

یادگیری عمیق در خودرو های خودران: بررسی جامع پیشرفت‌ها، چالش‌ها و روندهای نوظهور در ادراک، تصمیم گیری و امنیت

محمد مهدی باستانی نجف آبادی^۱، نسیم نورافزا^۲، علیرضا نیکیان^۳

^۱ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ mohammadmahdibastani@gmail.com

^۲ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ noorafza@iau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ nikian_a@iau.ac.ir

چکیده

این مقاله به بررسی جامع تحولات صنعت حمل‌ونقل با محوریت خودروهای خودران (AVs) می‌پردازد و بر نقش محوری یادگیری عمیق (DL - Deep Learning) در پیشبرد این فناوری تأکید می‌کند. با تحلیل چگونگی استفاده از یادگیری عمیق در ادراک محیط، تصمیم‌گیری و کنترل خودرو، مقاله به قابلیت‌های بی‌نظیر این سیستم‌ها در تشخیص اشیاء، درک صحنه، پیش‌بینی رفتار و برنامه‌ریزی حرکت اشاره می‌کند. همچنین، چالش‌های اساسی پیش روی توسعه و استقرار گسترده خودروهای خودران، از جمله امنیت سایبری و حملات مخرب، مسائل اخلاقی و حریم خصوصی، ایمنی فنی و پذیرش عمومی، و محدودیت‌های محاسباتی و تصمیم‌پذیری مدل‌ها، مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه، رویکرد رانندگی End-to-End (E2E) به عنوان یک جایگزین نوین برای معماری‌های ماژولار سنتی معرفی می‌شود که ورودی‌های حسی را مستقیماً به خروجی‌های کنترلی نگاشت می‌کند. مقاله به روش‌های یادگیری در E2E (مانند یادگیری تقلیدی و تقویتی) و اهمیت ایمنی و قابلیت توضیح‌پذیری در این سیستم‌ها می‌پردازد. در نهایت، نقش سیستم‌های منبع‌باز در تسریع تحقیقات و توسعه خودروهای خودران تحلیل می‌شود. مقاله با اشاره به روندهای نوظهور (مانند یادگیری پایدار و مدل‌های زبان و بینایی بزرگ) و چالش‌های باقی‌مانده، بر ضرورت همکاری‌های بین‌رشته‌ای، استانداردسازی و نوآوری مستمر برای تحقق آینده حمل‌ونقل خودران تأکید می‌کند.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، صنعت حمل‌ونقل با تحولات بنیادین مواجه شده است که محور اصلی آن توسعه و گسترش خودروهای خودران^۱ است. خودروهای خودران با اتکا به هوش مصنوعی^۲، یادگیری ماشین^۳ و به‌ویژه یادگیری عمیق^۴ توانسته‌اند شیوه‌های سنتی رانندگی را دگرگون کنند و چشم‌انداز جدیدی برای آینده حمل‌ونقل ترسیم نمایند. این فناوری‌ها نه تنها به افزایش ایمنی جاده‌ها و کاهش خطاهای انسانی—که عامل اصلی بخش عمده‌ای از تصادفات رانندگی هستند، کمک می‌کنند، بلکه فرصت‌های گسترده‌ای را در زمینه‌های افزایش بهره‌وری ترافیک، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، کاهش آلودگی هوا، بهبود کیفیت زندگی افراد بدون توان رانندگی و تحول صنایع حمل‌ونقل و لجستیک فراهم می‌سازند. پیش‌بینی می‌شود که ارزش بازار جهانی خودروهای خودران تا سال ۲۰۲۶ به بیش از ۶۱۵ میلیارد دلار برسد که نشان‌دهنده اهمیت اقتصادی و استراتژیک این صنعت نوظهور است.

ایده خودروهای خودران پیشینه‌ای نزدیک به یک قرن دارد و در دهه‌های اخیر با پروژه‌های پیشگامی چون NavLab دانشگاه کارنگی ملون و پروژه پرومته مرسدس به بلوغ اولیه رسید. با این حال، آنچه این فناوری را در سال‌های اخیر به شکوفایی رسانده است، همگرایی پیشرفت‌های سخت‌افزاری (نظیر حسگرهای پیشرفته، محاسبات لبه و ارتباطات بی‌سیم) با پیشرفت‌های نرم‌افزاری به‌ویژه در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری عمیق است. این هم‌افزایی امکان ادراک پیچیده

^۱ Autonomous Vehicles - AVs

^۲ Artificial Intelligence - AI

^۳ Machine Learning - ML

^۴ Deep Learning - DL

محیطی، تصمیم‌گیری هوشمند و کنترل دقیق خودرو را در شرایط گوناگون فراهم آورده است. خودروهای خودران از سطوح مختلف اتوماسیون (سطوح ۰ تا ۵) بهره می‌برند و این سطوح، مسیر تکامل تدریجی این فناوری را از سیستم‌های کمک‌راننده ابتدایی تا خودروهای کاملاً مستقل تبیین می‌کنند. در این میان، یادگیری عمیق نقشی محوری در پیشبرد قابلیت‌های خودروهای خودران ایفا می‌کند. شبکه‌های عصبی عمیق به سیستم‌های خودران این امکان را می‌دهند که از داده‌های چندحسی (چند مدل) برای تشخیص اشیاء^۵، درک صحنه^۶، پیش‌بینی رفتار سایر وسایل نقلیه^۷ و تصمیم‌گیری بلادرنگ^۸ بهره ببرند. این توانمندی‌ها، نه تنها ایمنی و کارایی رانندگی را افزایش داده‌اند، بلکه افق‌های تازه‌ای برای تحقق رانندگی خودکار انتها به انتها^۹، کاهش وابستگی به مداخله انسانی و توسعه سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند شهری و بین‌شهری گشوده‌اند. با وجود این پیشرفت‌ها، خودروهای خودران همچنان با چالش‌ها و مسائل اساسی مواجه هستند. مشکلاتی نظیر حملات مخرب به مدل‌های یادگیری ماشین^{۱۰}، چالش‌های امنیت سایبری و حفاظت از حریم خصوصی، مسائل اخلاقی و حقوقی، پذیرش اجتماعی و اعتماد عمومی، و همچنین محدودیت‌های محاسباتی و مسئله تعمیم‌پذیری مدل‌ها از جمله موانع کلیدی در مسیر توسعه و پذیرش گسترده این فناوری هستند. افزون بر این، پیچیدگی محیط‌های واقعی، تنوع سناریوهای رانندگی و تفاوت‌های فرهنگی و قانونی در نقاط مختلف جهان، لزوم توجه به ابعاد چندانکه این فناوری را برجسته می‌سازد.

شکل ۱: ساختار کلی سیستم خودرو خودران

Autonomous Vehicle System



نمایی سطح بالا از معماری ماژولار یک خودرو خودران که جریان پردازش اصلی را از ادراک محیط، تصمیم‌گیری، برنامه‌ریزی مسیر تا کنترل سطح پایین وسیله نقلیه نشان می‌دهد.

با توجه به سرعت بالای تحولات فناوری و گستردگی چالش‌ها و فرصت‌ها، مقاله با هدف ارائه یک بررسی جامع و به‌روز به تحلیل نقش یادگیری عمیق در ادراک، تصمیم‌گیری، ایمنی و امنیت خودروهای خودران می‌پردازد. در ادامه، با مرور دقیق آخرین پیشرفت‌ها، تحلیل چالش‌های موجود و بررسی روندهای نوظهور، تلاش می‌شود تصویری شفاف از وضعیت فعلی و مسیرهای آینده این حوزه ارائه گردد. امید است این مطالعه بتواند به محققان، توسعه‌دهندگان، سیاست‌گذاران و صنعتگران کمک کند تا با درک بهتر این فناوری، به پیشبرد ایمن، کارآمد و اخلاق‌مدار آن یاری رسانند.

۱- یادگیری عمیق در خودروهای خودران

در سال‌های اخیر، یادگیری عمیق، به عنوان شاخه‌ای کلیدی از هوش مصنوعی، صنعت خودروهای خودران را متحول کرده است. این فناوری، با الهام از ساختار مغز انسان، توانسته است چالش‌های اصلی ادراک، تصمیم‌گیری و کنترل در این سیستم‌ها را کاهش داده و دقت و کارایی آن‌ها را به طرز چشمگیری افزایش دهد. قابلیت بی‌نظیر در پردازش حجم عظیمی از داده‌های پیچیده و بدون ساختار (حاصل از حسگرهایی مانند دوربین‌ها، رادارها، و لیدارها)، دلیل اصلی کاربرد گسترده آن است؛ این قابلیت خودروها را قادر می‌سازد تا اشیاء، علائم جاده‌ای، خطوط مسیر، و رفتار سایر کاربران جاده را شناسایی و پیش‌بینی کنند.

۱-۱- کاربردهای محوری یادگیری عمیق

یادگیری عمیق در چندین حوزه حیاتی خودروهای خودران به کار می‌رود. این فناوری، با فراهم آوردن قابلیت درک صحنه^{۱۱}، امکان شناسایی و طبقه‌بندی دقیق اشیاء، علائم رانندگی، و خطوط جاده را فراهم می‌کند که به بهبود ایمنی کمک شایانی می‌کند. علاوه بر این، در بخش

- ° Object Detection
- ⁶ Scene Understanding
- ⁷ Behavior Prediction
- ⁸ Real-Time Decision-Making
- ⁹ End-to-End
- ¹⁰ Adversarial Attacks
- ¹¹ Perception

تصمیم‌گیری، یادگیری عمیق به پیش‌بینی رفتار سایر خودروها، انتخاب مانورهای مناسب (مانند تغییر لاین یا سبقت)، و مدیریت عبور از تقاطع‌ها یاری می‌رساند. در حوزه برنامه‌ریزی حرکت و کنترل^{۱۲}، از مدل‌های یادگیری عمیق برای پیش‌بینی مسیر و کنترل حرکات خودرو استفاده می‌شود، که شامل سیستم‌های انتها به انتها نیز می‌شود که ورودی‌های حسی را مستقیماً به دستورات رانندگی تبدیل می‌کنند. از دیگر کاربردها می‌توان به رفتار اجتماعی^{۱۳} اشاره کرد که با تحلیل قصد و رفتار کاربران جاده، خودروها تعاملات طبیعی‌تری خواهند داشت.

همچنین، در ناوبری و نقشه‌برداری^{۱۴}، تحلیل داده‌های حسگرها با استفاده از یادگیری عمیق، موقعیت‌یابی دقیق‌تر و به‌روزرسانی نقشه‌ها در زمان واقعی را ممکن می‌سازد.

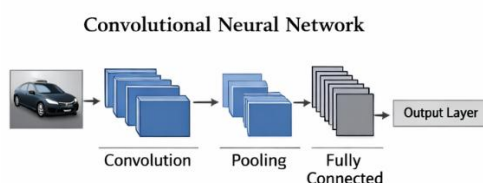
در نهایت، ارتباطات^{۱۵}، شامل پردازش داده‌های ارتباطی خودرو با زیرساخت^{۱۶} یا خودرو با خودرو^{۱۷}، به بهبود ایمنی و هماهنگی ترافیکی کمک می‌کند.

۲-۱- ادراک محیط: حسگرها و ادغام آن‌ها

ادراک محیط، پایه و اساس عملکرد خودروهای خودران است. شبکه‌های عصبی پیچشی^{۱۸} در تشخیص و طبقه‌بندی اشیاء، بخش‌بندی معنایی و محلی‌سازی آن‌ها نقش محوری دارند. الگوریتم‌هایی مانند YOLO، SSD، و R-CNN دقت و سرعت بالایی در این زمینه ارائه می‌دهند. تشخیص سه‌بعدی اشیاء نیز با بهره‌گیری از داده‌های LiDAR امکان‌پذیر است.

برای درک دقیق محیط، استفاده از حسگرهای متنوع (دوربین‌ها، LiDAR، رادار، حسگرهای تراسونیک، GPS و IMU) ضروری است. ادغام داده‌های چندحسگر با کمک یادگیری عمیق، دقت و پایداری سیستم‌های ادراک را افزایش می‌دهد؛ این ادغام می‌تواند در سطوح ورودی، ویژگی یا تصمیم انجام شود که منجر به کاهش خطاها می‌شود.

شکل ۲: معماری یادگیری عمیق برای وظایف ادراکی



نمونه‌ای از معماری یادگیری عمیق که به طور گسترده در بخش ادراک خودروهای خودران استفاده می‌شود و فرآیند استخراج ویژگی تا لایه‌های تصمیم‌گیری را نمایش می‌دهد.

^{۱۲} Motion Planning and Control

^{۱۳} Social Behavior

^{۱۴} Navigation and Mapping

^{۱۵} Vehicle-to-Everything – V2X

^{۱۶} Vehicle-to-Infrastructure – V2I

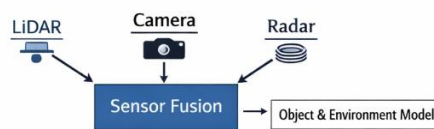
^{۱۷} Vehicle-to-Vehicle – V2V

^{۱۸} Convolutional Neural Networks - CNNs

۳-۱-چالش‌ها

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، یادگیری عمیق در خودروهای خودران با چالش‌های مهمی روبرو است. یکی از این چالش‌ها نیاز به حجم بالای داده است؛ چرا که آموزش مدل‌ها به داده‌های وسیع و متنوعی نیاز دارد که گردآوری آن‌ها دشوار است. علاوه بر این، قدرت محاسباتی بالا نیز یک الزام است، زیرا پردازش بلادرنگ داده‌ها برای تصمیم‌گیری‌های فوری، نیازمند سخت‌افزارها و الگوریتم‌های قوی‌تر و کارآمدتر است. مسئله دیگر، تعمیم‌پذیری و ایمنی سیستم‌هاست؛ تضمین عملکرد پایدار آن‌ها در شرایط مختلف محیطی (مانند تغییرات آب و هوا، نورپردازی)، موقعیت‌های غیرمنتظره، و همچنین مقابله با حملات خصمانه، از مسائل حیاتی و پیچیده به شمار می‌رود. با این حال، تحقیقات مستمر در این حوزه نویدبخش غلبه بر این محدودیت‌ها و ارتقاء عملکرد و ایمنی سیستم‌های خودران در آینده نزدیک است.

شکل ۳: ادغام چند حسگری در خودروهای خودران



دیاگرام مفهومی از فرآیند ادغام داده‌های حسگرهای مختلف شامل لیدار، دوربین و رادار برای ایجاد یک نمایش یکپارچه از محیط اطراف خودرو.

۲- برنامه‌ریزی حرکت و پیش‌بینی رفتار در وسایل نقلیه خودران

برنامه‌ریزی حرکت و پیش‌بینی رفتار دو جزء حیاتی در سیستم‌های رانندگی خودران هستند که حرکت ایمن، بهینه، و هماهنگ خودرو را در محیط‌های پیچیده و پویا تضمین می‌کنند. این بخش به بررسی کاربردهای یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی^{۱۹} در این حوزه‌ها می‌پردازد.

۲-۱- برنامه‌ریزی حرکت و کنترل خودرو

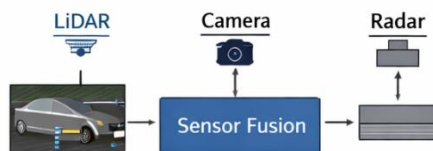
برنامه‌ریزی حرکت به معنای یافتن مسیری ایمن، بهینه، و مطمئن برای خودروی خودران است تا از نقطه شروع به مقصد برسد، در حالی که موانع را دور زده و قوانین ترافیکی را رعایت کند. در این راستا، یادگیری تقویتی عمیق به عنوان رویکردی مؤثر برای مقابله با چالش‌های پیچیده برنامه‌ریزی مسیر مطرح شده است. چالش‌هایی نظیر مدیریت عدم قطعیت‌های محیطی و پیش‌بینی رفتار سایر کاربران جاده با توانایی یادگیری تقویتی عمیق در یادگیری سیاست‌های کنترلی بهینه، قابل حل هستند؛ یادگیری تقویتی عمیق به خودرو اجازه می‌دهد تا مسیرهای اجتنابی از برخورد، نوبری چند رباتی و واکنش سریع در مواجهه با شرایط محیطی متغیر را بیاموزد. کنترل خودرو نیز به اجرای دقیق مسیر برنامه‌ریزی‌شده و حفظ پایداری و ایمنی خودرو حین حرکت اطلاق می‌شود. این کنترل شامل فرمان‌دهی به اجزایی نظیر فرمان، ترمز، و گاز است که باید در هماهنگی کامل با برنامه‌ریزی حرکت عمل کنند. تکنیک‌هایی مانند کنترل کروز تطبیقی^{۲۰} و کمک‌فناوری حفظ مسیر^{۲۱} () در این زمینه به کار گرفته می‌شوند. معماری‌های یادگیری عمیق نظیر شبکه‌های عصبی پیچشی برای پردازش داده‌های تصویری و شبکه‌های عصبی بازگشتی^{۲۲} برای داده‌های سری زمانی، در طراحی سیستم‌های کنترلی مؤثر واقع شده‌اند. با این حال، چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های حجیم، پیچیدگی در تفسیر مدل، و تضمین ایمنی در شرایط غیرمنتظره همچنان پابرجاست.

Reinforcement Learning - RL^{۱۹}
 Adaptive Cruise Control - ACC^{۲۰}
 Lane Keeping Assist - LKA^{۲۱}
 Recurrent Neural Network - RNN^{۲۲}

۲-۲- پیش‌بینی رفتار وسیله نقلیه و جریان ترافیک

پیش‌بینی رفتار وسایل نقلیه، وظیفه‌ای حیاتی است که با پیش‌بینی موقعیت‌ها و رفتارهای آینده کاربران جاده، به افزایش ایمنی و کارایی رانندگی خودران کمک می‌کند. برخلاف روش‌های سنتی که محدود به سناریوهای ساده بودند، رویکردهای مبتنی بر یادگیری عمیق با قابلیت‌های بالاتر، به ویژه در محیط‌های پیچیده و پرترافیک، محبوبیت یافته‌اند. در این حوزه، مدل‌های یادگیری عمیق مختلف بر اساس نوع ورودی، نوع خروجی (موقعیت، سرعت، جهت حرکت)، و روش پیش‌بینی (مانند شبکه‌های CNN، RNN، LSTM) طراحی شده‌اند. این مدل‌ها قادرند با تحلیل داده‌های تاریخی و لحظه‌ای، رفتارهای احتمالی وسایل نقلیه اطراف را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. علاوه بر پیش‌بینی رفتار خودروهای منفرد، پیش‌بینی جریان ترافیک در سطح وسیع‌تر نیز اهمیت دارد. در این راستا، مدل‌های یادگیری عمیق توانسته‌اند روابط غیرخطی و پیچیده بین داده‌های مکانی و زمانی جریان ترافیک را به خوبی مدل‌سازی کرده و تغییرات ترافیکی را در زمان آینده پیش‌بینی نمایند. این پیش‌بینی‌ها به خودروهای خودران کمک می‌کند تا تصمیمات ناوبری بهینه‌ای اتخاذ کنند و هماهنگی بهتری با شبکه حمل‌ونقل داشته باشند.

شکل ۴: فرآیند پیش‌بینی رفتار و برنامه ریزی مسیر



نموداری ساده از تعامل میان ماژول‌های پیش‌بینی رفتار و برنامه‌ریزی حرکت به منظور تولید مسیرهای ایمن و قابل اجرا برای خودرو خودران.

۲-۳- چالش‌ها و چشم‌اندازها

اگرچه یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی در برنامه‌ریزی حرکت، کنترل خودرو، و پیش‌بینی رفتار پیشرفت‌های قابل توجهی داشته‌اند، اما چالش‌های متعددی همچنان وجود دارد. این چالش‌ها شامل کمبود داده‌های متنوع و با کیفیت، پیچیدگی تفسیر مدل‌ها، تضمین ایمنی و قابلیت اطمینان در شرایط محیطی غیرقابل پیش‌بینی، و نیاز به توان محاسباتی بالا است. چشم‌انداز آینده این حوزه به سمت ترکیب روش‌های یادگیری عمیق با مدل‌های فیزیکی و قوانین ترافیکی حرکت می‌کند تا سیستم‌های کنترل و تصمیم‌گیری خودران، توانمندتر و قابل اطمینان‌تر شوند. همچنین، بهبود الگوریتم‌های یادگیری تقویتی با قابلیت آموزش در محیط‌های شبیه‌سازی شده و انتقال یادگیری به شرایط واقعی، از جمله مسیرهای مهم توسعه به شمار می‌روند.

۳- چالش‌ها و نگرانی‌ها در توسعه و استقرار خودروهای خودران

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری خودروهای خودران، توسعه و استقرار این وسایل نقلیه با چالش‌ها و نگرانی‌های متعددی همراه است که مانع از پذیرش گسترده و کاربرد عملی آن‌ها در محیط‌های واقعی می‌شود. این چالش‌ها را می‌توان در چهار محور اساسی شامل امنیت و حملات مخرب، ایمنی، اخلاق و پذیرش عمومی، محدودیت‌های محاسباتی و تعمیم‌پذیری طبقه‌بندی نمود.

۱-۳ امنیت و حملات مخرب

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در زمینه خودروهای خودران، موضوع امنیت سایبری است. افزایش پیچیدگی سامانه‌های الکترونیکی و ارتباطی در این خودروها، آن‌ها را در معرض تهدیدات متنوع سایبری قرار داده است. هرگونه نفوذ یا دستکاری در سیستم‌های نرم‌افزاری، حسگرها، و یا زیرساخت‌های ارتباطی می‌تواند منجر به بروز خطرات جدی برای سرنشینان و سایر کاربران جاده شود.

۱-۱-۳. تهدیدات سایبری و انواع حملات

افزایش وابستگی خودروهای خودران به شبکه‌های ارتباطی خودرو با خودرو، ارتباطی خودرو با زیر ساخت و ارتباطات و زیرساخت‌های اینترنت اشیاء، فرصت‌های متعددی را برای مهاجمان سایبری فراهم ساخته است. حملاتی نظیر جعل پیام‌ها، شنود، مسدودسازی ارتباطات و حتی دستکاری در داده‌های حسگرها می‌تواند عملکرد صحیح سیستم‌های خودران را مختل کرده و به وقوع حوادث منجر شود.

۲-۱-۳. طبقه‌بندی و مدیریت تهدیدات

طبقه‌بندی صحیح حملات سایبری و توسعه سازوکارهای مقابله با این تهدیدات اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از فناوری‌های نوینی همچون بلاک‌چین برای مدیریت تراکنش‌های ارتباطی و به‌کارگیری سامانه‌های ارزیابی امنیتی می‌تواند در شناسایی و مقابله با تهدیدات مؤثر واقع شود. علاوه بر این، طراحی معماری‌های ایمن و جداسازی داده‌های حمله‌پذیر از مسیرهای تصمیم‌گیری حیاتی، راهکارهای کلیدی در ارتقاء امنیت این سیستم‌ها به شمار می‌روند.

۲-۲. چالش‌های حفاظت از حریم خصوصی

جمع‌آوری و تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها در خودروهای خودران، نگرانی‌های قابل توجهی در حوزه حریم خصوصی ایجاد می‌کند. اطلاعات مکانی، الگوهای سفر و حتی داده‌های زیستی کاربران ممکن است مورد سوءاستفاده قرار گیرد. ضرورت ایجاد چارچوب‌های قانونی و فنی برای حفاظت از این داده‌ها و کسب رضایت آگاهانه از کاربران، از دیگر الزامات این حوزه است.

۳-۳. ایمنی، اخلاق و پذیرش عمومی

ایمنی از دیرباز به عنوان یکی از اهداف اصلی توسعه خودروهای خودران مطرح بوده است. بیش از ۹۰ درصد تصادفات جاده‌ای به خطای انسانی نسبت داده می‌شود و این فناوری با هدف کاهش این خطاها توسعه یافته است. با این حال، دستیابی به ایمنی کامل با چالش‌های فنی و اخلاقی متعددی روبه‌روست.

۳-۳-۱. چالش‌های ایمنی فنی

عملکرد حسگرها در شرایط جوی نامساعد، شناسایی دقیق اشیاء و رفتارهای غیرقابل پیش‌بینی سایر کاربران جاده از مهم‌ترین چالش‌های فنی این حوزه است. نقص در عملکرد سیستم‌های تشخیص و تصمیم‌گیری می‌تواند منجر به بروز حوادث جبران‌ناپذیر شود. همچنین، فقدان استانداردهای جهانی برای ایمنی و اعتبارسنجی این فناوری، فرآیند استقرار را پیچیده‌تر می‌کند.

۳-۳-۲. چالش‌های اخلاقی و مسئولیت‌پذیری

مسائل اخلاقی، از جمله تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری، سوگیری الگوریتمی و عدم شفافیت تصمیمات سیستم، از جمله نگرانی‌های جدی در توسعه خودروهای خودران است. ضرورت تبیین چارچوب‌های اخلاقی مشخص و تدوین دستورالعمل‌های بین‌المللی برای تضمین رفتار عادلانه و مسئولانه این فناوری‌ها کاملاً احساس می‌شود.

۳-۳-۳. اعتماد عمومی و پذیرش اجتماعی

پذیرش عمومی خودروهای خودران به شدت به اعتماد جامعه به ایمنی و عملکرد این فناوری وابسته است. نگرانی‌های ناشی از تصادفات احتمالی، مسئولیت قانونی و همچنین درک عمومی از هوش مصنوعی، موانعی برای پذیرش گسترده به شمار می‌روند. افزایش شفافیت، ارائه شواهد مستند از ایمنی و مشارکت کاربران در فرآیند توسعه می‌تواند در بهبود این وضعیت مؤثر باشد.

۳-۴. محدودیت‌های محاسباتی و چالش‌های تعمیم‌پذیری

یادگیری عمیق به عنوان هسته مرکزی تصمیم‌گیری در بسیاری از خودروهای خودران با محدودیت‌های محاسباتی قابل توجهی مواجه است. علاوه بر این، پیچیدگی محیط‌های رانندگی واقعی و نیاز به تعمیم‌پذیری رفتارها در سناریوهای متنوع، مشکلات مضاعفی را به همراه دارد.

۳-۴-۱. محدودیت‌های قدرت پردازشی و هزینه

مدل‌های یادگیری عمیق نیازمند حجم وسیعی از داده‌های آموزشی و قدرت پردازشی بالا هستند. این موضوع نه تنها زمان آموزش را به شدت افزایش می‌دهد بلکه هزینه‌های سخت‌افزاری خودروها را نیز بالا می‌برد. ضمن آنکه در خودروهای واقعی، محدودیت منابع انرژی و فضای فیزیکی نیز وجود دارد.

۳-۴-۲. دشواری انتخاب معماری‌های بهینه

یافتن معماری مناسب برای شبکه‌های عصبی که قادر به تعمیم‌پذیری و پیش‌بینی دقیق رفتارهای دینامیک رانندگی باشد، همچنان یکی از چالش‌های بزرگ محسوب می‌شود. فرآیند انتخاب و بهینه‌سازی معماری شبکه‌های عصبی اغلب به روش‌های آزمون و خطا متکی است که ناکارآمدی و هزینه‌های بالا را به همراه دارد.

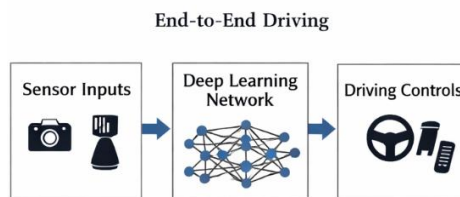
۳-۴-۳. چالش‌های تعمیم‌پذیری در محیط‌های پیچیده

محیط‌های رانندگی واقعی بسیار متنوع و پیچیده‌اند. تعاملات پیچیده میان وسایل نقلیه، عابران پیاده و قوانین ترافیکی گوناگون، نیازمند مدل‌هایی است که قادر به تعمیم‌پذیری بالا و واکنش صحیح در سناریوهای پیش‌بینی‌نشده باشند. بسیاری از سیستم‌های فعلی در مواجهه با تغییرات محیطی دچار افت عملکرد شده و نیازمند توسعه الگوریتم‌های مقاوم‌تر هستند.

۴- رانندگی End-to-End در سیستم‌های خودران

رانندگی End-to-End رویکردی نوین در وسایل نقلیه خودران است که با نداشتن مستقیم ورودی‌های حسی به خروجی‌های کنترلی، خط لوله رانندگی را ساده‌سازی کرده و کارایی و پایداری را بهبود می‌بخشد. این روش، با کاهش انتشار خطا و مزایای محاسباتی، از معماری‌های ماژولار سنتی متمایز می‌شود. همچنین، پیشرفت‌هایی در قابلیت تفسیر و انعطاف‌پذیری آن در برابر حملات خصمانه حاصل شده است.

شکل ۵: چهارچوب رانندگی End-to-End



یک چهارچوب رانندگی که در آن داده‌های خام حسگرها به طور مستقیم و با استفاده از یک مدل یادگیری عمیق به فرمان‌های کنترلی خودرو تبدیل می‌شوند، بدون تفکیک ماژول‌های میانی.

۴-۱- ساختار و داده‌ها در سیستم‌های E2E

سیستم‌های E2E ورودی‌های متنوعی را می‌پذیرند، از جمله داده‌های دوربین (تک‌چشمی، استریو)، لیدار (برای اطلاعات سه‌بعدی و مقاوم در برابر نور)، و ورودی‌های چندوجهی که داده‌های حسگرهای مختلف را ترکیب می‌کنند. ورودی‌های ناوبری (مانند نقاط مسیر GPS و سرعت خودرو) نیز برای هدایت مسیر استفاده می‌شوند. خروجی‌ها شامل نقاط مسیر^{۲۳}، توابع هزینه (برای انتخاب مسیر بهینه)، کنترل مستقیم (فرمان و شتاب)، و خروجی‌های کمکی (مانند نقشه‌های بخش‌بندی) هستند که به توضیح رفتار مدل کمک می‌کنند.

۴-۲- رویکردهای یادگیری در سیستم‌های E2E

دو رویکرد اصلی یادگیری در سیستم‌های E2E به کار می‌روند: یادگیری تقلیدی^{۲۴} و یادگیری تقویتی^{۲۵}. در روش یادگیری تقلیدی، سیستم رفتار رانندگان متخصص را تقلید می‌کند که شامل تکنیک‌هایی مانند شبیه‌سازی رفتار^{۲۶}، یادگیری سیاست مستقیم^{۲۷}، و یادگیری تقویتی معکوس^{۲۸} می‌شود. در مقابل، در رویکرد یادگیری تقویتی، عامل از طریق آزمون و خطا، پاداش‌ها را در محیط به حداکثر می‌رساند و سیاست بهینه را یاد می‌گیرد. یادگیری تقویتی به حل مشکل تغییر توزیع که در یادگیری تقلیدی وجود دارد، کمک می‌کند.

۴-۳- چالش‌ها و ملاحظات

سیستم‌های E2E با چالش‌های متعددی روبرو هستند. سازگاری دامنه برای کاهش تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و دنیای واقعی حیاتی است. ایمنی یک چالش پیچیده است که با آموزش بر روی داده‌های متنوع، ادغام محدودیت‌های ایمنی، و استفاده از مکانیسم‌های آزمایش دقیق مورد

^{۲۳} Waypoints

^{۲۴} Imitation Learning - IL

^{۲۵} Reinforcement Learning - RL

^{۲۶} Behavioral Cloning - BC

^{۲۷} Direct Policy Learning - DPL

^{۲۸} Inverse Reinforcement Learning - IRLs

توجه قرار می‌گیرد. قابلیت توضیح‌پذیری، به‌ویژه درک منطق تصمیم‌گیری مدل، برای پذیرش عمومی و اعتمادسازی ضروری است.

۴-۴- روندهای نوظهور و مسیرهای آینده

تحقیقات آینده بر بهبود پایداری یادگیری (مقابله با چالش‌هایی مانند تغییر توزیع و بی‌ثباتی محاسباتی)، افزایش ایمنی (تضمین ایمنی رفتاری و پیش‌بینی دقیق رفتارهای نامطمئن)، و پیشبرد قابلیت توضیح‌پذیری مدل (پرداختن به چالش عدم قابلیت تفسیر) تمرکز خواهد داشت. همچنین، توسعه سیستم‌های ادراک مشارکتی (V2X) که در آن وسایل نقلیه برای نظارت بر محیط فراتر از خط دید خود با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند، و بهره‌گیری از مدل‌های زبان و بینایی بزرگ (LLMs & VLMs) برای بهینه‌سازی سیستم‌های شناسایی بصری و انتقال دانش، از مسیرهای اصلی آینده E2E هستند.

۴-۵- نقش سیستم‌های منبع‌باز و فرصت‌های تحقیقاتی آینده

سیستم‌های رانندگی خودران منبع‌باز (Open-Source ADS) نقش بسیار مهمی در پیشبرد تحقیقات E2E ایفا می‌کنند. پلتفرم‌هایی مانند Baidu Apollo و Autoware با فراهم آوردن محیط‌های مشارکتی و دموکراتیزه کردن دسترسی به فناوری ADS، به عنوان کاتالیزور برای نوآوری عمل می‌کنند. این پلتفرم‌ها در حوزه‌هایی مانند حسگر و ادراک محیطی، مکان‌یابی و نقشه‌برداری، تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی، اتصال‌پذیری، ایمنی و کاربرد هوش مصنوعی، مشارکت‌های تحقیقاتی قابل توجهی داشته‌اند. با این حال، چالش‌هایی مانند ناهمگونی معماری و نیاز به قابلیت همکاری یکپارچه با فناوری‌های نوظهور (مانند یادگیری ماشین و هوش مصنوعی و محاسبات لبه) همچنان وجود دارد که فرصت‌های آتی را برای جامعه منبع‌باز تعریف می‌کنند. در مجموع، آینده حمل‌ونقل خودران نیازمند همکاری‌های بین‌رشته‌ای، استانداردسازی و نوآوری مستمر برای غلبه بر چالش‌ها و بهره‌برداری از فرصت‌های موجود است.

۵- نتیجه‌گیری

صنعت حمل‌ونقل در آستانه یک دگرگونی بی‌سابقه قرار دارد که محور اصلی آن، توسعه و به‌کارگیری خودروهای خودران است. این مقاله نشان داد که یادگیری عمیق به عنوان ستون فقرات این تحول، با توانمندی‌های خیره‌کننده خود در ادراک محیط، تصمیم‌گیری هوشمند و کنترل دقیق خودرو، نقش حیاتی ایفا می‌کند. از تشخیص دقیق اشیاء و درک پیچیده صحنه‌های رانندگی گرفته تا پیش‌بینی رفتار کاربران جاده و برنامه‌ریزی بهینه مسیر، یادگیری عمیق در تمامی سطوح عملکردی خودروهای خودران حضوری پررنگ دارد.

با وجود پیشرفت‌های شگرف، مسیر توسعه و استقرار گسترده خودروهای خودران خالی از چالش نیست. امنیت سایبری و مقابله با حملات مخرب، تضمین ایمنی بی‌قید و شرط، حل مسائل اخلاقی و حقوقی، جلب اعتماد عمومی، و غلبه بر محدودیت‌های محاسباتی و چالش‌های تعمیم‌پذیری مدل‌ها، همگی موانع مهمی هستند که باید با جدیت به آن‌ها پرداخته شود. رویکرد رانندگی End-to-End (E2E)، با هدف ساده‌سازی معماری‌ها و افزایش کارایی، پتانسیل بالایی برای آینده این صنعت دارد، اما نیازمند پیشرفت‌های بیشتر در زمینه‌هایی چون ایمنی و قابلیت توضیح‌پذیری (Explainability) است تا تصمیمات مدل‌ها شفاف‌تر و قابل اعتمادتر باشند.

جمع‌بندی

در مجموع، توسعه و استقرار خودروهای خودران مستلزم مواجهه و غلبه بر چالش‌های چندلایه و بین‌رشته‌ای است. از یک سو، امنیت سایبری و حفاظت از حریم خصوصی باید به گونه‌ای تضمین شود که اعتماد عمومی جلب گردد. از سوی دیگر، ایمنی، اخلاق، تعمیم‌پذیری و بهبود مستمر عملکرد سامانه‌های تصمیم‌گیری نیازمند توجه ویژه و همکاری میان صنعت، دانشگاه‌ها و نهادهای قانون‌گذار است. دستیابی به این اهداف، مسیر پذیرش و گسترش این فناوری تحول‌آفرین را هموار خواهد ساخت.

مراجع-6

- [1] Ben Elallid, B., Benamar, N., Hafid, A. S., Rachidi, T., and Mrani, N.
“A Comprehensive Survey on the Application of Deep and Reinforcement Learning Approaches in Autonomous Driving”, 2022.
- [2] Deng, Y., Zhang, T., Lou, G., Zheng, X., Jin, J., and Han, Q.-L.
“Deep Learning-Based Autonomous Driving Systems: A Survey of Attacks and Defenses”, *IEEE*, 2021.
- [3] Aliane, N.
“A Survey of Open-Source Autonomous Driving Systems and Their Impact on Research”, 2025.
- [4] Garikapati, D., and Shetiya, S. S.
“Autonomous Vehicles: Evolution of Artificial Intelligence and the Current Industry Landscape”, 2024.
- [5] Padmaja, B., Moorthy, C. V. K. N. S. N., Venkateswarulu, N., and Bala, M. M.
“Exploration of Issues, Challenges and Latest Developments in Autonomous Cars”, 2023.
- [6] Naveen, K. N., Lokesh, M., Varma, K. N. J. L., and Teja, P. S. V.
“A Review on Autonomous Vehicles and Its Components”, 2022.
- [7] Jain, N., Shukla, R., and Tamrakar, D.
“A Review Paper on Self-Driving Car Using Machine Learning and Artificial Intelligence”, 2023.
- [8] Aljehane, N. O.
“A Study to Investigate the Role and Challenges Associated with the Use of Deep Learning in Autonomous Vehicles”, 2024.
- [9] Ganesan, M., Kandhasamy, S., Chokkalingam, B., and Mihet-Popa, L.
“A Comprehensive Review on Deep Learning-Based Motion Planning and End-to-End Learning for Self-Driving Vehicles”, 2017.
- [10] Sahoo, L. K., and Varadarajan, V.
“Deep Learning for Autonomous Driving Systems: Technological Innovations, Strategic Implementations, and Business Implications – A Comprehensive Review”, 2025.
- [11] Chiba, P. S., and Singha, P.
“Recent Advancements in End-to-End Autonomous Driving using Deep Learning: A Survey”, 2023.
- [12] Murataj, J., Alkholidi, A. G., and Hamam, H.
“A Review of Deep Learning for Self-Driving Cars: Case Study”, 2021.
- [13] Gupta, A., Anpalagan, A., Guan, L., and Khwaja, A. S.
“Deep Learning for Object Detection and Scene Perception in Self-Driving Cars: Survey, Challenges, and Open Issues”, 2021.
- [14] Parekh, D., Poddar, N., Rajpurkar, A., Chahal, M., Kumar, N., Joshi, G. P., and Cho, W.
“A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges”, 2022.
- [15] Bathla, G., Bhadane, K., Singh, R. K., Kumar, R., Aluvalu, R., Krishnamurthi, R., Kumar, A., Thakur, R. N., and Basheer, S.
“Autonomous Vehicles and Intelligent Automation: Applications, Challenges, and Opportunities”, 2022.
- [16] Kiruthika, S., Aashin, A., Gopinath, K., and Gowtham, A.
“Securing Connected & Autonomous Vehicles: Challenges Posed by Adversarial Machine Learning and the Way Forward”, 2021.
- [17] Mozaffari, S., Al-Jarrah, O. Y., Dianati, M., Jennings, P., and Mouzakitis, A.
“Deep Learning-Based Vehicle Behaviour Prediction for Autonomous Driving Applications: A Review”, 2020.
- [18] Fayyad, J., Jaradat, M. A., Gruyer, D., and Najjaran, H.
“Deep Learning Sensor Fusion for Autonomous Vehicle Perception and Localization: A Review”, 2020.
- [19] Priya, A. K., and Saha, P.
“A Review of Deep Learning Models for Traffic Flow Prediction in Autonomous Vehicles”, 2020.
- [20] Kuutti, S., Bowden, R., Jin, Y., Barber, P., and Fallah, S.
“A Survey of Deep Learning Applications to Autonomous Vehicle Control”, 2019.