پرپیزوال: طراحی و پیاده سازی سیستم ترمز اضطراری خودکار (AEB) با زمان پاسخ محدود و Sensor Fusion برای بهبود دقت سیستم

محمدرضا بخشایش – 810199381 اردیبهشت 1404

علی پرویزی – 810100102

امین باهنر – 810199548

# مقدمه

هدف این پروژه طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم ترمز اضطراری خودکار (AEB) به عنوان یک سیستم سایبر-فیزیکی است. تمرکز اصلی این پروژه افزایش ایمنی با جلوگیری از تصادف از طریق تشخیص سریع و دقیق شرایط اضطراری است. این سیستم با ترکیب داده‌های چندین حسگر تصمیم‌گیری را بهبود بخشیده و واکنش ترمز را به‌موقع تضمین می‌کند.

# معرفی پروژه

سیستم‌های ترمز اضطراری خودکار (AEB) با تشخیص موانع و اعمال ترمز خودکار، ایمنی خودرو را بهبود می‌بخشند و طبق مطالعات Euro NCAP تا 38 درصد شدت تصادفات را کاهش می‌دهند. این سیستم‌ها با ادغام داده‌های حسگرها، شرایط بحرانی را شناسایی کرده، به راننده هشدار و در صورت لزوم کنترل دستی را لغو می‌کنند، و خطاهای انسانی را که بیش از 90 درصد تصادفات جاده‌ای را تشکیل می‌دهند، کاهش می‌دهند.

هدف پروژه طراحی سیستم AEB برای خودروهای کم‌سرعت با استفاده از حسگرهای ارزان‌قیمت (فوق‌صوت و مادون قرمز) و میکروکنترلر Arduino است تا بدون نیاز به تجهیزات گران مانند LIDAR، برخورد را با دقت پیش‌بینی کرده و به‌موقع ترمز کند. این سیستم روی خودروی RC با سرعت حداکثر 0.5 متر بر ثانیه پیاده‌سازی می‌شود که ورودی‌های کاربر را پردازش کرده، محرک‌ها (چرخ‌ها و ترمز) را کنترل و داده‌ها را ثبت می‌کند. این پلتفرم آزمایش عملکرد سیستم را در محیط آزمایشگاهی ساده می‌سازد.

سیستم AEB شامل ماژول تشخیص مانع و کنترلر است (شکل 1). ماژول تشخیص با فیلتر کالمن، داده‌های حسگرهای فوق‌صوت و مادون قرمز را ادغام کرده و موانع را در محدوده 10 تا 150 سانتی‌متر تشخیص می‌دهد. کنترلر با تخمین زمان تا برخورد (Time-To-Collision) بر اساس داده های ورودی یکی از سه حالت زیر را بر روی سیستم اعمال میکند:

* حالت امن: مانع جدی در مسیر خودرو وجود نداشته و خطری خودرو را تهدید نمیکند. در این حالت نیازی به اقدام خاصی از سمت سیستم نیست.
* حالت هشدار: مانع در مسیر وجود دارد ولی راننده خودرو زمان کافی برای هدایت خودرو و جلوگیری از برخورد را دارد. در این صورت سیستم با روشن کردن چراغ هشدار یا بوق خطر را به راننده اعلام میکند.
* حالت ترمز اضطراری: زمان کافی برای ترمز توسط راننده وجود نداشته() و نیاز است سیستم با override کردن ورودی های راننده و فعال کردن ترمز اضطراری از تصادف و صدمات ناشی از آن جلوگیری کند.

شکل 2 تفاوت حالت هشدار سیستم با حالت ترمز اضطراری را نشان میدهد

# چالش سایبر-فیزیکی پروژه

مسئله اصلی که این سیستم تلاش به حل آن دارد، دستیابی به تشخیص دقیق و به‌موقع شرایط اضطراری در حضور نویز حسگرها، تأخیر در پردازش، و احتمال تشخیص‌های اشتباه در محیطی با منابع محدود است.

در سیستم‌های AEB، ترکیب داده‌های حسگرهای ناهمگون (مانند اولتراسونیک، مادون قرمز یا دوربین‌ها) برای تشخیص مطمئن موانع ضروری است. با این حال، حسگرهای ارزان معمولاً نویز، خطاهای کالیبراسیون یا تأخیرهایی را وارد می‌کنند که می‌تواند منجر به تشخیص‌های مثبت کاذب (ترمز بی‌مورد) یا منفی کاذب (عدم تشخیص مانع) شود. همچنین، محدودیت پردازشی بردهای آردوینو اجرای الگوریتم‌ها را دشوار کرده و رسیدن به نیازهای زمانی واقعی (مثلاً ترمز در کمتر از ۵۰۰ میلی‌ثانیه پس از تشخیص مانع) را چالش‌برانگیز می‌کند. این چالش در سیستم‌های سایبر-فیزیکی حیاتی است، زیرا تعامل بین دینامیک فیزیکی (حرکت خودرو) و پردازش رایانه‌ای (ترکیب حسگرها و تصمیم‌گیری) مستقیماً بر ایمنی تأثیر می‌گذارد.

# روش استفاده شده برای حل چالش ها

در این پروژه سعی می شود برای افزایش دقت سیستم، از داده های چند حسگر متفاوت (حسگر مادون قرمز و اولتراسونیک) استفاده شده و خروجی این حسگر ها به کمک فیلتر کالمن تبدیل به اطلاعات قابل اتکا از محیط شود؛ در مرحله بعد یک الگوریتم تصمیم گیری حساس به زمان با پردازش این اطلاعات تصمیم به ارسال سیگنال خطر و یا توقف خودرو به صورت خودکار میگیرد. مراحل انجام و تکمیل این پروژه در ادامه شرح داده میشود.

## انتخاب تجهیزات و setup اولیه

در این پروژه تلاش میشود برای اطمینان از سادگی و ارزان بودن خروجی، از تجهیزات زیر استفاده شود

* یک برد Arduino ساده مانند Uno یا Mega به عنوان میکروکنترولر
* حسگر اولتراسونیک (مانند HC-SR04) برای اندازه گیری فاصله تا موانع در بازه 2 تا 400 سانتی متر
* حسگر مادون قرمز (مانند Sharp GP2Y0A21YK) برای اندازه گیری فاصله با حساسیت متفاوت نسبت به شرایط محیطی (در بازه 10 تا 80 سانتی متر) و اطمینان بیشتر از دقت محصول
* حسگر اثر هال برای اندازه گیری سرعت خودرو

در کنار این تجهیزات، در صورت امکان نیاز به ساخت یک ماشین RC ساده، یک servo motor برای ترمز و همچنین چند LED برای هشدار به راننده نسبت به خطر وجود دارد.

## افزایش دقت حسگر ها با Sensor Fusion

برای اطمینان از دقت عملکرد محصول نهایی، از فیلتر کالمن برای کاهش نویز های محیطی و بهبود دقت عملکرد حسگر ها استفاده میشود. در ادامه با ساخت دمو اولیه محصول و آزمایش آن در شرایط مختلف، خروجی نهایی حسگر ها برای رسیدن به بالاترین دقت کالیبره میشوند.

## تصمیم‌گیری حساس به زمان

در مرحله بعد یک الگوریتم تشخیص زمان تا برخورد (TTC) با استفاده از تخمین فاصله تا هدف و سرعت نسبی خودرو توسعه داده خواهد شد که در هر مرحله ریسک برخورد خودرو با موانع پیش رو را مشخص کرده و اقدام لازم (از قبیل روشن کردن چراغ هشدار و یا فعال کردن سیستم ترمز خودرو) را انجام میدهد.

برای اطمینان از زمان پاسخ محدود این سیستم این الگوریتم روی برد Arduino مستقر و با ورودی های مصنوعی آزمایش شده و میانگین زمان اجرای هر چرخه اندازه گیری میشود. در صورت بیشتر بودن این زمان از یک مقدار مشخص (50 میلی ثانیه برای اطمینان از واکنش سریع سیستم) اقدام به بهینه سازی کد میشود.

## ارزیابی عملکرد سیستم

بعد از تکمیل فرایند توسعه و ساخت یک خودروی کوچک RC، این محصول در محیط فیزیکی واقعی آزمایش شده تا از تطابق آن با شرایط و محدودیت های فیزیکی (نسبت سرعت خودرو با زمان مورد نیاز برای ترمز، کلاک 16MHz برد Arduino) اطمینان حاصل شود. پس از اطمینان از عملکرد مطلوب سیستم در سناریو های ساده، عملکرد آن در آزمایش های زیر مورد برسی قرار میگیرد.

* ارزیابی دقت ماژول تشخیص فاصله

برای اطمینان از دقت حسگر ها و الگوریتم Fusion استفاده شده، فاصله تخمینی سیستم در شرایط مختلف (به عنوان مثال وجود مانع با ابعداد بزرگ، وجود مانع با ابعاد کوچک، بالا یا پایین بودن دمای محیط، وجود رطوبت در محیط، وجود مانع خارج از مسیر خودرو، مانع در حال حرکت) اندازه گیری میشود. با 100 بار تکرار این آزمایش میانگین خطای مطلق فاصله تخمینی اندازه گیری میشود. هدف این پروژه رساندن این خطا به کمتر از 5 سانتی متر برای فاصله بین 10 تا 150 سانتی متر از سنسور میباشد.

* زمان پاسخ سیستم و تشخیص صحیح خطر

برای اطمینان از واکنش سیستم به خطر در محدودیت زمانی مشخص شده، محصول توسعه داده شده در شرایط محیطی مختلف (فراهم شده در مورد قبلی) مورد آزمایش قرار گرفته و سیگنال های ورودی تولید شده توسط سنسور ها ضبط میشوند. با کمک این ورودی های ضبط شده اقدام به آزمایش برد Arduino با کمک یک برد دیگر برای تولید مصنوعی آن ورودی ها سیستم مورد آزمایش قرار گرفته و زمان مورد نیاز از شروع آزمایش تا ارسال سیگنال مناسب (توقف خودکار، هشدار و یا عدم هشدار) در 100 سناریو مختلف اندازه گیری میشود. هدف رساندن این زمان پاسخ به کمتر از 100ms میباشد.

در کنار اندازه گیری زمان پاسخ سیستم، نوع پاسخ سیستم نیز ضبط شده و صحت و یا عدم صحت آن (از نظر مثبت یا منفی کاذب بودن در هر یک از سناریو های عدم هشدار، هشدار و یا توقف کامل) برسی میشود. هدف رسیدن دقت بالای 95 درصد در تشخیص سناریو های خطر واقعی میباشد.

به عنوان جمع بندی، در صورت عدم امکان تست محصول در شرایط فیزیکی، امکان استفاده از شبیه ساز هایی مانند MATLAB/Simulink برای برخی سناریو ها وجود دارد

# مقایسه با نمونه های موجود

موضوع سیستم های خودکار ترمز اضطراری از بحث های داغ پژوهشی در حوزه سامانه های سایبر فیزیکی بوده و پژوهش های زیادی در این حوزه انجام شده. از جمله آنها میتوان به مقاله ارسلان احمد امین و همکاران اشاره کرد که با ترکیب Lidar، Radar و بینایی ماشین و استفاده از Sensor Fusion دست به توسعه یک الگوریتم کارا برای ترمز اضطراری کرده اند. [1] این ایده برای پروژه ما الهام بخش بوده، ولی به دلیل کمبود تجهیزات (عدم دسترسی به Lidar یا برد های با توان پردازشی بیشتر) و همچنین زمان بالای پیاده سازی امکان اجرا را ندارند.

از طرف دیگر نمونه های دیگری از سیستم های ترمز اضطراری وجود دارند که با کمک بینایی ماشین و یادگیری عمیق اقدام به تشخیص اشیاء و یا تخمین TTC میکنند. [2] در این پروژه، از آنجایی که تمرکز ما بر روی طراحی و ساخت یک سامانه سایبر فیزیکی و حل مسائل این حوزه (و نه پردازش تصویر و یادگیری عمیق) بوده و همچنین محدودیت زمانی قابل توجهی برای انجام این پروژه در زمان محدود وجود دارد، صرفا از داده دو سنسور و یک الگوریتم ساده برای تصمیم گیری استفاده میشود.

با این حال در صورت **وجود زمان کافی**، فراهم شدن تجهیزات مورد نیاز (استفاده از برد های با توان پردازشی بیشتر و سنسور دوربین)، میتوان با اضافه کردن یک دوربین به این سیستم به نتایج دقیق تری در تشخیص موانع رسید. و یا میتوان با اضافه کردن سنسور های دیگر (مانند TOF برای تشخیص فاصله و یا ژیروسکوپ برای تخمین بهتر از سرعت خودرو) یا استفاده از چند سنسور اولتراسونیک دقت سیستم را افزایش داد و به درک بهتری از محیط رسید.

# چالش ها و ریسک های پروژه

از جمله چالش های ابتدایی این پروژه، میتوان به نویز موجود روی سنسور ها، cross-talking و مواردی از این دست اشاره کرد که تشخیص اشیاء را چالش برانگیز میکند. همچنین منابع سخت افزاری محدود برد مورد استفاده میتواند مانع رسیدن به محدودیت زمانی در نظر گرفته شده در صورت پروژه و یا عدم امکان استفاده از الگوریتم های TTC پیشرفته تر شود. در صورت بروز این مشکلات استفاده از یک برد با توان پردازشی بیشتر، حذف نویز سنسور ها به صورت نرم افزاری و مواردی از این دست میتواند راه حل مناسبی باشد.

شبیه سازی یک محیط آزمایش و سناریو های مطابق با دنیای واقعی از چالش های جدی این پروژه در قسمت ارزیابی میباشد. زیرا اکتفا صرف به عملکرد ماژول های سخت افزاری سیستم به طور مجزا در شرایط مختلف باعث نادیده گرفتن تاثیر ماژول های متفاوت بر عملکرد یکدیگر میشود.

# برنامه زمانی

* هفته اول: تحقیق و تکمیل طراحی سیستم؛ تهیه تجهیزات مورد نیاز و تکمیل مستندات
* هفته دوم: ساخت سخت ماشین RC و اتصال سنسور ها؛ آماده سازی سناریو و محیط آزمایش
* هفته سوم و چهارم: طراحی فیلتر کالمن و الگوریتم TTC؛ استقرار الگوریتم روی برد
* هفته پنجم: اندازه گیری عملکرد سیستم؛ بهینه سازی زمان پاسخ و دقت سیستم سیستم
* هفته ششم: ارزیابی سیستم در سناریو های مختلف؛ مستند سازی نتایج
* هفته هفتم: نوشتن گزارش پروژه و ارائه نهایی

# نتیجه‌گیری

این پروژه به یک چالش حیاتی در سیستم‌های سایبر-فیزیکی پاسخ می‌دهد: توسعه یک سیستم ترمز اضطراری خودکار کم‌هزینه با ترکیب حسگر قوی و تصمیم‌گیری سریع. با تکیه بر سخت‌افزار مقرون‌به‌صرفه یا شبیه‌سازی، تیم می‌تواند در دو ماه یک نمونه کاربردی ارائه دهد که مهارت‌های عملی در سیستم‌های توکار، ترکیب حسگر و کنترل بلادرنگ را به نمایش می‌گذارد. معیارهای ارزیابی مشخص شده، تضمین می‌کنند که عملکرد سیستم به‌صورت دقیق بررسی شود و با اهداف علمی و ایمنی هم‌راستا باشد.

# مراجع

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | S. R. A. A. Alsuwian T, "Autonomous Vehicle with Emergency Braking Algorithm Based on Multi-Sensor Fusion and Super Twisting Speed Controller," *Applied Sciences,* p. 12(17), 2022. |
| [2] | K. Bishnoi, "Automatic-Emergency-Braking," 14 2 2021. [Online]. Available: https://github.com/kuldeepbishnoi/Automatic-Emergency-Braking. [Accessed 5 5 2025]. |