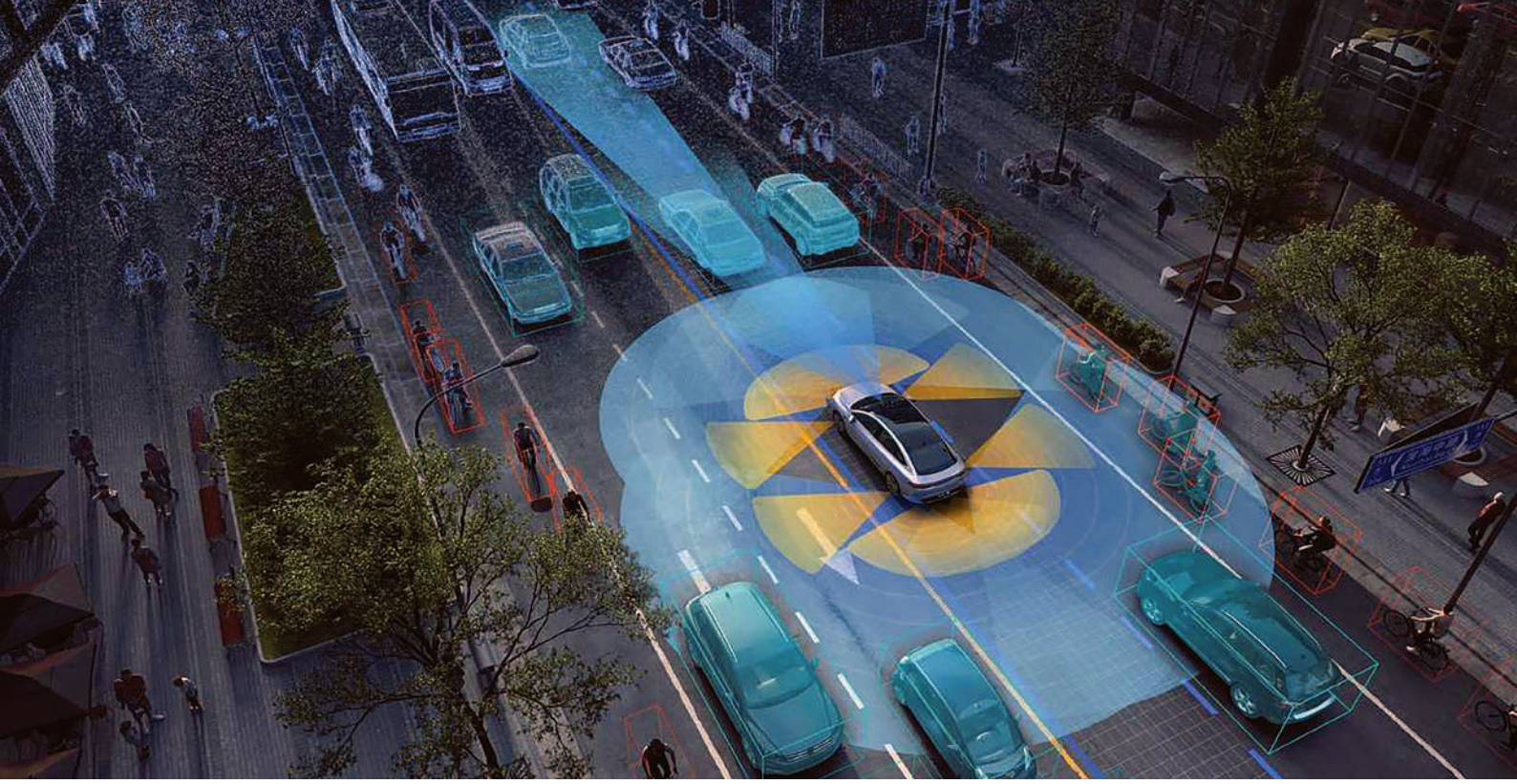


مقاله علمی-ترویجی

بررسی الگوهای طراحی مجموعه حسگر در خودروهای خودران

مهدی قاضی‌زاده*، آزمایشگاه واقعیت مجازی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران mahdilind59@gmail.com
بهنام بهادری، آزمایشگاه واقعیت مجازی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران ، b.bahadori@gmail.com
*نویسنده مسئول

چکیده

خودروهای خودران در چند سال گذشته توسعه زیادی داشته‌اند. این خودروها، انواع حسگر را، مانند رادار، لیدار، سونار و دوربین، برای درک محیط اطراف خود ترکیب می‌کنند. هر خودروی خودران از حسگرها و موقعیت‌های نصب مختلفی استفاده می‌کند. اگرچه تنوع زیادی در مجموعه حسگرها و موقعیت‌های نصب آنها وجود دارد، برخی الگوهای تکراری در میان خودروهای خودران قابل مشاهده است. در این مقاله، این الگوها بررسی شده و رویکردهای مختلف آنها توضیح داده می‌شود. ابتدا الگوهای به کار رفته در برخی از خودروهای خودران موجود ارائه می‌شود. سپس ملاحظات عمومی در طراحی الگوهای حسگر بیان می‌شود. پس از آن مزایا و معایب هر الگو بررسی می‌شود. سرانجام نتایج حاصل از این بررسی جمع‌بندی می‌شود.

کلمات کلیدی: الگوی حسگر، خودروی خودران، خودروی خودگردان، میدان دید.

Investigating the design patterns of sensor sets in self-driving cars

Mahdi Ghazizadeh*,Virtual Reality Lab., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mahdilind59@gmail.com
Behnam Bahadori,Virtual Reality Lab., K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, mahdilind59@gmail.com
*Corresponding Author

Abstract

Self-driving cars have been under intensive development in the last few years. These vehicles combine a variety of sensors, such as radar, lidar, sonar, and camera, to understand their surroundings. Each vehicle uses different sensors and installation locations. Although there is a great deal of variation in the set of sensors and their installation locations, some repetitive patterns can be seen among self-driving cars. In this paper, these patterns are examined and their different approaches are explained. First, the patterns used in some of the existing vehicles are presented. Then, general considerations in the design of sensor patterns are expressed. Next, the advantages and disadvantages of each pattern are examined. Finally, the results of this study are summarized.

Keywords: Sensor pattern, Self-diving car, Autonomous vehicle, Field of view

۱- مقدمه

خودروی خودران، خودرویی است که قادر است محیط خود را حس کند و با کمترین ورودی انسانی یا بدون آن، به طور ایمن حرکت کند[۱].

خودروهای خودران، انواع حسگر را، مانند رادار، لیدار، سونار، دوربین، سامانه موقعیت‌یاب جهانی ، کیلومترشمار و دستگاه‌های سنجش لختی[۱]، برای درک محیط اطراف خود ترکیب می‌کند [۲]. سامانه‌های کنترل پیشرفته، اطلاعات حسی را برای شناسایی مسیرهای پیمایش مناسب و همچنین موانع و علائم مربوطه تفسیر می‌کنند[۱].

پیاده‌سازی‌های احتمالی این فناوری شامل خودروهای خودران شخصی، روبوتاکسی‌های اشتراکی، دسته‌های خودروی متصل[۲] و حمل و نقل کالا در مسافت طولانی است[۱]. چندین پروژه برای تولید یک خودروی تجاری کاملاً خودران در مراحل مختلف توسعه قرار دارند. ویمو نخستین ارائه دهنده خدمات بود که در سال ۲۰۲۰ سفرهای روبوتاکسی را به عموم مردم در فونیکس آریزونا ارائه کرد[۳]. تسلا گفته است که «رانندگی خودران کامل» مبتنی بر اشتراک را به صاحبان خودروی شخصی در سال ۲۰۲۱ ارائه می‌دهد [۴]. به نورو اجازه داده شده است که در سال ۲۰۲۱ عملیات تحویل تجاری خودران را در کالیفرنیا آغاز کند [۵]. در سال ۲۰۲۱، مرسدس بنز دومین سازنده‌ای شد که مجوز قانونی را برای سطح سه رانندگی خودکار مطابق با الزامات قانونی دریافت کرد[۶].

یکی از چالش‌های طراحان خودروهای خودران، یافتن بهترین مجموعه حسگر و موقعیت نصب آنها برای داشتن بهترین عملکرد ادراک محیط است. هر خودروی خودران از حسگرها و موقعیت‌های نصب مختلفی استفاده می‌کند. اگر چه تنوع زیادی در مجموعه حسگرها وجود دارد، برخی الگوهای تکراری در میان خودروهای خودران قابل مشاهده است. در این مقاله، این الگوها بررسی شده و توضیحی در مورد رویکردهای مختلف ارائه می‌شود. این مقاله بر موقعیت حسگر و تأثیر میدان دید حسگرها روی سناریوهایی که خودروهای خودران می‌توانند مدیریت کنند، متمرکز است. برای جزئیات مربوط به حسگرها و فناوری حسگر می‌توان به مقاله [۷] مراجعه کرد. این مقاله بیشتر بر دوربین، لیدار و رادار تمرکز دارد. حسگرهای دیگری مانند حسگرهای فراصوت یا حرارتی موضوع اصلی این مقاله نیستند.

این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: بخش دوم الگوهای به کار رفته در برخی از خودروهای خودران موجود را ارائه می‌کند. بخش سوم ملاحظات عمومی را در طراحی الگوهای حسگر معرفی می‌کند. بخش چهارم حسگرهای مختلف، موقعیت نصب آنها و مزایا و معایب هر کدام را ارائه می‌دهد. بخش پنجم نیز به جمع‌بندی مطالب اختصاص داده شده است.

۲- الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران

درک محیط، از جمله کسب اطلاعات محیط خارجی و برآورد وضعیت خودرو، یکی از مهم‌ترین کارها در خودروهای خودران است. علاوه بر این، الگوریتم‌های ادراک محیط نیاز به حسگر دارند. یک خودروی خودران کامل باید مجهز به حسگرهای مختلف باشد تا عملکرد ایمن و پایدار آن را تضمین کند. بنابراین، حسگرهای دقیق و با اطمینان بالا برای انجام وظیفه برنامه‌ریزی شده، بسیار مهم هستند. علاوه بر این، انواع حسگرهای به کار رفته، تعداد آنها و موقعیت نصب آنها بر عملکرد درک محیط تأثیر زیادی دارد.

در این بخش، مروری کوتاه بر الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران موجود ارائه می‌شود. جدول (۱)، الگوهای به کار رفته در این خودروها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، تنوع زیادی در الگوهای به کار رفته وجود دارد. در این میان، دوربین جلو، رادار جلو و پوشش ۳۶۰ درجه رادار در اطراف خودرو در اکثر خودروهای خودران موجود، استفاده شده است. از طرفی، دوربین زاویه باز در جلو که برای تشخیص چراغ راهنمایی استفاده می‌شود، در خودروهای خودران موجود، کمتر به کار رفته است.

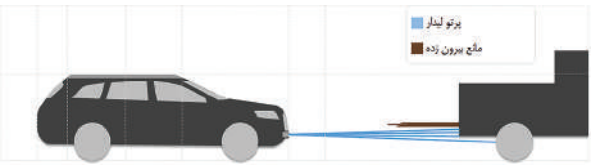
۳- ملاحظات عمومی

با توجه به ویژگی‌های هر نوع حسگر، حسگرهای یک خودروی خودران، دامنه طراحی عملیاتی[۳] آن را، یعنی محیط‌هایی که خودرو می‌تواند بدون خطر در آن‌ها مستقر شود، تعیین می‌کنند. شناسایی حسگرهای مورد نیاز برای «حل» دامنه طراحی عملیاتی، کار پیچیده‌ای است زیرا موارد زیادی وجود دارند که باید مورد بررسی قرار گیرند. در حالی‌که همه حسگرها دارای ویژگی‌ها و محدودیت‌های منحصر به فرد هستند، هر حسگر به صورت یک مصالحه بین دقت، برد، نرخ نمونه‌گیری، میدان دید، هزینه و پیچیدگی کلی سیستم انتخاب می‌شود.

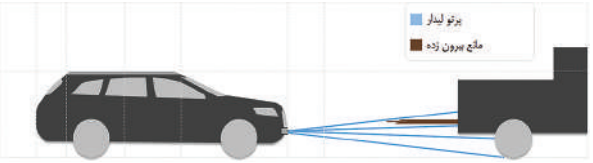
یک روش معمول برای شناسایی مجموعه حسگرهای مورد نیاز برای حل یک دامنه طراحی عملیاتی، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و بررسی عملکرد مجموعه‌های حسگر در تشخیص اشیاء است. عملکرد مجموعه‌های مختلف، مقایسه شده و پیکربندی‌های مورد نظر به صورت تکراری بهبود می‌یابند. این رویکرد داده‌محور، امکان استفاده از یادگیری ماشین را برای شناسایی پیکربندی بهینه، فراهم می‌کند. سناریوها را می‌توان به‌طور خودکار از خودروهای موجود در میدان جمع‌آوری کرد یا به‌صورت دستی طراحی کرد. در ادامه، مجموعه‌ای از سناریوهای چالش‌برانگیز و موارد برجسته ارائه می‌شوند.

۳-۱- موانع هوایی و سقفی

موانع مسدود کننده مسیر خودرو که به زمین متصل نیستند، به‌عنوان مثال درهای باز کامیون، بارهای بیرون زده کامیون، شاخه‌های درخت، دروازه‌های بازویی و پل‌های کم‌ارتفاع، توسط لیدارهایی با میدان دید کم یا ارتفاع کم، از دست می‌روند، برای دوربین‌ها بسیار چالش‌برانگیز هستند و حتی شناسایی صحیح آن‌ها برای رادارها نیز دشوار است. در شکل (۱)، حسگر لیدار با میدان دید عمودی کم، خیلی پایین نصب شده است و هیچ یک از پرتوهای لیدار ساطع شده با مانع بیرون زده، برخورد نمی‌کنند. همچنین در شکل (۲)، وضوح عمودی حسگر لیدار خیلی کم است و هیچ پرتوی به مانع برخورد نمی‌کند، در نتیجه مانع بیرون زده تشخیص داده نمی‌شود.



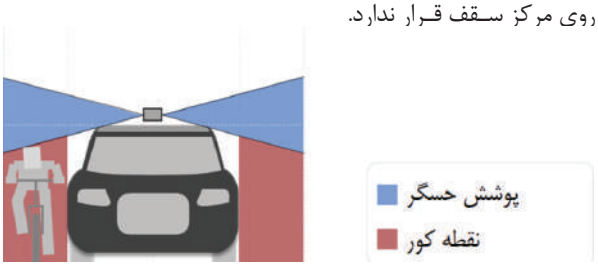
شکل ۱: عدم برخورد پرتوهای لیدار با مانع بیرون زده [۸]



شکل ۲: عدم تشخیص مانع بیرون زده توسط لیدار با وضوح عمودی خیلی کم [۸]

۳-۲- عبور دوچرخه‌سوار

در هنگام گردش به راست، برای عوامل ترافیک که ممکن است با گردش، به آن‌ها برخورد شود باید احتیاط ویژه‌ای انجام شود. در حالی‌که تشخیص خودروهای بزرگ، به نسبت آسان است (از طریق رادار، به‌عنوان مثال برای کمک در تغییر خط عبور)، تشخیص مشارکت‌کنندگان سبک در ترافیک مانند دوچرخه‌سواران، برای حسگرهایی که در مرکز سقف نصب می‌شوند، به‌طور قابل توجهی دشوارتر است[۹]. در شکل (۳)، دوچرخه‌سواری که در کنار خودرو در حال سواری کردن است در میدان دید حسگر لیدار نصب شده روی مرکز سقف قرار ندارد.



شکل ۳: عدم قرارگیری دوچرخه‌سوار در میدان دید حسگر لیدار نصب شده در مرکز سقف [۸]

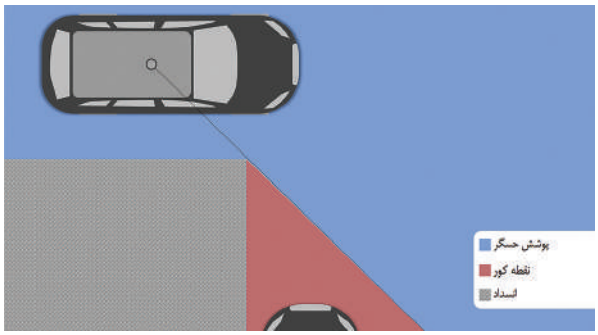
۳-۳- عبور با انسداد

برای کاهش خطر برخورد هنگام ورود به یک تقاطع مسدود، بسیار مهم است که بتوان به سرعت، خطوط عبور متقاطع را به‌عنوان مثال با حسگرهایی که در جلوی خودرو نصب شده‌اند، مشاهده کرد[۲۳]. در شکل (۴)، حسگر نصب شده در مرکز نمی‌تواند ترافیکی را که از یک خط عبور متقاطع مسدود می‌آید، درک

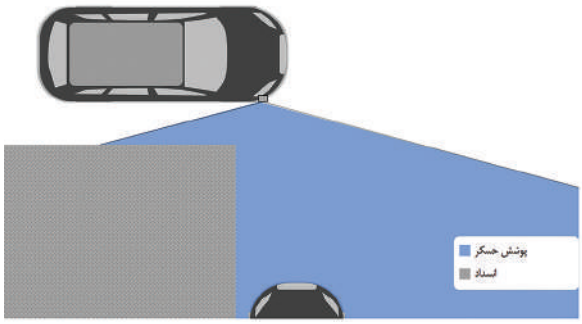
جدول ۱: الگوهای به کار رفته در خودروهای خودران موجود

نام	لیدار تک در سقف	لیدارهای متعدد در سقف	لیدار جلو	لیدار عقب	لیدارهای جانبی	دوربین‌ها در ضلع‌های سقف	دوربین‌ها در گوشه‌های سقف	برج دوربین مرکزی	دوربین جلو	دوربین زاویه باز در جلو	پوشش ۳۶۰ درجه رادار	رادار جلو	رادار عقب
[3] Waymo	✓		✓	✓	✓			✓			✓		
[10] BMW			✓						✓		✓	✓	
[11] Nissan									✓		✓	✓	
[12] Ford	✓							✓			✓	✓	
General Motors [13]		✓			✓			✓	✓		✓	✓	✓
[14] Aptiv			✓	✓	✓				✓		✓	✓	✓
[4] Tesla									✓	✓		✓	
Mercedes-Benz [15]		✓					✓		✓		✓	✓	
[16] Bosch			✓			✓			✓		✓	✓	
[17] Zoox		✓					✓		✓		✓		✓
[5] Nuro	✓							✓	✓		✓	✓	✓
[18] Pony.ai	✓		✓			✓			✓	✓	✓	✓	✓
[19] Baidu	✓		✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓
[20] Aurora	✓	✓		✓	✓	✓			✓		✓		
[21] Apple		✓				✓	✓		✓		✓	✓	
[22] Uber	✓					✓			✓			✓	

کند اما در شکل (۵) حسگر رو به جانب و نزدیک به جلوی خودرو می‌تواند به خط عبور متقاطع نگاه کند و ترافیک عبوری را تشخیص دهد.



شکل ۴: عدم درک ترافیک آمده از خط عبور متقاطع مسدود توسط حسگر نصب شده در مرکز [۸]



شکل ۵: تشخیص ترافیک عبوری توسط حسگر رو به جانب و نزدیک به جلو [۸]

۳-۴- مانع کم ارتفاع در کنار خودرو

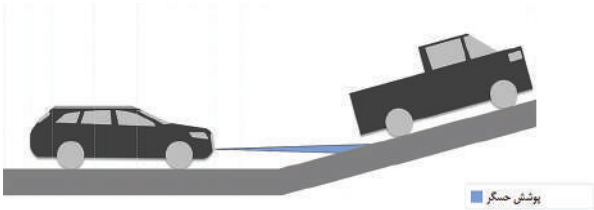
موانع کم‌ارتفاع هنگام استفاده از حسگرهایی با میدان دید عمودی کم، یک چالش هستند زیرا یا نادیده گرفته می‌شوند یا روی عوامل ترافیک پشت خود سایه می‌اندازند [۲۴]. در شکل (۶)، یک مانع کم‌ارتفاع توسط حسگر نادیده گرفته شده است زیرا ارتفاع آن بسیار کوتاه است. همچنین در شکل (۷)، یک مانع نزدیک و کم‌ارتفاع، ترافیک پشت خود را به طور کامل مسدود کرده است.

شکل ۶: نادیده گرفته شدن مانع کم‌ارتفاع توسط حسگر [۸]

شکل ۷: مسدود شدن ترافیک توسط مانع نزدیک و کم‌ارتفاع [۸]

۳-۵-شیب

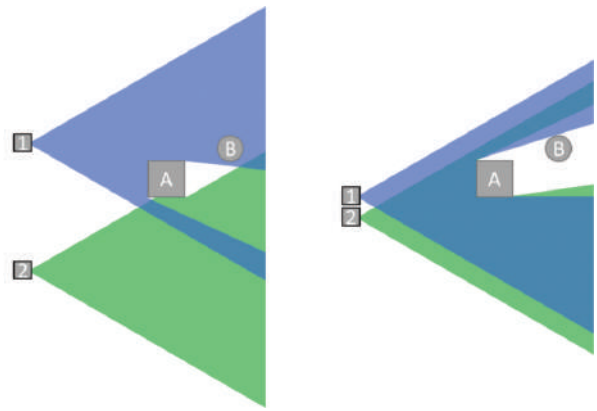
شیب تأثیر عمده‌ای در الزامات میدان دید عمودی حسگرها دارد. هنگام نزدیک شدن به سطوح شیبدار یا زیرگذرها، پوشش سایر عوامل ترافیک کاهش می‌یابد. علاوه بر این، هندسه سطح جاده نیز باید برای تشخیص اشیاء، جبران شود. در غیر این صورت رمپ‌ها به عنوان موانع طبقه‌بندی می‌شوند و موانع واقعی خارج از میدان دید، از دست می‌روند [۲۵]. تقاطع‌هایی با خطوط عبور صعودی یا نزولی به طور ویژه چالش‌برانگیز هستند. در شکل (۸)، سطح شیب‌دار در جلوی خودرو به اشتباه به‌عنوان یک مانع تفسیر می‌شود، در حالی‌که خودروی دوم به هیچ وجه تحت پوشش حسگر نیست.



شکل ۸: تفسیر سطح شیب‌دار در جلوی خودرو به‌عنوان مانع [۸]

۳-۶- تجمیع[۴] حسگرها

وقتی حسگرها جدا از یکدیگر نصب شوند، دید متفاوتی نسبت به محیط خودرو خواهند داشت (اختلاف منظر) که ممکن است منجر به وضعیتی شود که در آن یک حسگر، یک شیء را درک کند، در حالی که این شیء برای حسگر دیگر مسدود باشد. این موضوع یک چالش برای حسگرآمیزی[۵] است: برای آمیزش سطح بالا (آمیزش داده‌های پردازش شده)، تشخیص‌های متناقضی از حسگرها وجود خواهد داشت. برای آمیزش سطح پایین (آمیزش داده‌های حسگر خام)، اختلاف منظر در مناطقی ایجاد می‌شود که نمی‌توانند بین حسگرها مطابقت داشته باشند و در نتیجه «حفره‌هایی» در داده‌های حسگر آمیخته شده، به وجود می‌آیند. این تأثیرات به طور ویژه برای محیط نزدیک، بسیار شدید است. برای کاهش این مسائل، انواع مختلف حسگر، به ویژه دوربین و لیدار، معمولاً با هم تجمیع می‌شوند و حسگرها تا حد ممکن به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا میدان دید آن‌ها با هم هم‌پوشانی داشته باشد [۲۶]. در شکل (۹) سمت چپ، مانع B توسط حسگر ۱ درک می‌شود اما این مانع برای حسگر ۲ مسدود است. در شکل سمت راست، با نزدیک شدن حسگرها به یکدیگر، اختلاف منظر آنها نیز از بین می‌رود.



شکل ۹: جمع کردن حسگر [۸]

۳-۷- پوشش و افزونگی[۶]

بسته به درجه خودرانی در نظر گرفته شده برای خودرو و دامنه طراحی عملیاتی آن، الزامات نسبت به مجموعه حسگر بسیار

متفاوت است. برای ویژگی حفظ خط عبور بزرگراه با نظارت راننده، یک رادار و دوربین رو به جلو می‌تواند کافی باشد. برای رانندگی خودکار در محیط‌های شهری، پوشش افقی ۳۶۰ درجه در هر سه نوع اصلی حسگر (دوربین، لیدار و رادار) مورد نیاز است تا بتوان در سناریوهای مربوطه، در عین استفاده از حالت‌های مختلف، برای جبران نقاط ضعف مربوطه، به طور قابل اعتمادی، عوامل ترافیک را تشخیص داد[۲۷]. در واقع، پوشش ۳۶۰ درجه لازم است، اما کافی نیست. یک لیدار چرخشی ۳۶۰ درجه در بالای خودرو برای تشخیص موانع در بسیاری از موارد کافی نیست و باید با لیدارهای بیشتری تکمیل شود.

۳-۸- ملاحظات تجاری

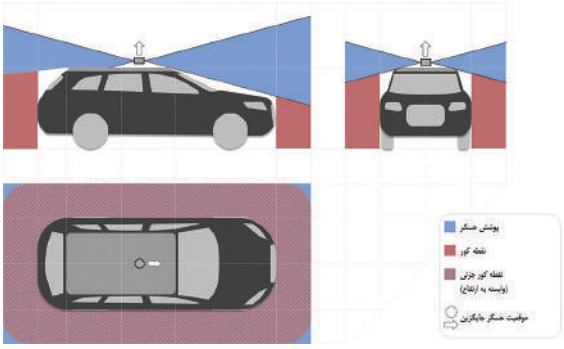
حل یک دامنه طراحی عملیاتی، امکان ارائه یک محصول را فراهم می‌کند. این که مورد تجاری مثبتی برای این محصول وجود داشته باشد یا خیر، به بسیاری از عوامل بستگی دارد، مانند ماهیت خدمات ارائه شده توسط خودروی خودران، منطقه ارائه خدمات و .... در این مقاله به بررسی ملاحظات تجاری پرداخته نمی‌شود، اما برای طراحی مجموعه حسگر، این موضوع بسیار مهم است. جدا از مشارکت حسگرها در حل دامنه طراحی عملیاتی؛ هزینه، قابلیت اطمینان و مقیاس‌پذیری تولید از عوامل تعیین کننده برای استفاده و استقرار در ناوگان بزرگ هستند [۲۸].

۴- لیدار

لیدارها فناوری به نسبت جدیدی در صنعت خودرو هستند. این حسگرها قبلاً بیشتر در رباتیک متداول بودند. با پیشرفت سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده[۷] و رانندگی خودکار، این مورد در حال تغییر است. در حالی که خودروهای خودران اولیه از لیدارهایی با وضوح پایین استفاده می‌کردند، لیدارهایی با وضوح بالا و امکان شناسایی در برد و حتی طبقه‌بندی موارد شناسایی شده، در حال حاضر برای خودروهای خودران با بودجه حسگر زیاد، اختصاص داده شده‌اند [۲۹]. یک مساله مهم در مورد لیدار، مشکل در بازسازی داده‌های ابر نقاط[۸] در شرایط آب و هوایی نامناسب و گرد و غبار و مساله دیگر حجیم و گران بودن آن است [۳۰]. در ادامه موقعیت‌های مختلف نصب لیدار و مزایا و معایب هر کدام توضیح داده شده می‌شود.

۴-۱- لیدار تک در مرکز سقف

در شکل (۱۰)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۰: لیدار تک در مرکز سقف [۸]

حالت‌های جایگزین

- حسگر را می‌توان بالا برد تا نقطه کور ناشی از انسداد سقف را کاهش داد.
- حسگر را می‌توان از مرکز سقف به لبه جلوی سقف منتقل کرد که باعث بهبود درک جلو و در عین حال کاهش درک عقب می‌شود.

مزایا

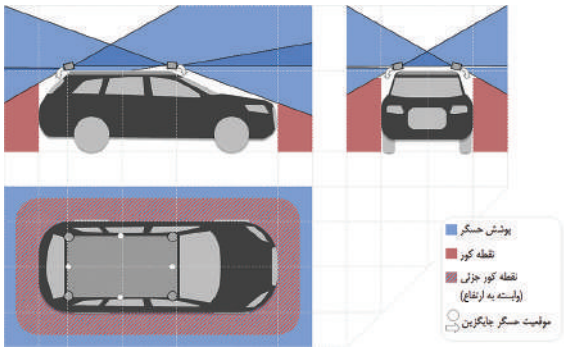
- نصب ساده، هیچ تلاشی برای همگام‌سازی و تراز کردن ابر نقاط لازم ندارد.
- پوشش ۳۶۰ درجه با یک حسگر.
- نمای کلی خوب، توانایی جستجوی سایر عوامل ترافیک.

معایب

- نقاط کور برای اشیاء با ارتفاع کم در همه جهات، به خصوص در عقب.
- حسگر برای ارتقاء میدان دید عمودی باید از سقف بالاتر برود. موقعیت بالا باعث ایجاد چالش‌های مکانیکی در صورت کاهش ناگهانی سرعت می‌شود و ورود به مناطقی با ارتفاع کم را غیر ممکن می‌کند.

۴-۲- لیدارهای متعدد در سقف

در شکل (۱۱)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۱۱: لیدارهای متعدد در سقف [۸]

حالت‌های جایگزین

- حسگرها می‌توانند کج شوند تا نقاط کور کاهش یابند.
- حسگرها را می‌توان روی لبه‌های سقف خودرو نصب کرد یا با حسگرهای اضافی روی سقف تکمیل کرد.

مزایا

- عدم انسداد توسط سقف خودرو.
- حسگرهای کج در بین پیکربندی‌های نصب شده روی سقف به پوشش بهینه می‌رسند [۳۱].

معایب

- پیچیدگی بیشتر از نظر یکپارچگی و آمیزش نقاط ابری در مقایسه با حسگر تک.
- کج کردن حسگرها توسط میدان دید عمودی آن‌ها محدود می‌شود. کجی کم منجر به ایجاد نقاط کور در نزدیکی خودرو می‌شود در حالی که کجی زیاد، پوشش روی اشیاء بلند را محدود می‌کند.

۴-۳- لیدار در جلو

در شکل (۱۲)، این حالت نشان داده شده است.

حالت‌های جایگزین

- لیدارهایی با میدان دید عمودی بزرگتر، عمل در شیب‌های تندتر را امکان‌پذیر می‌کنند.
- نقاط نصب بالاتر در پشت شیشه جلوی خودرو یا مرکز لبه

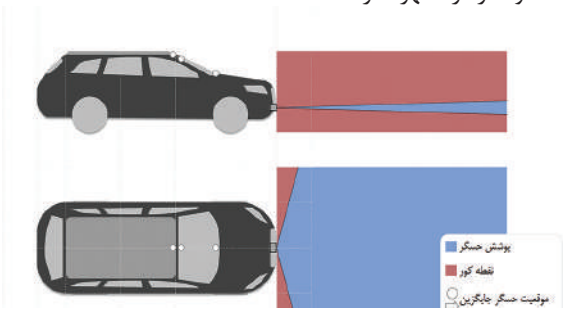
سقف جلو، امکان مشاهده بر فراز سایر عوامل ترافیک و موانع کم‌ارتفاع را با هزینه از دست دادن موانع کم‌ارتفاع نزدیک فراهم می‌کند.

مزایا

- نصب ساده و یکپارچگی خوب در خودرو.
- روی سطح صاف: پرتوهای لیدار تقریباً موازی با سطح جاده هستند. از این رو هیچ بازتابی از سطح جاده بر نمی‌گردد. این موضوع امکان تفسیر مقدار بازگردانده شده را به طور مستقیم به عنوان فاصله فراهم می‌کند.
- برای تشخیص خودروهای روبه‌رو در بزرگراه‌ها مناسب است.

معایب

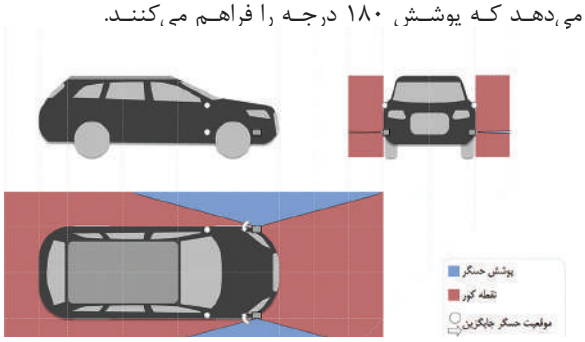
- در شیب‌ها؛ حسگر، صفحه زمین را به عنوان مانع برای جاده‌های صعودی و هیچی را برای جاده‌های نزولی باز می‌گرداند.
- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کافی برای رانندگی خودکار در شهر ندارد.



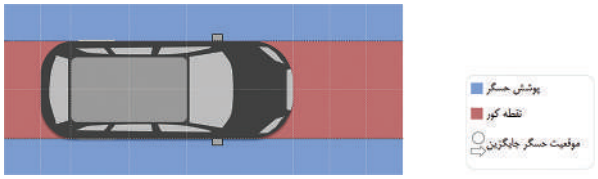
شکل ۱۲: لیدار در جلو [۸]

۴-۴- لیدارهای جانبی

در شکل (۱۳)، این حالت نشان داده شده است. شکل (۱۴) نیز لیدارهای ۳۶۰ درجه بیرون زده در کناره‌های خودرو را نشان می‌دهد که پوشش ۱۸۰ درجه را فراهم می‌کنند.



شکل ۱۳: لیدارهای جانبی [۸]



شکل ۱۴: لیدارهای ۳۶۰ درجه بیرون زده [۸]

حالت‌های جایگزین

- لیدارهایی با میدان دید افقی و عمودی بیشتر، امکان پوشش کامل کناره‌های خودرو را فراهم می‌کنند.
- موقعیت‌های مختلف: موقعیت پشت چرخ جلو می‌تواند یکپارچگی را ساده کند. موقعیت زیر آینه جانبی امکان مشاهده بر فراز موانع کم‌ارتفاع را فراهم می‌کند.

مزایا

- سناریوی عبور با انسداد را امکان‌پذیر می‌کند: خودرو می‌تواند ترافیک متقاطع را در تقاطع‌ها، بدون ورود و مسدود کردن ترافیک، شناسایی کند.

معایب

- حسگر با میدان دید عمودی کم دارای مشکلاتی در ارتباط با شیب است.

۵- دوربین

دوربین‌ها، برخلاف لیدارها، رادارها و حسگرهای فراصوت، حسگرهایی غیرفعال هستند که نور منعکس شده از محیط را جمع می‌کنند. در حالی که دوربین‌ها وضوح نسبی بالایی دارند، داده‌های آن‌ها تحت تأثیرات مختلف محیطی (تاریکی، باران، مه، آفتاب کم، اسپری، برف، گرد و غبار و ...) قرار دارند. داده‌های دوربین باید توسط الگوریتم‌های بینایی رایانه‌ای گران‌قیمت یا یادگیری عمیق، تفسیر شوند تا اطلاعات مفیدی برای سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده و رانندگی خودکار فراهم شود، در حالی که داده‌های حسگرهای اندازه‌گیری فاصله مانند لیدار می‌توانند (تقریباً) همان طوری که هستند برای جلوگیری از برخورد استفاده شوند. از جنبه مثبت، داده‌های دوربین (پس از تفسیر) غنی‌ترین نمایش معنایی را از محیط خودرو ارائه می‌دهند [۳۲]، اما از جنبه منفی، دوربین‌ها دارای محدودیت در تشخیص اشیاء در فاصله زیاد و همچنین دقت کم در برآورد فاصله و سرعت طولی آن‌ها هستند [۳۳].

دوربین‌هایی با زاویه دید عریض (چشم‌ماهی) میدان دید بزرگی دارند، اما تصاویر آن‌ها تحت اعوجاج[۹] لنز قرار می‌گیرند که باید قبل از پردازش بیشتر، اصلاح شوند. اصلاح اعوجاج لنز، قسمت‌هایی از تصویر را از بین می‌برد و در نتیجه میدان دید را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ممکن است نواحی نزدیک به لبه‌های تصویر، تار شوند و برای کارهای تشخیص تصویر، از اطمینان کمتری برخوردار شوند [۳۴].

۵-۱- دوربین‌های زاویه باز روی سقف

بسیاری از خودروها مجهز به مجموعه‌ای از دوربین‌های زاویه دید عریض هستند تا بتوانند دید پرنده‌ای[۱۰] از محیط نزدیک خودرو ایجاد کنند که پارک کردن را آسان‌تر می‌کند. به طور معمول، با نصب چندین دوربین ۱۸۰ درجه روی خودرو، به پوشش ۳۶۰ درجه با دوربین می‌رسیم. برای سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده، دوربین‌ها در اطراف بدنه خودرو (سپر جلو، آینه‌ها، درب صندوق عقب) نصب می‌شوند، در حالی که برای رانندگی خودکار، آن‌ها روی سقف خودرو، به عنوان مثال در مراکز لبه سقف، نصب می‌شوند [۳۵]. شکل (۱۵)، پوشش ۳۶۰ درجه این دوربین‌ها را نشان می‌دهد.

حالت‌های جایگزین

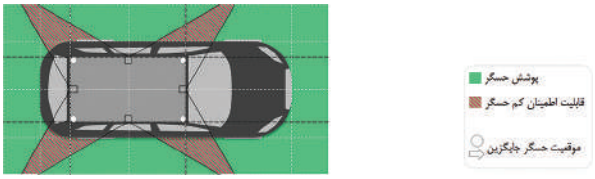
- دوربین‌ها می‌توانند کج شوند تا محیط نزدیک اطراف خودرو را بهتر بپوشانند.
- دوربین‌ها را می‌توان به‌جای مراکز لبه سقف، در گوشه‌های خودرو، یا به صورت «برج دوربین» مرکزی، مانند شکل (۱۷) نصب کرد.

مزایا

- پوشش ۳۶۰ درجه.
- برای پشتیبانی از پارک کردن، نمای از بالا را امکان‌پذیر می‌کند.

معایب

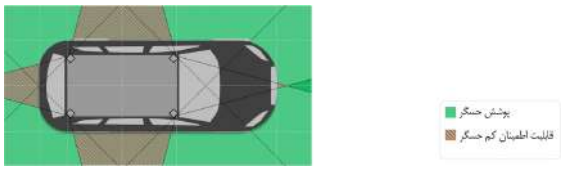
- دوربین‌های ۱۸۰ درجه تحت اعوجاج شدید لنز قرار می‌گیرند.
- وضوح دوربین‌ها در یک منطقه بزرگ پخش می‌شود و وضوح به نسبت کمی را در هر درجه به دست می‌آورد که دامنه تشخیص جسم را به طور مؤثر محدود می‌کند.



شکل ۱۵: پوشش ۳۶۰ درجه دوربین‌های روی سقف [۸]

۵-۲- دوربین‌ها در گوشه‌های سقف

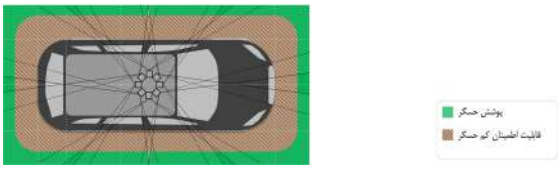
دوربین‌های موجود در گوشه‌های سقف در مقایسه با دوربین‌های موجود در مراکز لبه سقف، مناطق بزرگتری را با قابلیت اطمینان حسگر پایین نشان می‌دهند (بستگی زیادی به ابعاد خودرو دارد). علاوه بر این، نمای بسیار مهم جلوی خودرو توسط قسمت‌های بیرونی میدان دید دوربین پوشانده می‌شود. برای حداقل اعوجاج، نمای جلو باید در محور نوری[11] دوربین قرار بگیرد [۳۴]. شکل (۱۶)، دوربین‌ها را در گوشه‌های سقف نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: دوربین‌ها در گوشه‌های سقف [۸]

۵-۳- برج دوربین مرکزی

به جای دوربین‌های ۱۸۰ درجه، دوربین‌های ۱۲۰ درجه‌ای که کمتر تحت تأثیر اعوجاج لنز قرار می‌گیرند، می‌توانند به صورت «برج دوربین» روی مرکز سقف نصب شوند. این کار می‌تواند با یک لیدار ۳۶۰ درجه مرکزی ترکیب شود تا یک ماژول حسگر جمع و جور تشکیل شود. همان طور که برای لیدارها توضیح داده شد، حسگرهای نصب شده در این پیکربندی نمی‌توانند اجسام مسدود شده توسط سقف را مشاهده کنند. شکل(۱۷)، برج دوربین مرکزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: برج دوربین مرکزی [۸]

۵-۴- دوربین جلو

دوربین‌های جلو، حسگر اصلی (و اغلب تنها حسگر) تشخیص محیط در خودروهای فعلی هستند. این حسگرها به نسبت ارزان هستند اما انواع مختلفی از سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را امکان‌پذیر می‌کنند –اگرچه به دلیل حساسیت نسبت به شرایط محیطی، مانند همه دوربین‌ها، محدود هستند. شکل(۱۸)، دوربین جلو را نشان می‌دهد.

حالت‌های جایگزین

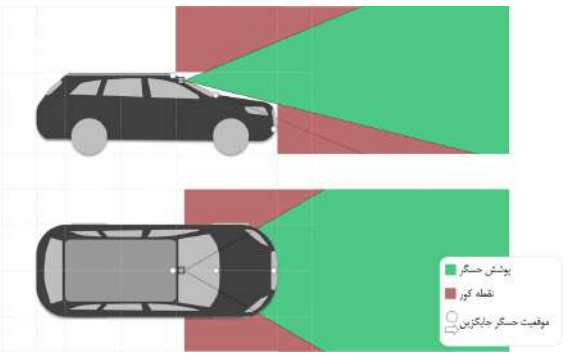
- دوربین‌های جلو به طور معمول بین آینه عقب و شیشه جلو نصب می‌شوند. شیشه جلو، دوربین را محافظت می‌کند و توسط برف پاک‌کن‌ها تمیز می‌شود.
- همچنین می‌توان دوربین‌های جلو را در داخل خودرو بین داشبورد و شیشه جلوی خودرو یا در خارج خودرو روی سپر یا در مرکز لبه سقف خودرو نصب کرد.
- دوربین‌های استریو[12] می‌توانند تخمین فاصله را ارائه دهند.

مزایا

- دوربین‌های جلو از چراغ‌های جلوی خودرو در شب بهره می‌برند.
- ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را مانند هشدار خروج از خط عبور، امکان‌پذیر می‌کند.
- اگر پشت شیشه جلو نصب شود در برابر باران و خاک محافظت می‌شود.

معایب

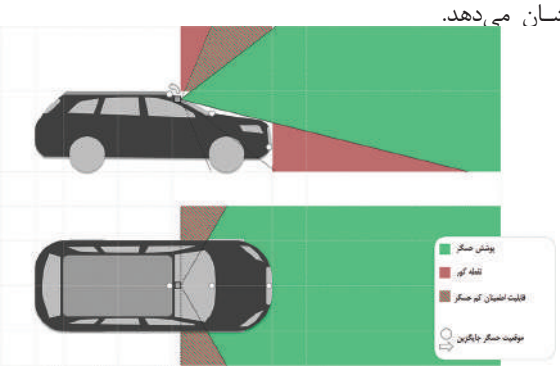
- میدان دید عمودی توسط کاپوت خودرو محدود می‌شود، از این رو اجسام کوچک جلوی خودرو مسدود می‌شوند (مگر این که دوربین روی سپر جلو نصب شده باشد).
- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کلی کافی برای رانندگی خودکار شهری فراهم نمی‌شود.



شکل ۱۸: دوربین جلو [۸]

۵-۵- دوربین زاویه باز

سامانه‌های دوربین جلو و دوربین دید فراگیر به طور معمول به دلیل محدود بودن میدان دید عمودی قادر به تشخیص اجسام نزدیک و مرتفع مانند چراغ‌های راهنمایی و رانندگی نیستند. با افزودن یک دوربین زاویه باز نصب شده در مرکز لبه جلوی سقف، این مسئله قابل حل است. بسته به موقعیت چراغ‌های راهنمایی و رانندگی در محیط هدف، ممکن است لازم باشد که این دوربین‌ها به سمت بالا متمایل شوند [۳۶]. شکل (۱۹)، دوربین زاویه باز را نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: دوربین زاویه باز برای تشخیص چراغ راهنمایی [۸]

۵-۶- حسگرهای بینایی جایگزین

جدا از پیکربندی‌های مبتنی بر دوربین‌های تک‌چشمی که در بالا بحث شد، چندین حسگر جالب دیگر نیز برای درک بینایی وجود دارند:

- دوربین‌های استریو، تخمین مسافت را از طریق بازسازی سه بعدی ارائه می‌دهند [۳۷].
- دوربین‌های حرارتی در شب و تحت شرایط چالش‌برانگیز، دقت تشخیص بهتری را امکان‌پذیر می‌کنند [۳۸].
- دوربین‌های با نرخ فریم بالا، ردیابی و تشخیص اشیاء در حال حرکت را به شدت ساده می‌کنند [۳۹].
- دوربین‌های رویدادی[۱۳]، پهنای باند مورد نیاز برای انتقال داده را کاهش می‌دهند و مسیر واکنشی با تأخیر کمی را برای جلوگیری از برخورد فراهم می‌کنند [۴۰].

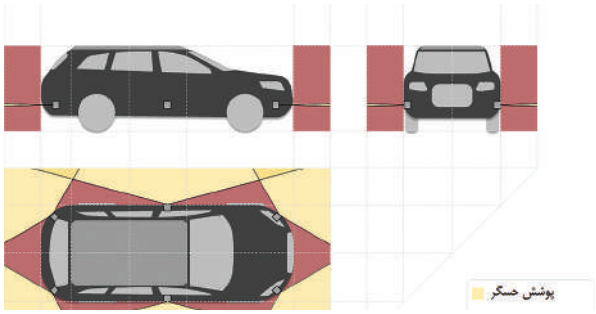
۶- رادار

رادارها در حال حاضر در صنعت خودرو استفاده می‌شوند. این حسگرها از سال‌ها قبل در خودروها به کار گرفته می‌شدند تا ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را، مانند کروز کنترل تطبیقی و ترمزگیری اضطراری پیشرفته، فراهم کنند.

رادارها فاصله و سرعت شعاعی را به طور دقیق اندازه‌گیری می‌کنند. این حسگرها به ویژه در تشخیص اشیاء فلزی خوب هستند و همچنین قادر به شناسایی اجسام غیر فلزی مانند عابران پیاده با برد کمتر هستند [۴۱]، اما دارای دقت کم در برآورد زاویه هدف و در نتیجه موقعیت و سرعت عمود بر بُعد بُرد خود هستند و برای دست‌یابی به وضوح زاویه‌ای بیشتر، باید از روش‌های مختلف پردازش سیگنال استفاده شود [۴۲].

۶-۱- پوشش ۳۶۰ درجه رادارهای میان‌برد و کوتاه‌برد

در شکل (۲۰)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۲۰: پوشش ۳۶۰ درجه با رادارهای میان‌برد و کوتاه‌برد [۸]

مزایا

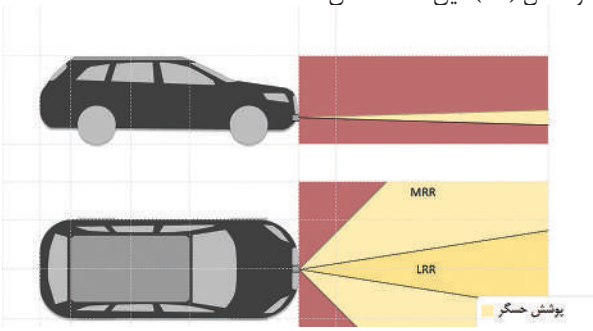
- مجموعه‌ای از ۴ تا ۶ رادار کوتاه‌برد (برد تقریبی ۳۰ متر) و میان‌برد (برد تقریبی ۱۰۰ متر) برای رسیدن به ۳۶۰ درجه پوشش افقی و حل بسیاری از سناریوهای معمول در دامنه‌های طراحی عملیاتی شهری کافی است.
- این حالت، افزونگی برای لیدار و دوربین فراهم می‌کند و در برابر شرایط چالش‌برانگیز محیط مقاوم‌تر است [۴۳].

معایب

- میدان دید عمودی باریک رادارهای معمولی خودرو هنگام مواجهه با زمین‌های غیر مسطح، چالش‌های شدیدی ایجاد می‌کند.

۶-۱- رادار جلو

در شکل (۲۱)، این حالت نشان داده شده است.



شکل ۲۱: رادار جلو [۸]

مزایا

- رادارهای میان‌برد (برد تقریبی ۱۰۰ متر) و دوربرد (برد تقریبی ۲۵۰ متر) ویژگی‌های سامانه‌های پیشرفته کمک‌راننده را، مانند کروز کنترل تطبیقی و ترمزگیری اضطراری مستقل امکان‌پذیر می‌کنند.
- نسبت به لیدار و دوربین در برابر شرایط محیطی چالش‌برانگیز مانند باران، مه و برف مقاوم‌تر است [۴۳].

معایب

- اگر با حسگرهای دیگر ترکیب نشود، پوشش کلی کافی برای رانندگی خودکار شهری ندارد.

۷-نتیجه‌گیری

حس کردن برای خودروهای خودران مانند حس کردن برای موجودات زنده است – هیچ پیکربندی حسگر کاملی وجود ندارد که در همه محیط‌ها غالب باشد و متناسب با همه بودجه‌ها باشد. دامنه محصولات حسگر موجود به سرعت در حال افزایش است و پیکربندی‌های متعددی وجود دارند که کار حس کردن را با مزایا و معایب مربوطه انجام می‌دهند.

فراهم آوردن پیش‌زمینه در مورد طراحی مجموعه حسگر و بررسی الگوهای تکراری برای حالت‌های مختلف حسگر در این مقاله، برای ارائه یک پاسخ مطلق مورد نظر نبود. در عوض قرار بود که روند تفکر طراحی مجموعه حسگر انتقال یابد و درک منطق در پشت پرده انتخاب حسگر را امکان‌پذیر کند.

گام بعدی برای آشنایی بیشتر با حسگرهای رانندگی خودکار، نگاه عمیق‌تری به فناوری حسگر و محصولات حسگری است که در حال حاضر در بازار وجود دارد.

پی‌نوشت‌ها

1Inertial Measurement Unit
2 Connected Vehicle
3 Operational Design Domain
4 Colocation
5 Sensor Fusion
6 Redundancy
7Advanced Driver Assistance Systems
8 Point Cloud
9 Distortion
10 Bird View
11Optical Axis
12 Stereo Cameras
13 Event Cameras

مراجع

[1] J. Hu, P. Bhowmick, F. Arvin, A. Lanzon and B. Lennox, "Cooperative Control of Heterogeneous Connected Vehicle Platoons: An Adaptive Leader-Following Approach," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 977-984, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2966412.

[2] Taeihagh, Araz; Lim, Hazel Si Min (2 January 2019). "Governing autonomous vehicles: emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks". Transport Reviews. 39 (1): 103–128.

[3] Waymo, L. L. C. "On the road to fully self-driving." Waymo Safety Report (2020): 1-48.

[4] Tesla Inc. "Tesla Vehicle Safety Report." Tesla Vehicle Safety Report.

[5] Nuro. "Delivering Satety: Nuro's Approach." Nuro Safety Report: 1-33.

[6] Gupta, S. and Snigdh, I., 2022. Multi-sensor fusion in autonomous heavy vehicles. In Autonomous and Connected Heavy Vehicle Technology (pp. 375-389). Academic Press.

[7] Chen, Qiping, et al. "Sensing System of Environmental Perception Technologies for Driverless Vehicle: A Review of State of the Art and Challenges." Sensors and Actuators A: Physical (2021): 112566.

[۸] مهدی قاضی‌زاده، بهنام بهادری، «کاربرد حسگرها در خودروهای خودران»، سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران، ۱۳۹۹

[9] Q. Deng, X. Li, P. Ni, H. Li and Z. Zheng, "Enet-CRF-Lidar: Lidar and Camera Fusion for Multi-Scale Object Recognition," in IEEE Access, vol. 7, pp. 174335-174344, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956492.

[10] Autonomous Driving, Accessed on 1 January 2021; https://www.bmwgroup.com/en/innovation/technologies-and-mobility/autonomes-fahren.html.

[11] Nissan's Self-Driving Car, Accessed on 1 January 2021; https://www.nissanusa.com/experience-nissan/news-and-events/self-driving-autonomous-car.html.

[12] Autonomous Vehicles, Accessed on 1 January 2021; https://corporate.ford.com/operations/autonomous-vehicles.html.

[13] Putting Self-Driving Cars On The Roads, Accessed on 1 January 2021;https://www.gm.com/our-stories/self-driving-cars.html.

[14] The Autonomous Driving Platform, Accessed on 1 January 2021; https://www.aptiv.com/en/insights/autonomous-driving.

[15] Autonomous, Accessed on 1 January 2021; https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/autonomous./

[16] Self-driving car technology – Between man and machine, Accessed on 1 January 2021; https://www.bosch.com/stories/autonomous-driving-interview-with-moritz-dechant./

[17] Zoox, inc., Accessed on 1 January 2021; https://www.zoox.com./

[18] Pony.ai, Accessed on 1 January 2021; https://www.pony.ai./

[19] Apollo, Accessed on 1 January 2021; https://www.apollo.auto./

[20] Aurora, Accessed on 1 January 2021; https://www.aurora.tech./

[21] Harris, Mark (14 August 2015). Documents Confirm Apple Is Building Self-Driving Car. The Guardian. Accessed on 1 January 2021, https://www.theguardian.com/technology/2015/aug/14/apple-self-driving-car-project-titan-sooner-than-expected.

[22] Griswold, Alison (19 April 19 2019), Uber raised $1 billion for self-driving cars because it desperately needs the money, Quartz. Accessed on 1 January 2021, https://qz.com/1599134/uber-secures-much-needed-1-billion-investment-for-self-driving-cars-unit./

[23] Y. Zhang, X. Sun, H. Xu and E. Yao, "Tracking Multi-Vehicles With Reference Points Switches at the Intersection Using a Roadside LiDAR Sensor," in IEEE Access, vol. 7, pp. 174072-174082, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953747.

[24] Li, J., Li, R., Wang, J. and Yan, M., 2019. Obstacle information detection method based on multiframe three-dimensional lidar point cloud fusion. Optical Engineering, 58(11), p.116102.

[25] Y. Sun, W. Zuo, H. Huang, P. Cai and M. Liu, "PointMoSeg: Sparse Tensor-Based End-to-End Moving-Obstacle Segmentation in 3-D Lidar Point Clouds for Autonomous Driving," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 510-517, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2020.3047783.

[26] Zhao, Y., Bai, L., Zhang, Z. and Huang, X., 2021. A surface geometry model for LiDAR depth completion. IEEE Robotics and Automation Letters, 6(3), pp.4457-4464.

[27] J. Dybedal and G. Hovland, "GPU-Based Optimisation of 3D Sensor Placement Considering Redundancy, Range and Field of View," 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020, pp. 1484-1489, doi: 10.1109/ICIEA48937.2020.9248170.

[28] Skrickij, V., Šabanovič, E. and Žuraulis, V., 2020. Autonomous road vehicles: recent issues and expectations. IET Intelligent Transport Systems, 14(6), pp.471-479.

[29] T. -H. Kim and T. -H. Park, "Placement Optimization of Multiple Lidar Sensors for Autonomous Vehicles," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 21, no. 5, pp. 2139-2145, May 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2915087.

[30] C. -P. Hsu et al., "A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 1-16, Jan.-Feb. 2021, Art no. 8300416, doi: 10.1109/JSTQE.2020.3022948.

[31] F. Berens, S. Elser and M. Reischl, "Genetic Algorithm for the Optimal LiDAR Sensor Configuration on a Vehicle," in IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 3, pp. 2735-2743, 1 Feb.1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3136362.

[32] Vijay, R., Cherian, J., Riah, R., De Boer, N. and Choudhury, A., 2021, September. Optimal Placement of Roadside Infrastructure Sensors towards Safer Autonomous Vehicle Deployments. In 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC) (pp. 2589-2595). IEEE.

[33] B. Miethig, Y. Huangfu, J. Dong, J. Tjong, M. Von Mohrenschildt and S. Habibi, "A Novel Method for Approximating Object Location Error in Bounding Box Detection Algorithms Using a Monocular Camera," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 9, pp. 8682-8691, Sept. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3097589.

[34] V. Ravi Kumar et al., "OmniDet: Surround View Cameras Based Multi-Task Visual Perception Network for Autonomous Driving," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 2830-2837, April 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3062324.

[35] E. Marti, M. A. de Miguel, F. Garcia and J. Perez, "A Review of Sensor Technologies for Perception in Automated Driving," in IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 94-108, winter 2019, doi: 10.1109/MITS.2019.2907630.

[36] J. Müller, A. Fregin and K. Dietmayer, "Multi-camera system for traffic light detection: About camera setup and mapping of detections," 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017, pp. 165-172, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317946.

[37] H. Zhang, H. Shishido and I. Kitahara, "Superimposition of 3D Dynamic Objects on a Static Environment for Driver Assistance System," 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), 2021, pp. 479-483, doi: 10.1109/GCCE53005.2021.9622079.

[38] Z. Chen and X. Huang, "Pedestrian Detection for Autonomous Vehicle Using Multi-Spectral Cameras," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, vol. 4, no. 2, pp. 211-219, June 2019, doi: 10.1109/TIV.2019.2904389.

[39] H. Rebecq, R. Ranftl, V. Koltun and D. Scaramuzza, "High Speed and High Dynamic Range Video with an Event Camera," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 43, no. 6, pp. 1964-1980, 1 June 2021, doi: 10.1109/TPAMI.2019.2963386.

[40] H. Cao, G. Chen, J. Xia, G. Zhuang and A. Knoll, "Fusion-Based Feature Attention Gate Component for Vehicle Detection Based on Event Camera," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 21, pp. 24540-24548, 1 Nov.1, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3115016.

[41] J. Nidamanuri, C. Nibhanupudi, R. Assfalg and H. Venkataraman, "A Progressive Review - Emerging Technologies for ADAS Driven Solutions," in IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, doi: 10.1109/TIV.2021.3122898.

[42] A. P. Sligar, "Machine Learning-Based Radar Perception for Autonomous Vehicles Using Full Physics Simulation," in IEEE Access, vol. 8, pp. 51470-51476, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977922.

[43] O. Bialer, A. Jonas and T. Tirer, "Super Resolution Wide Aperture Automotive Radar," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 16, pp. 17846-17858, 15 Aug.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3085677.

[44] T. Lee, V. Skvortsov, M. Kim, S. Han and M. Ka, "Application of W -Band FMCW Radar for Road Curvature Estimation in Poor Visibility Conditions," in IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 13, pp. 5300-5312, 1 July1, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2837875.

***