را ارائه می‌کند. وظیفه سنسورها نیز دادن اطلاعات محیطی مانند مرزهای خطوط و موقعیت موانع می‌باشد.

کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) بر اساس یک افق محدود و با استفاده از یک رویکرد تکراری خروجی بهینه را به خودرو ارسال می‌کند. در واقع هدف اصلی آن محاسبه دنباله‌ای از حرکات کنترلی ناشی از تغییرات ورودی است، به طوری که خروجی پیش‌بینی شده بهینه به سمت نقطه تنظیم میل کند.

مطابق شکل (۶)، y خروجی واقعی، \hat{y} خروجی پیش‌بینی شده و u ورودی قابل تنظیم می‌باشد. در زمان نمونه‌گیری فعلی k ، مقدار اولیه سیستم است و کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مجموعه‌ای از مقادیر ورودی $u(k+i-1)$ ، $i = 1, 2, \dots, M$ را محاسبه می‌کند که در آن M افق کنترلی نامیده می‌شود. در حقیقت، ورودی‌ها طوری محاسبه می‌شوند که مجموعه‌ای از خروجی‌های پیش‌بینی شده $\hat{y}(k+i)$ ، $i = 1, 2, \dots, P$ به صورت بهینه به نقطه تنظیم برسند. P افق پیش‌بینی می‌باشد و شامل تعداد گام‌های پیشرو برای نگاه کردن به آینده است.

معمولاً مقادیر افق کنترلی (M) و افق پیش‌بینی (P) با هم برابرند. در موقعیت‌های عملی، تنها اولین مقدار از کل مجموعه مقادیر P به عنوان ورودی سیستم پیاده‌سازی می‌شود، زیرا مدل فرآیند ساده‌سازی شده و دقیق نیست. علاوه بر این، وجود اغتشاشات را در فرآیند سبب می‌شود بین خروجی واقعی و پیش‌بینی شده خطا ایجاد شود.

به همین دلیل، حالت سیستم باید دوباره سنجیده شود تا به عنوان حالت اولیه برای مرحله بعدی اتخاذ شود. از این رو اطلاعات سیستم با یک بازخورد به بهینه‌ساز دینامیکی کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) گزارش شده و در نهایت سبب مقاوم شدن کنترلر می‌شود [۱۲]. به عبارت دیگر، هنگامی که حالت سیستم مجدداً نمونه‌برداری می‌شود، کل فرآیند محاسبات دوباره با شروع از حالت فعلی جدید مطابق شکل (۶) به‌روزرسانی می‌شود.



شکل ۶ مفهوم روش کنترل پیش‌بین مدل

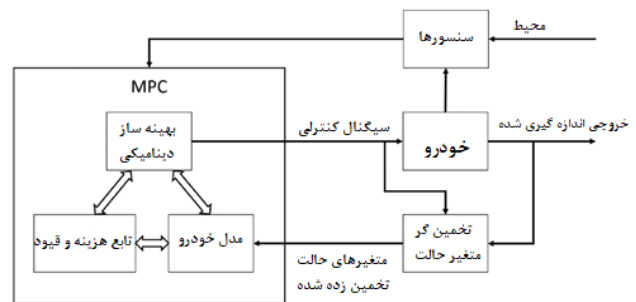
یک سری قیده‌های عملیاتی توسعه یافته است [۹]. کنترل‌کننده‌ای که توسط ریچالت پیاده‌سازی شده است، مدل کنترل ابتکاری پیش‌بینی‌کننده (MPHC) نامیده می‌شود، در حالی که فناوری توسعه‌یافته توسط کاتلر به عنوان کنترل ماتریس پویا (DMC) شناخته می‌شود. در دهه اخیر، استفاده از روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) در زمینه‌های الکترونیک و خودروهای خودران بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

این به این دلیل است که، مزیت اصلی روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) بهینه‌سازی شکاف زمانی فعلی است در حالی که شکاف‌های زمانی آینده نیز در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، روش کنترل پیش‌بینی مدل (MPC) مزایای دیگری را نیز دارد؛ از جمله توانایی پیش‌بینی رویدادهای آینده و امکان انجام اقدامات کنترلی بر اساس آن و همچنین عملکرد بهتر در مسائل زمان واقعی نسبت به روش‌های دیگر.

- اهداف کلی یک کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) عبارتند از:
۱. جلوگیری از نقض قیده‌های ورودی و خروجی.
 ۲. بهینه‌سازی برخی از متغیرهای خروجی، در حالی که خروجی‌های دیگر در یک محدوده مشخص نگهداری می‌شوند.
 ۳. جلوگیری از حرکت بیش از حد متغیرهای ورودی.
 ۴. کنترل متغیرهای فرآیند در هنگام خاموشی یا در دسترس نبودن حسگرها.

سه مرحله اصلی در فرآیند یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) عبارتند از: مدل پیش‌بین، راه حل بهینه‌سازی و اصلاح بازخورد.

ساختار کلی یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مورد استفاده برای خودروی خودران در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل ۵ دیگرام بلوکی روش کنترل پیش‌بین مدل

در این پژوهش روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC) مورد استفاده دارای سه بلوک عملکردی اصلی است: بهینه‌ساز دینامیکی، مدل خودرو، تابع هزینه و قیده‌ها.

در این تحقیق خروجی کنترلر زاویه فرمان چرخ جلو بوده که ورودی کنترلی می‌باشد. همچنین وظیفه بهینه‌ساز دینامیکی، یافتن ورودی بهینه‌ای است که حداقل مقدار تابع هزینه را برآورده سازد. مدل خودرو نیز همان مدل دینامیکی خودرو است که در بخش قبل توضیح داده شد. همچنین برآوردگر حالت،

۳-۲- پیاده‌سازی روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)

کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) پیشنهاد شده در این پژوهش مبتنی بر روش بهینه‌سازی چند مرحله‌ای و تصحیح بازخورد می‌باشد.

هدف کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) محاسبه زاویه فرمان بهینه برای انجام مانور حفظ خط می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، کنترلر، زاویه فرمان را با کمینه‌کردن تابع هزینه محاسبه می‌کند. مدل خطی توسعه‌یافته در کنترلر روش کنترل پیش‌بین مدل (MPC)، سرعت طولی را ثابت فرض می‌کند. به همین دلیل، کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) برای تبدیل شدن به یک کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) تطبیقی، اصلاح شده تا بتواند مدل را به‌روزرسانی کرده، خروجی را پیش‌بینی و زاویه فرمان بهینه را در هر نمونه زمانی محاسبه نماید.

در واقع مسئله کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) به دو بخش تقسیم می‌شود:

- معادلات ریاضی مسئله: که در آن توضیح داده شده که چگونه مسئله کنترل پیش‌بین مدل (MPC) فرموله شده است.
- پیش‌بینی خروجی: که در آن نحوه محاسبه خروجی پیش‌بینی شده تعریف شده است. مدل فضای حالت کنترلر پیش‌بین مدل (MPC) مطابق ذیل می‌باشد:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(x) + B_1 u(k) + B_2 v(k) \\ z(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (10)$$

که A, B_1, B_2 و C به ترتیب ماتریس‌های حالت، ورودی و خروجی می‌باشند. ورودی‌ها عبارتند از: u و v که u زاویه فرمان خودرو (δ) است (ورودی کنترل شده)، در حالی که v حاصلضرب سرعت طولی در انحنای به‌دست آمده از سیستم تشخیص خط را نشان می‌دهد. در این پژوهش، سرعت طولی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین خروجی Z مربوط به انحراف جانبی e_1 و زاویه انحراف نسبی e_2 می‌باشد.

با توجه به مدل خطی تعریف شده در معادله (۱۰)، الگوریتم کنترل پیش‌بین مدل در واقع حل مسئله بهینه‌سازی زیر (۱۱) در هر مرحله زمانی می‌باشد:

$$\begin{aligned} \min_u J &= \sum_{j=0}^N \|Z(k+j|k)\|_{R_{zz}} \\ &\quad + \|u(k+j|k)\|_{R_{uu}} \\ \text{s.t. } x(k+j+1|k) &= Ax(k+j|k) + B_1 u(k+j|k) + B_2 v(k+j|k) \\ x(k|k) &= x(k) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} z(k+j|k) &= Cx(k+j|k) \\ |u(k+j|k)| &\leq u_m \end{aligned}$$

این مسئله بهینه‌سازی در واقع به یافتن مقدار ورودی u می‌پردازد تا مجموع مقادیر وزنی بردار خروجی پیش‌بینی شده Z و بردار ورودی u را برای افق پیش‌بینی تعریف شده N به حداقل برساند.

بردار وزنی Z به صورت زیر (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\|Z(k+j|k)\|_{R_{zz}} = [z_1 \ z_2] \begin{bmatrix} r_{11} & 0 \\ 0 & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آن وزن‌های r_{11} و r_{22} تنظیم شده‌اند تا میرایی لازم را در خروجی مربوطه فراهم کنند.

پیش‌بینی خروجی

مقادیر خروجی پیش‌بینی شده $z(k+j|k)$ ، $j = 1, 2, \dots$ ، N ، که در آن N افق پیش‌بینی است با استفاده از مدل فضای حالت خطی طبق رابطه (۱۰) محاسبه شده‌اند. برای انجام محاسبات، مقادیر زیر باید شناخته شود:

- خروجی فعلی $z(k|k) = z(k)$
- ورودی اعمال شده $u(k|k) = u(k)$
- مقادیر ورودی پیش‌بینی شده $v(k+j|k)$ ، $j = 0, 1, 2, \dots, N$.

متغیرهای حالت پیش‌بین به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} x(k+1|k) &= Ax(k) + B_1 u(k|k) + B_2 v(k|k) \\ x(k+2|k) &= Ax(k+1|k) + B_1 u(k+1|k) + B_2 v(k+1|k) \\ &= A^2 x(k) + AB_1 u(k|k) + AB_2 v(k|k) + B_1 u(k+1|k) + B_2 v(k+1|k) \\ &\vdots \\ x(k+N|k) &= Ax(k+N-1|k) + B_1 u(k+N-1|k) + B_2 v(k+N-1|k) \\ &= A^N x(k) + A^{N-1} B_1 u(k|k) + A^{N-1} B_2 v(k|k) + A^{N-2} B_1 u(k+1|k) + A^{N-2} B_2 v(k+1|k) + \dots + B_1 u(k+N-1|k) + B_2 v(k+N-1|k) \end{aligned} \quad (13)$$

همچنین معادلات خروجی پیش‌بین مطابق (۱۴) می‌باشند:

$$\begin{aligned} z(k|k) &= Cx(k) \\ z(k+1|k) &= Cx(k+1|k) \\ z(k+2|k) &= Cx(k+2|k) \\ &\vdots \\ z(k+N|k) &= Cx(k+N|k) \end{aligned} \quad (14)$$

برای اینکه رابطه بین معادلات (۱۳) و (۱۴) واضح‌تر شود، خروجی پیش‌بینی آینده را می‌توان به صورت رابطه (۱۵) تعریف کرد:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ CB_2 & 0 & 0 & \dots \\ CAB_2 & CB_2 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-1}B_2 & CA^{N-2}B_2 & CA^{N-3}B_2 & \dots \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$Z(k) = Gx(k) + HU(k) + EV(k) \quad (15)$$

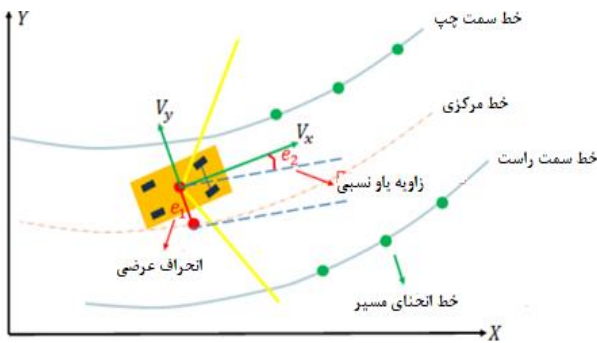
که $Z(k)$ بردار افزوده شده خروجی‌های پیش‌بینی شده، $U(k)$ بردار افزوده شده ورودی‌های آینده و $V(k)$ بردار افزوده شده اغتشاشات پیش‌بینی شده می‌باشند. بردارهای مذکور مطابق ذیل (۱۶) تعریف می‌شوند:

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این پژوهش، عامل (خودروی خودران) مجهز به سیستم کمکی حفظ خط (LKA) و همچنین حسگر دوربین است که انحراف جانبی و زاویه انحراف نسبی بین خط مرکزی و خودروی خودران را اندازه‌گیری می‌کند. این سنسور همچنین انحنای خط و مشتق انحنای را نیز اندازه‌گیری می‌کند. بسته به طول منحنی که سنسور مشاهده می‌کند، انحنای جلوی خودروی خودران را میتوان از انحنای فعلی و مشتق انحنای محاسبه کرد. در حقیقت سیستم حفظ خط (LKA) با تنظیم زاویه فرمان جلویی خودروی خودران، آن را در امتداد خط مرکزی در جاده حفظ می‌کند.

$$Z(k) \equiv \begin{bmatrix} z(k|k) \\ z(k+1|k) \\ \vdots \\ z(k+N|k) \end{bmatrix}; \quad U(k) \equiv \begin{bmatrix} u(k|k) \\ u(k+1|k) \\ \vdots \\ u(k+N|k) \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad V(k) \equiv \begin{bmatrix} v(k|k) \\ v(k+1|k) \\ \vdots \\ v(k+N|k) \end{bmatrix} \quad (16)$$

همچنین ماتریس‌های E و H, G مطابق (۱۷) می‌باشند:

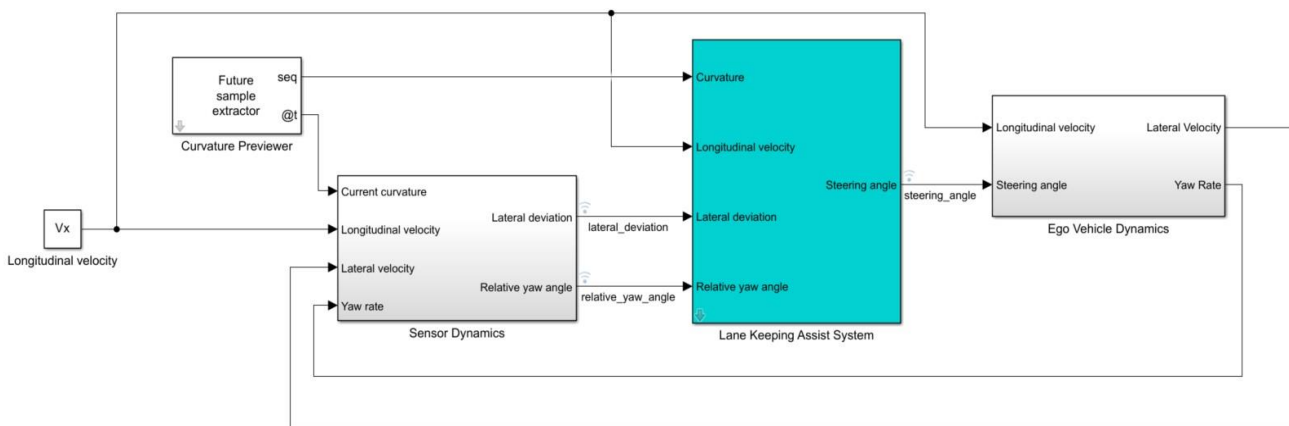


شکل ۷ هندسه حاکم بر مساله

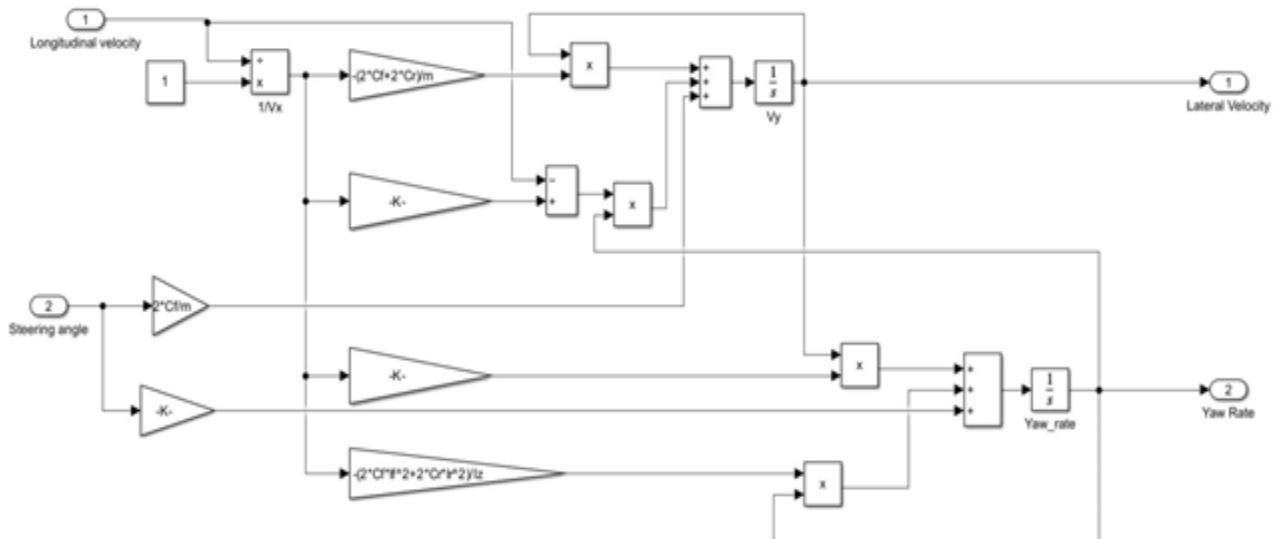
$$G = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix}; \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB_1 & CB_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ CA^{N-1}B_1 & CA^{N-2}B_1 & CA^{N-3}B_1 & \dots & CB_1 \end{bmatrix}$$

دیاگرام بلوکی سیستم حفظ خط در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد. همچنین دیاگرام بلوکی سیستم دینامیکی خودرو (مدل دوچرخه) مطابق شکل (۹) می‌باشد.

در حقیقت هدف سیستم حفظ خط (LKA)، صفر شدن انحراف جانبی و تغییرات زاویه انحراف می‌باشد.



شکل ۸ دیاگرام بلوکی سیستم حفظ خط



شکل ۹ مدل دینامیکی ۲ درجه آزادی خودرو

در مطالعه حاضر، دینامیک طولی خودرو از دینامیک عرضی جدا شده است. بنابراین سرعت طولی ثابت فرض می‌شود. در حقیقت بلوک سیستم کمک راننده حفظ خط (Lane Keeping Assist System) برای کنترل دینامیک عرضی خودرو استفاده شده است.

بلوک مدل‌سازی سنسور (Sensor Dynamics) نیز انحراف جانبی و تغییرات زاویه انحراف را خروجی می‌دهد. دینامیک انحراف جانبی به صورت $\dot{e}_1 = V_x e_2 + V_y$ می‌باشد. دینامیک تغییرات زاویه انحراف نیز به صورت $\dot{e}_2 = r - V_x k$ است که k نشان‌دهنده انحنا می‌باشد که انحنای استفاده شده در این پژوهش بر اساس مانور تغییر خط دوگانه شبیه‌سازی شده است.

سیستم حفظ خط در محیط سیمولینک با استفاده از بلوک سیستم حفظ خط (LKA) مدل‌سازی شده است. ورودی‌های بلوک سیستم حفظ خط (LKA) عبارتند از:

- انحنای پیش‌نمایش شده (از تشخیص‌های خط)
- سرعت طولی عامل
- انحراف جانبی (از تشخیص خط)
- زاویه انحراف نسبی (از تشخیص خط)

خروجی سیستم سیستم حفظ خط (LKA) نیز زاویه فرمان چرخ‌های جلوی خودروی خودران می‌باشد.

نمودارهای سرعت جانبی، تغییرات زاویه انحراف و زاویه فرمان در مدت زمان ۵۰ ثانیه با استفاده از دو روش کنترلی کنترل پیش‌بین مدل (MPC) و تناسبی- مشتقی- انتگرالی (PID) به ترتیب در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده می‌باشند.

مطابق شکل (۱۱) عملکرد کنترلر AMPC در کنترل خودروی خودران در مانور حفظ خط بسیار بهتر از کنترل‌کننده

همانطور که گفته شد، برای توصیف دینامیک جانبی خودرو، در این پژوهش از مدل دو درجه آزادی خودرو (مطابق شکل ۴) با پارامترهای زیر استفاده شده است. مقادیر عددی مدل دینامیکی خودرو در جدول (۲) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲ مقادیر عددی مدل دینامیکی خودرو

مقدار	نماد	پارامتر
۱۵۸۰ kg	m	جرم کلی خودرو
۲۸۸۵ kgm ²	I _z	ممان اینرسی خودرو
۱/۲ m	l _f	فاصله طولی مرکز ثقل تا لاستیک‌های جلو
۱/۶ m	l _r	فاصله طولی مرکز ثقل تا لاستیک‌های عقب
۱۹۰۰۰ N/rad	C _f	سختی پیچشی لاستیک‌های جلو
۳۳۰۰۰ N/rad	C _r	سختی پیچشی لاستیک‌های عقب

در این پژوهش متغیرهای حالت، سرعت جانبی (V_y) و تغییرات زاویه انحراف (dr/dt) بوده، همچنین متغیر ورودی زاویه فرمان چرخ جلو (δ_f) و متغیرهای خروجی همان متغیرهای حالت می‌باشند.

پارامترهای کنترلر و مقادیر قیود نیز به این صورت انتخاب شده‌اند که مقادیر مینیمم و ماکزیمم زاویه فرمان به ترتیب ۰.۲۶ - ۰.۲۶ می‌باشند. و زمان نمونه‌گیری ۰/۱ ثانیه و بازه پیش‌بینی ۱۰ استپ زمانی می‌باشند.

زمان بهینه کند که منجر به بهبود عملکرد در مقایسه با فرآیند تنظیم اکتشافی که معمولاً برای کنترل کننده PID استفاده می‌شود، می‌شود. عملکرد مناسب کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی یا AMPC در کنترل نرخ زاویه یاو خودروی خودران و زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران ناشی از همین موضوع می‌باشد. شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) گویای عملکرد خوب و پربازده کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) طراحی شده می‌باشد که سبب کنترل پایدار خودروی خودران در مانور طراحی شده حفظ خط شده‌اند. به‌طوریکه هر سه پارامتر سرعت عرضی، نرخ زاویه یاو و زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران در روش کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) نسبت به روش تناسبی- مشتقی- انتگرالی (PID) بهتر کنترل شده‌اند و خودروی خودران مانور حفظ خط را بهتر و با کارایی بهتر انجام داده است.

۶- نتیجه‌گیری

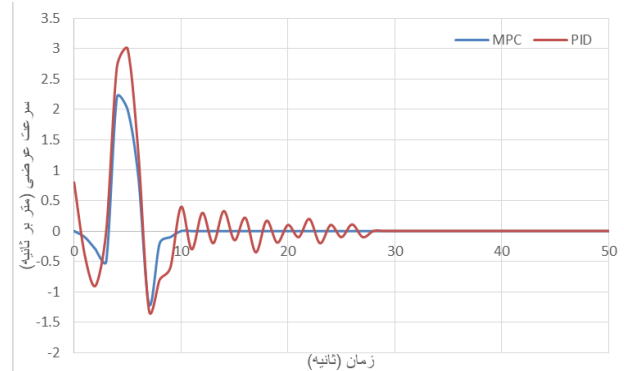
در این پژوهش سیستمی توسعه یافته برای انجام وظیفه تشخیص خط و حفظ خط برای خودروهای خودران ارائه شده است.

عملکرد سیستم تشخیص خط توسعه یافته در چهار مرحله تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از: پیش پردازش، تشخیص خط، تولید مسیر و محاسبه پارامترهای دینامیکی مدل خودرو. برای پیاده سازی سیستم تشخیص خط از جعبه ابزار سیستم رانندگی خودکار (Automated Driving System) در نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۲۲ استفاده شده است.

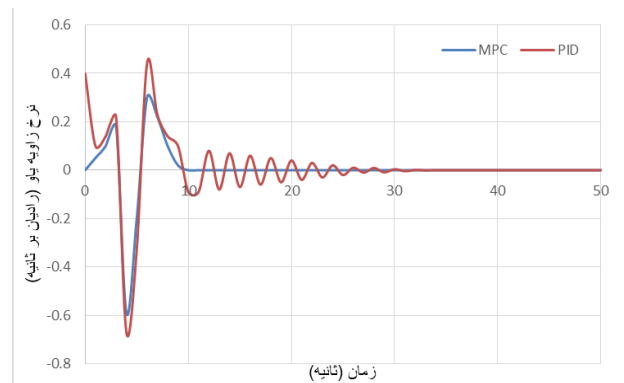
این جعبه ابزار یک روش مدرن است که قادر به انجام تشخیص خط پربازده و کم هزینه از نظر محاسباتی و زمانی بوده که با همه نوع دوربین نیز کار می‌کند. سیستم دیگری که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، سیستم حفظ خط می‌باشد. این عملکرد با استفاده از یک کنترل کننده پیش‌بین مدل (MPC) تطبیقی که قادر به کنترل دینامیک جانبی خودرو می‌باشد، پیاده‌سازی شده است. همچنین مدل ریاضی خودرو بر حسب خطای جاده محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی گویای عملکرد بسیار خوب و پربازده کنترلر پیش‌بین مدل تطبیقی (AMPC) نسبت به کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتقی (PID) در مانور حفظ خط می‌باشد.

برای تحقیقات آینده می‌توان مدل کلی را با یک شبیه‌ساز آزمایش کرد به‌طوریکه تصاویر ورودی را ارائه کرده و محیط واقعی جاده را شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این، به منظور غلبه بر محدودیت عملکرد تشخیص خط می‌توان با ایجاد ترکیب سنسور

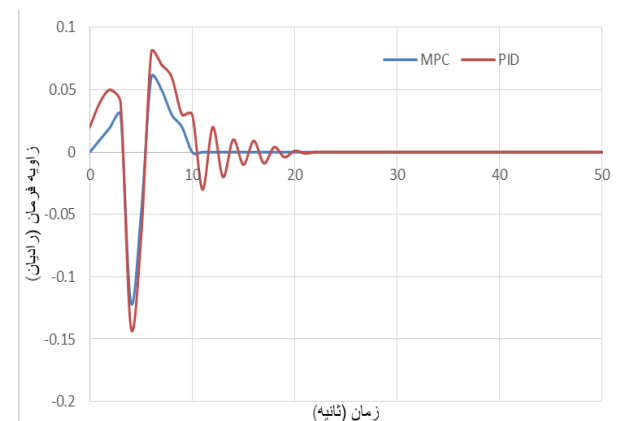
PID است که این امر ناشی از قابلیت‌های پیش‌بینی، استحکام در برابر اغتشاشات و رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی کنترلر AMPC است که سبب عملکرد برتر آن در کنترل سرعت جانبی خودرو در مقایسه با کنترلر کننده PID شده است.



شکل ۱۱ سرعت عرضی خودروی خودران



شکل ۱۲ نرخ زاویه یاو خودروی خودران



شکل ۱۳ زاویه فرمان چرخ‌های جلو خودروی خودران

با توجه به اینکه روش کنترل پیش‌بین مدل تطبیقی یا AMPC مسئله کنترلی را به عنوان یک روند بهینه‌سازی فرموله می‌کند، جایی که ورودی‌های کنترل با حل یک مسئله بهینه‌سازی مشروط به دینامیک، قیدها و اهداف عملکرد سیستم محاسبه می‌شوند. این رویکرد مبتنی بر بهینه‌سازی به MPC اجازه می‌دهد تا به طور سیستماتیک اقدامات کنترلی را در طول

Applications (PESA), IEEE, pp. 1–5, 2017, <https://doi.org/10.1109/PESA.2017.8277758>.

[9] V. Turri, A. Carvalho, H. E. Tseng, K. H. Johansson, and F. Borrelli, “Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads,” *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, The Hague, The Netherlands, pp. 378–383, Oct. 2013, <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728261>.

[10] R. Marino, S. Scalzi, G. Orlando, and M. Netto, “A nested PID steering control for lane keeping in vision-based autonomous vehicles,” *Proceedings of the 2009 Conference on American Control Conference*, St. Louis, Missouri, USA, pp. 2885–2890, 2009, <https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160343>.

[11] M. Bujarbaruah, X. Zhang, H. E. Tseng, and F. Borrelli, “Adaptive MPC for autonomous lane keeping,” *14th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, Beijing, China, Jul. 2018, arXiv:1806.04335.

[12] R. C. Rafaila and G. Livint, “Nonlinear model predictive control of autonomous vehicle steering,” *19th International Conference on System Theory, Control, and Computing (ICSTCC)*, Cheile Gradistei, Romania, pp.466–471, Oct. 2015, <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2015.7321337>.

[13] MATLAB, “Visual perception using monocular camera,” [Online], 2018. Available: <https://it.mathworks.com/help/driving/examples/visual-perception-using-monocular-camera.html>.

[14] “Focal length definition,” [Online]. Available: http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine_c/Chapter_44.html, Verified: 25/09/2018.

[15] “Principal point definition,” [Online]. Available: http://www.pcigeomatics.com/geomatica-help/concepts/orthoengine_c/Chapter_45.html, Verified: 25/09/2018.

[16] MATLAB, “Single Camera Calibrator App,” [Online], 2018. Available: <https://it.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>.

[17] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, 2000, <https://doi.org/10.1109/34.888718>.

[18] J. Heikkila and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” *IEEE International Conference on*

دوربین با حسگرهای دیگر مثل لیدار، رادار و ... تشخیص در سناریوهای پیچیده‌تر بهبود یابد. همچنین از سایر سیستم‌های تشخیص مانند تشخیص وسایل نقلیه، عابران پیاده، علائم راهنمایی و رانندگی جهت تشخیص محیط رانندگی نزدیک به شرایط واقعی استفاده نمود.

۷- مراجع

[1] European Road Safety Observatory (ERSO), “Advanced driver assistance systems,” European Commission, 2018, [Online]. Available: www.erso.eu.

[2] A. Assidiq, O. Khalifa, R. Islam, and S. Khan, “Real time lane detection for autonomous vehicles,” *ICCCE 2008: International Conference on*, pp. 82–88, 2008, <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2008.4580573>.

[3] X. Xu, J. W. Grizzle, P. Tabuada, and A. D. Ames, “Correctness guarantees for the composition of lane keeping and adaptive cruise control,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 1216–1229, Jul. 2018, <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2760863>.

[4] S. Dai and X. Koutsoukos, “Safety analysis of integrated adaptive cruise and lane keeping control using multi-modal port-Hamiltonian systems,” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 35, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.nahs.2019.100816>.

[5] J. Liang, Y. Yang, X. Zhu, and K. Sheng, “Realization of emergency lane keeping system by adaptive control based on the finite state machine,” *Proceedings of the 5th CAA International Conference on Vehicular Control Intelligence (CVCI)*, pp. 1–6, Oct. 2021, <https://doi.org/10.1109/CVCI54083.2021.9661249>.

[6] S. Xu, H. Peng, P. Lu, M. Zhu, and Y. Tang, “Design and experiments of safeguard protected preview lane keeping control for autonomous vehicles,” *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 29944–29953, 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972329>.

[7] C. Sentouh, A.-T. Nguyen, M. A. Benloucif, and J.-C. Poupieul, “Driver-automation cooperation-oriented approach for shared control of lane keeping assist systems,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 27, No. 5, pp. 1962–1978, Sep. 2019, <https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2842211>.

[8] Y. Xu, B. Y. Chen, X. Shan, W. H. Jia, Z. F. Lu, and G. Xu, “Model predictive control for lane keeping system in autonomous vehicles,” *International Conference on Power Electronics Systems and*

[20] S. Urban, J. Leitloff, and S. Hinz, "Improved wide-angle, fisheye, and omnidirectional camera calibration," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 108, pp. 72–79, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.06.006>.

Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>.

[19] D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart, "A toolbox for easy calibrating omnidirectional cameras," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China, Oct. 7–15, 2006, <https://doi.org/10.1109/IROS.2006.282372>.