

## فراسوی GPS: موقعیت‌یابی بصری، سیستم مسیریابی مقاوم به تغییرات جغرافیایی

عارف برهانی<sup>۱</sup>، کاظم فولادی قلعه<sup>۲</sup>، احسان رزاقی‌زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی دانشکدگان فارابی دانشگاه تهران  
rf.borhani@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی دانشکدگان فارابی دانشگاه تهران؛ سرپرست آزمایشگاه پژوهشی فضای سایبر دانشگاه تهران  
kfouladi@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> متخصص حوزه یادگیری ماشینی و بینایی ماشین، تهران  
ehsanrazaghizade22@gmail.com

### چکیده

وابستگی فزاینده به سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) برای مسیریابی، یک آسیب‌پذیری بحرانی را در کاربردهای مختلف نشان داده است، به خصوص زمانی که سیستم‌های مسیریابی سنتی، مانند GPS، به دلیل عوامل مختلفی از جمله دستکاری سیگنال، سیگنال‌دهی ضعیف و موارد دیگر در دسترس نیستند. در پاسخ به این چالش، این مقاله پتانسیل «موقعیت‌یابی بصری» را به عنوان یک راه‌حل مسیریابی جایگزین بررسی می‌کند که در برابر محدودیت‌های جغرافیایی و دستکاری سیگنال قابل اتکا است. هدف این مقاله ارائه یک مرور جامع از تحقیقات موقعیت‌یابی بصری و بررسی قابلیت‌های آن در استفاده به‌عنوان یک راهکار مسیریابی قابل اعتماد است. این مقاله چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم‌های کنونی مبتنی بر GPS، اصول و تکنیک‌های زیربنایی اودومتری بصری، و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه را مورد بحث قرار می‌دهد. علاوه بر آن، این مقاله نتایج شبیه‌سازی‌های نشان‌دهنده اثربخشی موقعیت‌یابی بصری در سناریوهای مختلف دنیای واقعی را ارائه و ظرفیت آن را به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای سیستم‌های مسیریابی مبتنی بر GPS برجسته می‌کند.

**کلمات کلیدی:** بینایی ماشین، مسیریابی، موقعیت‌یابی بصری (VO)، سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS).

### ۱ مقدمه

در دنیای به سرعت در حال تحول امروزی، فن‌آوری مسیریابی نه تنها در زندگی روزمره ما، بلکه در کاربردهای حیاتی مانند عملیات‌های نظامی، پاسخ به بلایای طبیعی و خودروهای خودران نیز نقش محوری ایفا می‌کند.

در حالی که GPS (سیستم موقعیت‌یابی جهانی<sup>۱</sup>) فناوری پیشگام برای مسیریابی دقیق بوده است، اما این سیستم بدون آسیب‌پذیری نیست [۱]. این مقاله به یک راه‌حل مسیریابی نوظهور به نام موقعیت‌یابی بصری می‌پردازد و بررسی می‌کند که چگونه این فناوری می‌تواند نسبت به اتفاقات جغرافیاسیاسی<sup>۲</sup> مقاومت و قابلیت اطمینان فراهم کند و یک بازیگر مهم در زمینه فناوری مسیریابی باشد.

اودومتری بصری<sup>۳</sup>، که اغلب به آن VO گفته می‌شود، فناوری‌ای است که خودروها را قادر می‌سازد تا موقعیت و جهت خود را از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های بصری دوربین‌های متصل تعیین کنند [۱]. برخلاف سیستم‌های GPS سنتی که به سیگنال‌های ماهواره‌ای متکی هستند، VO از الگوریتم‌های بینایی کامپیوتری برای ردیابی و تفسیر نشانه‌های بصری از محیط اطراف استفاده می‌کند. این نشانه‌ها ممکن است شامل ویژگی‌هایی مانند علائم جاده، ساختمان‌ها و دیگر وسایل نقلیه در جاده باشند [۷].

در حالی که GPS برای سال‌ها یک ابزار قابل اعتماد برای مسیریابی بوده است، محدودیت‌های خاصی دارد که موقعیت‌یابی بصری به دنبال رفع آن‌ها است. در ادامه مزایای استفاده از موقعیت‌یابی بصری در سیستم‌های مسیریابی خودرو بررسی می‌شود:

- **تاب‌آوری جغرافیاسیاسی:** یکی از مهم‌ترین مزایای موقعیت‌یابی بصری انعطاف‌پذیری آن است. برخلاف GPS که به شبکه‌ای از ماهواره‌ها متکی است که می‌تواند توسط دولت‌های محلی مختل یا کنترل شوند، موقعیت‌یابی بصری به‌طور مستقل عمل می‌کند. این استقلال آن را در برابر مناقشات جغرافیاسیاسی و کشمکش‌های قدرت مصون می‌کند و عملکرد پایدار آن را حتی در زمان‌های پرتلاطم تضمین می‌کند.
- **ثبات در محیط‌های چالش‌برانگیز:** اتکای موقعیت‌یابی بصری به داده‌های بصری، آن را در محیط‌های چالش‌برانگیز بسیار قوی می‌کند. این سیستم می‌تواند در داخل خانه، زیر زمین یا در مناطقی که دسترسی به سیگنال‌های ماهواره‌ای ممکن نیست، عمل کند. این برتری موقعیت‌یابی بصری را برای کاربردهایی مانند ناوبری داخلی، ربات‌های خودمختار و عملیات استخراج زیرزمینی ایده‌آل می‌کند [۲۷].
- **حفظ بهتر حریم خصوصی:** نگرانی‌های حریم خصوصی مرتبط با ردیابی GPS به‌طور قابل توجهی با موقعیت‌یابی بصری کاهش می‌یابد. از آنجایی که این سیستم به سنسورها و دوربین‌ها متکی است، نیازی به انتقال داده‌های موقعیت به سرورهای خارجی نیست و کنترل بیشتری بر روی حریم خصوصی کاربران فراهم می‌کند [۲۷].

همچنان که در دنیا به جلو حرکت می‌کنیم، محدودیت‌های GPS آشکارتر می‌شوند. موقعیت‌یابی بصری به عنوان یک جایگزین قابل اعتماد ظاهر می‌شود که نه تنها این محدودیت‌ها را مورد توجه قرار می‌دهد بلکه مزایای بیشتری از نظر انعطاف‌پذیری جغرافیاسیاسی، قابلیت اطمینان و حریم خصوصی ارائه می‌دهد.

<sup>1</sup>Global Positioning System

<sup>2</sup>Geopolitical

<sup>3</sup>Visual Odometry

بخش اول مقاله (مقدمه)، نگرانی‌های رو به رشد مربوط به وابستگی به GPS در حوزه‌های مختلف را برجسته می‌کند و بر نیاز به راه‌حل‌های مسیریابی مستقل تاکید می‌کند. بخش دوم (مرور ادبیات) به طور منتقدانه پژوهش‌های اخیر در حوزه موقعیت‌یابی بصری را بررسی می‌کند و بینش‌هایی را در مورد پیشرفت در الگوریتم‌های VO، فناوری‌های حسگر و کاربردهای آنها ارائه می‌دهد. بخش سوم (سیستم پیشنهادی) یک مدل نوآورانه VO را معرفی می‌کند و اصول آن و نحوه یکپارچه‌سازی حسگرها را توضیح می‌دهد. در بخش چهارم (تحلیل و ارزیابی)، به جزئیات روش‌های استفاده شده برای ارزیابی عملکرد مدل می‌پردازیم و با استفاده از دو مجموعه داده متفاوت، عملکرد آن در سناریوهای دنیای واقعی را نشان می‌دهیم. در نهایت در بخش آخر (نتیجه‌گیری)، یافته‌های کلیدی را خلاصه می‌کنیم، بر پتانسیل موقعیت‌یابی بصری به عنوان یک راه‌حل مسیریابی انعطاف‌پذیر تاکید می‌کنیم و حوزه‌هایی را برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌دهیم.

## ۲ کارهای مشابه

ژان و ویراسکرا [۱۸] در پژوهش خود در مورد ترکیب یادگیری عمیق با هندسه اپیپولار در موقعیت‌یابی بصری بحث می‌کنند. آنها دو شبکه عصبی کانولوشنال را برای تخمین عمق‌های تک-نما و جریان‌های نوری دو-نما آموزش دادند. تحقیقات آنها منجر به توسعه یک الگوریتم قدرتمند اودمتری بصری فریم به فریم به نام DF-VO می‌شود که عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دیگر دارد و از مسائل شناوری مقیاس جلوگیری می‌کند.

لایدار فناوری‌ای است که از لیزر برای اندازه‌گیری فواصل و ایجاد نقشه‌های سه‌بعدی دقیق از اشیاء و محیط استفاده می‌کند [۲۸]. هانگ و ما [۱۹] در مقاله‌ی خود یک روش جدید با ترکیب موقعیت‌یابی بصری و لیدار معرفی می‌کنند که ویژگی‌های نقطه و خط را برای بهبود تخمین جایگاه دوربین ترکیب می‌کند. این روش شامل یک رویکرد قدرتمند برای استخراج عمق نقطه‌ای و خطی و افزایش دقت می‌باشد. موقعیت‌یابی بصری داده محور در صنایع مختلفی کاربرد دارد اما اغلب فاقد اطلاعات عدم قطعیت حیاتی برای اطمینان‌پذیری کامل است. در این مقاله کوستانت و مانچی [۲۰] شبکه عصبی عمیق جدیدی به نام UA-VO طراحی می‌کند که جایگاه فعلی دوربین را تخمین می‌زند و برای هر تخمین معیارهای عدم قطعیت را محاسبه می‌کند. دوربین‌های مبتنی بر رویداد به سرعت تغییرات روشنایی سطح پیکسل در یک صحنه را ثبت می‌کنند که شبیه به نحوه تشخیص حرکت چشم انسان است و پردازش اطلاعات بصری با سرعت بالا و دقیق را ممکن می‌کند [۲۸]. ژو و گالگو [۲۱] در مقاله خود یک راه‌حل برای موقعیت‌یابی بصری بلادرنگ با استفاده از دوربین‌های مبتنی بر رویداد استریو معرفی می‌کنند. رویکرد پیشنهادی این مقاله، سازگاری مکانی - زمانی را در داده‌های رویداد به حداکثر می‌رساند و بازسازی کارآمد صحنه سه‌بعدی و تخمین جایگاه دوربین را ممکن می‌سازد. این سیستم در شرایط نوری چالش‌برانگیز به خوبی کار می‌کند و به صورت متن‌باز برای تحقیق در حوزه مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان مبتنی بر رویداد در دسترس است.

## ۳ روش پیشنهادی

### ۱.۳ اودومتري بصری

موقعیت‌یابی بصری فرایند تخمین حرکت ربات (جابجایی و چرخش نسبت به یک محور مرجع) با مشاهده توالی تصاویر محیط آن است [۷]. در واقع موقعیت‌یابی بصری یک مورد خاص از تکنیکی به نام ساختار از حرکت (SFM) است که مسئله بازسازی سه‌بعدی ساختار محیط و جایگاه دوربین در تصاویر متوالی یا بدون ترتیب را حل می‌کند [۱]. مرحله بهبود نهایی و بهینه‌سازی سراسری جایگاه دوربین و ساختار در SFM هزینه محاسباتی بالایی دارد و معمولاً به‌صورت آفلاین انجام می‌شود. با این حال، تخمین جایگاه دوربین در موقعیت‌یابی بصری باید در لحظه انجام شود.

در سال‌های اخیر، روش‌های VO بسیاری پیشنهاد شده‌اند که می‌توان آنها را به روش‌های دوربین یک چشمی [۲] و دو چشمی [۳] تقسیم کرد. همچنین این روش‌ها به تطبیق ویژگی (تطبیق ویژگی‌ها در تعدادی از فریم‌ها) [۴]، ردیابی ویژگی [۵] (تطبیق ویژگی‌ها در فریم‌های مجاور)، و تکنیک‌های جریان نوری [۶] (براساس شدت تمام پیکسل‌ها یا مناطق خاص در تصاویر متوالی) تقسیم می‌شوند. موقعیت‌یابی بصری پس از استفاده موفقیت‌آمیز در عملیات اکتشاف مریخ توسط ناسا شناخت عمومی به‌دست آورد [۹]. این دستاورد بر کاربرد عملی قابل توجه آن در حوزه‌های مختلف از جمله امنیت عمومی [۸]، واقعیت مجازی [۱۰] و واقعیت افزوده [۱۱] تأکید کرد.

برای اطمینان از عملکرد مناسب اودومتري بصری، روشنایی کافی و یک محیط ایستا و دارای بافت کافی مورد نیاز هستند [۱۳]. در مناطقی با سطوح صاف و کم بافت، نور جهت دار و شرایط روشنایی خاص منجر به نورپردازی غیریکنواخت صحنه می‌شوند [۱۲]. علاوه بر این، سایه‌های اشیاء ساکن یا متحرک، از جمله خود وسیله نقلیه، می‌توانند محاسبات جابجایی پیکسل را مختل کرده و به تخمین‌های نادرستی منجر شوند [۱۴، ۱۵].

### ۲.۳ مدل پیشنهادی

در این مقاله، ما یک مدل موقعیت‌یابی بصری را پیشنهاد می‌کنیم که ORB، FLANN و LSH بهره می‌گیرد تا جایگزینی برای سیستم‌های مبتنی بر GPS در ناوبری خودرو ارائه دهد. این مدل شامل سه بخش اصلی است: استخراج ویژگی، تطبیق ویژگی، و مثلث‌بندی.

بخش استخراج ویژگی این مدل از الگوریتم ORB برای استخراج حداکثر ۳۰۰۰ ویژگی از تصاویر ورودی استفاده می‌کند. ORB یک الگوریتم سریع و کاربردی است که یابنده نقاط کلیدی FAST و استخراج‌گر توصیف‌گر BRIEF را ترکیب می‌کند و روشی قوی و کارآمد برای شناسایی ویژگی‌ها در تصاویر فراهم می‌کند [۱۶].

پس از استخراج ویژگی‌ها از تصاویر ورودی، مدل ما از الگوریتم FLANN برای تطبیق ویژگی‌های استخراج شده بین فریم‌های مجاور استفاده می‌کند. FLANN یک الگوریتم کارآمد برای جستجوی تقریبی نزدیک‌ترین همسایه است، که به‌ویژه برای فضاهای ویژگی با ابعاد بالا مناسب است [۱۶]. در این مدل، ما

از LSH برای بهبود کارایی فرآیند تطبیق ویژگی استفاده می‌کنیم. LSH یک تکنیک هش کردن است که با نگاشت ویژگی‌های مشابه به یک سطل هش مشترک، به جستجوی تقریبی نزدیک‌ترین همسایگان کمک می‌کند [۱۷].

هنگامی که ویژگی‌ها بین فریم‌های مجاور تطبیق داده شدند، مدل ما از مثلث‌بندی برای تخمین ژست دوربین استفاده می‌کند. مثلث‌بندی تکنیکی است که شامل تخمین موقعیت سه‌بعدی یک نقطه با اندازه‌گیری افکنش<sup>۴</sup> آن بر روی دو یا چند تصویر گرفته شده از دیدگاه‌های مختلف است [۱۶]. با مثلث‌بندی ویژگی‌های منطبق، مدل ما می‌تواند حرکت نسبی دوربین بین فریم‌ها را بازیابی کند و نقشه‌ای از محیط بسازد.

## ۴ تحلیل و ارزیابی

ارزیابی مناسب پروژه در موقعیت‌یابی بصری مزایای متعددی دارد، مانند بهبود دقت، افزایش ثبات و سازگاری. ارزیابی و بررسی الگوریتم‌ها می‌تواند منجر به تخمین جایگاه دقیق‌تر شود که برای کاربرد مد نظر ما حیاتی است [۱۲، ۲۵]. ارزیابی مناسب همچنین می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف روش‌های مختلف موقعیت‌یابی بصری کمک کند، که منجر به توسعه الگوریتم‌های قابل اعتمادتر می‌شود که می‌تواند از پس محیط‌های چالش برانگیز، مانند روشنایی‌های متغیر، اشیا پویا، و هم‌پوشانی‌ها برآید [۲۶]. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) یک معیار پرکاربرد برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های یک مدل است که با محاسبه‌ی ریشه دوم میانگین مربعات اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر حقیقی به دست می‌آید. مقدار پایین‌تر RMSE به معنی دقت بهتر است اما این معیار نسبت به داده‌های پرت حساس بوده و ممکن است جهت خطا را مشخص نکند [۲۲].

مجموعه داده KITTI یک شاخص ارزیابی پرکاربرد برای مسائل بینایی ماشین و رانندگی خودکار است [۲۳]. یکی از مزیت‌های اصلی این مجموعه داده، داده‌های متنوع و واقع‌گرایانه آن است که به محققان کمک می‌کند تا الگوریتم‌هایی که توسعه داده‌اند را آزمایش کنند و می‌تواند به خوبی سناریوهای دنیای واقعی را تعمیم دهد [۲۴].

هدف اصلی ما انتخاب دقیق توالی‌های خاصی از مجموعه داده KITTI بود که شامل هر دو مسیر مستقیم و منحنی باشد. این توالی‌ها براساس شباهت آن‌ها با سناریوهای دنیای واقعی انتخاب شدند که تا تمرکز خود را روی سناریوهایی که با شرایط رانندگی واقعی مطابقت دارند قرار دهیم و اعتبار و کاربرد این پژوهش را افزایش دهیم.

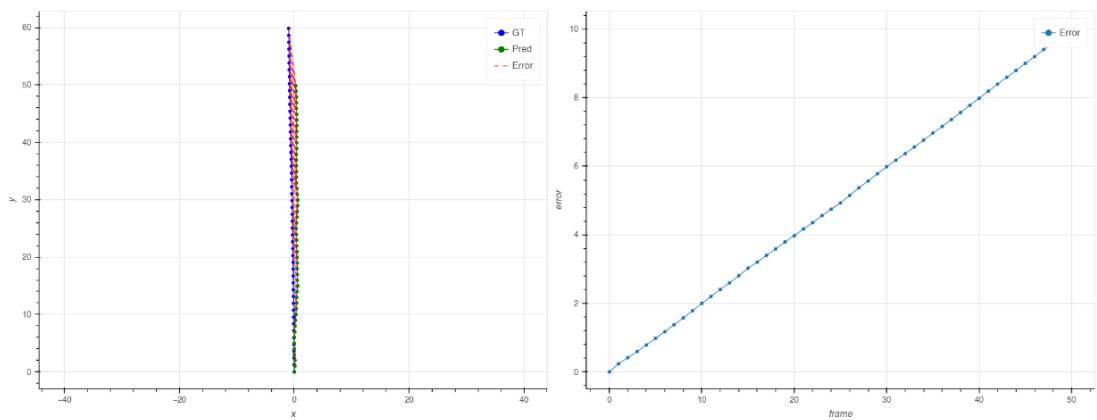
## ۱.۴ عملکرد در مسیر صاف

در توالی اول، مدل در تخمین موقعیت دوربین سطح قابل قبولی از دقت نشان می‌دهد و محاسبات آن نتایجی را به دست می‌دهد که بسیار نزدیک به مقادیر واقعی هستند. با این حال، همان‌طور که عملکرد مدل در طول زمان بررسی می‌شود، یک روند نگران‌کننده پدیدار می‌شود: دقت تخمین‌های این مدل به تدریج کاهش

<sup>4</sup>projection



شکل ۱: نمونه‌ای از تصاویر موجود در مجموعه داده KITTI، تصویر مربوط به توالی اول این مجموعه داده است.



(ب)

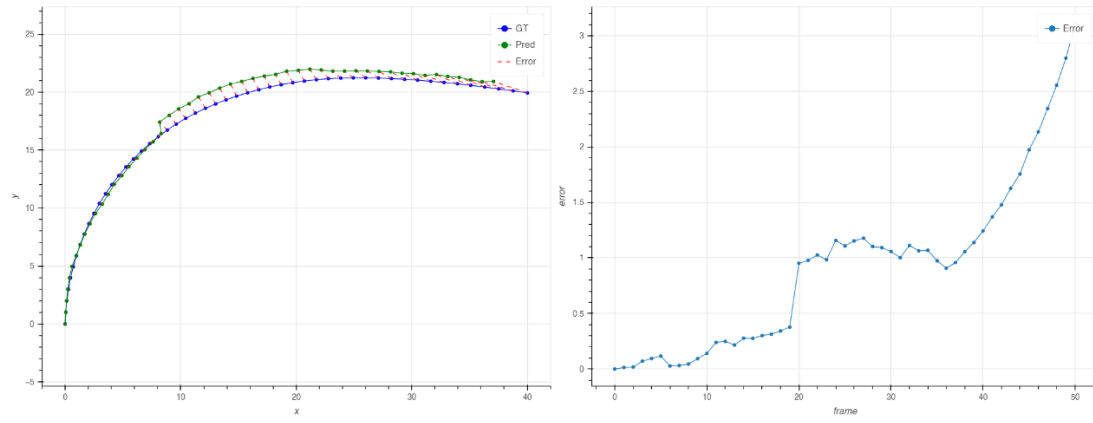
(الف)

شکل ۲: الف) نمودار تغییر مقدار RMSE در فریم‌های توالی اول. ب) مقایسه مسیر پیش‌بینی شده توسط مدل (سبز) و مسیر حقیقی (آبی)

می‌یابد و منجر به خطای قابل توجهی می‌شود.

وقتی در نهایت به انتهای مسیر می‌رسیم، متوجه می‌شویم که خطای عمودی (انحراف دوربین در جهت جانبی) نسبتاً کوچک است و اندازه آن کمتر از یک متر است. این نتیجه یک دستاورد قابل توجه است که نشان‌دهنده توانایی مدل برای حفظ دقت در بعد عمودی است. با این حال، وضعیت وقتی که خطای افقی (انحراف دوربین در جهت حرکت) مورد بررسی قرار می‌گیرد متفاوت است. در اینجا، عملکرد مدل پایین‌تر است و خطا از ۱۰ متر فراتر می‌رود (شکل ۲).

مدل‌های موقعیت‌یابی بصری به نشانه‌های بصری از محیط برای تخمین حرکت دوربین متکی هستند. اگر محیط بسیار پویا باشد، با تغییر سریع شرایط نوری، اشیاء در حال حرکت، یا همپوشانی، ممکن است مدل برای ردیابی دقیق ویژگی‌ها به مشکل برخورد کند. این تغییرپذیری محیطی می‌تواند خطاهایی را در



(ب)

(الف)

شکل ۳: الف) نمودار تغییر مقدار RMSE در توالی دوم. ب) مقایسه مسیر پیش بینی شده توسط مدل (سبز) و مسیر حقیقی (آبی)

تخمین‌های مدل ایجاد کند، زیرا تلاش می‌کند تا ورودی‌های بصری همیشه در حال تغییر را درک کند.

## ۲.۴ عملکرد در مسیر خمیده

در توالی دوم، دوربین روی ماشینی قرار می‌گیرد که مسیر منحنی مشخصی را دنبال می‌کند. در این توالی، مدل سطح بالایی از دقت را در تخمین مختصات فضایی و جهت گیری دوربین از خود نشان می‌دهد (شکل ۳).

زمانی که دوربین مسیر خود را کامل می‌کند، این مدل موفق شده خطای عمودی را به کمتر از یک متر کاهش دهد که دستاوردی با دقت چشمگیر است. علاوه بر این، خطای افقی نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده شده و کمتر از ۳ متر اندازه‌گیری شده است. این موقعیت‌یابی دقیق دوربین با این حد از خطا، یک دستاورد چشمگیر در زمینه مدل‌سازی محاسباتی و موقعیت‌یابی را نشان می‌دهد.

با این حال، بررسی علل عملکرد بهتر مدل در مسیرهای منحنی نسبت به مسیرهای مستقیم، بسیار مهم است. مسیرهای منحنی ذاتاً پیچیدگی بیشتری را در مقایسه با مسیرهای مستقیم ایجاد می‌کنند. ممکن است مدل برای مدیریت این پیچیدگی بیشتر، مناسب‌تر باشد که به بهبود دقت منجر شود.

## ۵ نتیجه‌گیری

هدف اولیه ما در این مقاله نه تنها به چالش کشیدن وابستگی مرسوم به GPS با بررسی قابلیت‌های ساختار شکنانه موقعیت‌یابی بصری بلکه بررسی قابلیت اعتماد این سیستم در برابر چالش‌های جغرافیایی که ممکن است سیستم‌های سنتی GPS را مختل کنند نیز بود.

ما در طول مقاله تکامل الگوریتم‌های VO را به نمایش گذاشته و پتانسیل آن‌ها برای ارائه اطلاعات موقعیتیابی قابل اعتماد و دقیق نشان داده‌ایم. در ادامه، ما یک مدل جدید موقعیتیابی بصری را معرفی کردیم، اصول آن را توضیح دادیم و از طریق ارزیابی در مقابل دو مجموعه داده متفاوت، عملکرد آن را ارزیابی کردیم.

در حالی که مدل نوآورانه ما در آزمایش‌ها به دقت نسبتاً خوبی دست یافت، لازم به ذکر است که در برخی صنایع خاص، دقت به دست آمده ممکن است الزامات سخت‌گیرانه را برآورده نکند. برای رفع این چالش، استفاده از دوربین‌های استریو پیشنهاد می‌شود که می‌تواند دقت سیستم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، این بهبود به قیمت بار محاسباتی بالاتر تمام می‌شود، که مستلزم استفاده از سخت‌افزار پیشرفته‌تر و در نتیجه، افزایش هزینه‌ها است.

علاوه بر این، پیشنهاد می‌شود تکنولوژی‌های جایگزین مانند LiDAR، واحدهای اندازه‌گیری اینرسی (IMUs) و دوربین‌های RGB - D برای تحقیقات بیشتر در نظر گرفته شود. این فناوری‌ها برای تکمیل یا افزایش دقت موقعیتیابی بصری به طرق مختلفی کاربرد دارند و راهکارهای جدیدی برای توسعه سیستم مسیریابی ارائه می‌دهند.

در نهایت، زمانی که ما دنیایی را تصور می‌کنیم که تنها به GPS وابسته نیست، تحقیقات ما راه را برای راه‌حل‌های مسیریابی انعطاف پذیرتر و سازگارتر هموار می‌کند. با استفاده از بینایی ماشین و فناوری موقعیتیابی بصری ما یک گام به سوی دستیابی به سیستم مسیریابی با قابل تحمل‌های جغرافیایی نزدیک‌تر می‌شویم.

## مراجع

- [1] Fraundorfer, F., & Scaramuzza, D. (2011). Visual odometry: Part i: The first 30 years and fundamentals. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 18(4), 80-92.
- [2] Campbell, J., Sukthankar, R., Nourbakhsh, I., & Pahwa, A. (2005, April). A robust visual odometry and precipice detection system using consumer-grade monocular vision. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on robotics and automation* (pp. 3421-3427). IEEE.
- [3] Matthies, L., & Shafer, S. T. E. V. E. N. A. (1987). Error modeling in stereo navigation. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(3), 239-248.
- [4] Talukder, A., Goldberg, S., Matthies, L., & Ansar, A. (2003, October). Real-time detection of moving objects in a dynamic scene from moving robotic vehicles. In *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*(Cat. No. 03CH37453) (Vol. 2, pp. 1308-1313). IEEE.
- [5] Dornhege, C., & Kleiner, A. (2006). Visual odometry for tracked vehicles. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR)*. IEEE.



- [6] Zhang, T., Liu, X., Kühnlenz, K., & Buss, M. (2009, October). Visual odometry for the autonomous city explorer. In 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 3513-3518). IEEE.
- [7] Yousif, K., Bab-Hadiashar, A., & Hoseinnezhad, R. (2015). An overview to visual odometry and visual SLAM: Applications to mobile robotics. *Intelligent Industrial Systems*, 1(4), 289-311.
- [8] He, M., Zhu, C., Huang, Q., Ren, B., & Liu, J. (2020). A review of monocular visual odometry. *The Visual Computer*, 36(5), 1053-1065.
- [9] Zhu, C., He, M., Yang, S., Wu, C., & Liu, B. (2018). Survey of monocular visual odometry. *Comput. Eng. Appl*, 54, 20-28. (in Chinese with English abstract)
- [10] Lin, S., Chen, Y., Lai, Y. K., Martin, R. R., & Cheng, Z. Q. (2016). Fast capture of textured full-body avatar with rgb-d cameras. *The Visual Computer*, 32, 681-691.
- [11] Sharma, O., Pandey, J., Akhtar, H., & Rathee, G. (2018). Navigation in AR based on digital replicas. *The Visual Computer*, 34, 925-936.
- [12] Aqel, M. O., Marhaban, M. H., Saripan, M. I., & Ismail, N. B. (2016). Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. *SpringerPlus*, 5, 1-26.
- [13] Scaramuzza, D., & Fraundorfer, F. (2011). Tutorial: visual odometry. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 18(4), 80-92.
- [14] Gonzalez, R., Rodriguez, F., Guzman, J. L., Pradalier, C., & Siegwart, R. (2012). Combined visual odometry and visual compass for off-road mobile robots localization. *Robotica*, 30(6), 865-878.
- [15] Nourani-Vatani, N., & Borges, P. V. K. (2011). Correlation-based visual odometry for ground vehicles. *Journal of Field Robotics*, 28(5), 742-768.
- [16] Lin, Y., Yang, Y., & Lin, L. (2019, December). A Device Pose Estimation Method Based on Monocular Visual Odometer. In 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-Fall) (pp. 2109-2113). IEEE.
- [17] Klüssendorff, J. H., Hartmann, J., Forouher, D., & Maehle, E. (2013, July). Graph-based visual SLAM and visual odometry using an RGB-D camera. In 9th International Workshop on Robot Motion and Control (pp. 288-293). IEEE.
- [18] Zhan, H., Weerasekera, C. S., Bian, J. W., & Reid, I. (2020, May). Visual odometry revisited: What should be learnt?. In 2020 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA) (pp. 4203-4210). IEEE.
- [19] Huang, S. S., Ma, Z. Y., Mu, T. J., Fu, H., & Hu, S. M. (2020, May). Lidar-monocular visual odometry using point and line features. In 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 1091-1097). IEEE.
- [20] Costante, G., & Mancini, M. (2020). Uncertainty estimation for data-driven visual odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(6), 1738-1757.
- [21] Zhou, Y., Gallego, G., & Shen, S. (2021). Event-based stereo visual odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(5), 1433-1450.

- [22] Ahmad, M., Al-Mansob, R. A., Kashyzadeh, K. R., Keawsawasvong, S., Sabri Sabri, M. M., Jamil, I., & Alguno, A. C. (2022). Extreme gradient boosting algorithm for predicting shear strengths of rockfill materials. *Complexity*, 2022.
- [23] Li, R., Wang, S., Long, Z., & Gu, D. (2018, May). Undeepvo: Monocular visual odometry through unsupervised deep learning. In *2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 7286-7291). IEEE.
- [24] Cabon, Y., Murray, N., & Humenberger, M. (2020). Virtual kitti 2. arXiv preprint arXiv:2001.10773.
- [25] [25] Lim, K. L., & Bräunl, T. (2020). A review of visual odometry methods and its applications for autonomous driving. arXiv preprint arXiv:2009.09193.
- [26] Zhou, S., Yang, Z., Zhu, M., Li, H., Serikawa, S., Mizumachi, M., & Zhang, L. (2022). Higher accuracy self-supervised visual odometry with reliable projection. *Artificial Life and Robotics*, 27(3), 568-575.
- [27] Amami, M.M. (2022). The Advantages and Limitations of Low-Cost Single Frequency GPS/MEMS-Based INS Integration. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*.
- [28] Ibrahim, M., Akhtar, N., Jalwana, M.A., Wise, M., & Mian, A.S. (2021). High Definition LiDAR mapping of Perth CBD. *2021 Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, 01-08.