نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال سیزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴

Vol.13, No.2, Summer 2025

۸۷ -۱۰۲

مقاله پژوهشی

کالیبراسیون و تلفیق سنجنده‌های سامانه لایدار نقشه‌سازی سیار: تولید ابر نقطه متراکم رنگی از لایدار چرخان و دوربین استریو در حالت ایستا

سحر بیاتی[۱]، محمد سعادت‌سرشت[۲*]، علی حسینی‌نوه[۳]، میدیا رستمی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷

چکیده

سامانه‌های نقشه‌سازی سیار به عنوان فناوری‌های پیشرفته در حوزه علوم ژئوماتیک، امکان جمع‌آوری داده‌های مکانی و هندسی به صورت پویا را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از سنجنده‌های متنوع، نقشه‌های سه‌بعدی دقیق و زمین‌مرجع تولید می‌کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده شامل مختصات سه‌بعدی و تصاویر هستند که در تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی‌های متنوع مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مهم‌ترین خروجی‌های این سامانه‌ها، تولید ابرنقاط رنگی است که در آن اطلاعات مکانی هر نقطه با داده‌های رنگی به‌دست‌آمده از دوربین ادغام می‌شود. این ابرنقاط رنگی، بینش بهتری از ساختار سه‌بعدی عوارض و اجسام پیرامون ارائه می‌دهند و در فرایندهای مدلسازی، تحلیل فضایی و مستندسازی بسیار کارآمد هستند.کاربردهای این داده‌ها گستره وسیعی را شامل می‌شود؛ از تهیه مدل‌های سه‌بعدی شهری برای مدیریت شهری، ارزیابی کیفیت و آسیب‌های آسفالت در جاده‌ها، نقشه‌برداری خطوط انتقال انرژی و ارتباطات تا برداشت تونل‌های جاده‌ای و زیرزمینی. افزون بر این، اطلاعات ابرنقاط لایدار در ترکیب با تصاویر دوربین، برای واحدهای امداد و مدیریت بحران اهمیت بسیاری دارد؛ چراکه با سرعت و دقت بالا، جزئیات محیط را در شرایط بحرانی ثبت می‌کند. در این پژوهش، یک سامانه نقشه‌سازی سیار مبتنی بر لایدار طراحی و توسعه داده شد. این سامانه شامل یک لایدار دوبعدی است که با استفاده از یک سروو موتور دوران می‌کند و ابرنقاط سه‌بعدی متراکمی تولید می‌نماید. همچنین، فرآیند رنگی‌سازی این ابرنقاط با دقت بالا و با بهره‌گیری از اطلاعات تصویری دوربین چپ سامانه استریو انجام شد. در این پژوهش، فرآیند کالیبراسیون و تلفیق داده‌های لایدار و دوربین استریو در سامانه نقشه‌سازی سیار، با هدف تولید ابرنقاط سه‌بعدی متراکم و رنگی، به‌طور جامع بررسی شد. نتایج ارزیابی دقت ابرنقاط رنگی با استفاده از ابرنقاط مرجع نشان داد که در شرایط ایستا، فرآیند رنگی‌سازی ابرنقاط با دقت بالایی انجام شده است؛ به‌طوری که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) برابر با ۰٫۰۲۹ متر، میانگین قدر مطلق خطا (*MAE*) برابر با ۰٫۰۲۱۷ متر، انحراف معیار (*STD*) برابر با ۰٫۰۱۳۲ متر و چگالی ابرنقطه برابر با ۴۲۹۳۱ نقطه در هر متر مربع به‌دست آمد. این نتایج بیانگر توانمندی روش پیشنهادی در تولید داده‌های سه‌بعدی متراکم و رنگی با دقت مطلوب است.

کلیدواژه‌ها : سامانه‌های نقشه‌سازی سیار، ابرنقاط سه‌بعدی رنگی، کالیبراسیون مکانی، لایدار چرخان.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان کارگرشمالی، بالاتر از تقاطع جلال آل احمد، دانشکدگان فنی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۳۷۷

Email: msaadat@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

۱- مقدمه

سامانه‌های نقشه‌سازی سیار[1] به فناوری‌های پیشرفته‌ای در حوزه ژئوماتیک اطلاق می‌شوند که امکان جمع‌آوری داده‌های مکانی و هندسی را در حالت پویا فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها با استفاده از سنجنده‌های مختلف، نقشه‌های سه بعدی دقیق و زمین‌مرجع تولید می‌کنند. این داده‌ها معمولاً شامل مختصات سه‌بعدی، تصاویر و اطلاعات مسیریابی است که برای تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سامانه‌ها با قابلیت جمع‌آوری سریع، دقیق و به‌هنگام داده‌ها، کاربردهای متعددی از جمله تهیه مدل‌های سه‌بعدی شهری و جزئیات عوارض جاده‌ای [۱و ۲]، ارزیابی کیفیت آسفالت [۳]، نقشه‌برداری از خطوط انتقال انرژی و ارتباطات [۴]، و برداشت تونل‌های جاده‌ای و زیرزمینی [۵] را پیدا کرده‌اند. همچنین، در زمینه‌های امداد و مدیریت بحران [۶] نیز نقش مؤثری ایفا می‌کنند. این گستردگی کاربردها، بر ضرورت افزایش دقت و صحت داده‌های تولیدشده توسط این سامانه‌ها تأکید دارد.

ویژگی بارز سامانه‌های نقشه‌سازی سیار استفاده از سنجنده‌های متنوعی مانند واحدهای اندازه‌گیری اینرسی (*IMU*)[2]، گیرنده‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای (*GNSS*)[3]، دوربین‌ها، و لایدارهای دوبعدی است که به‌صورت یکپارچه داده‌های مکانی کالیبره‌شده و زمین‌مرجع تولید می‌کنند [۷و ۸]. دوربین‌ها با قیمت مناسب و کارایی بالا، در برداشت بافت و رنگ محیط عملکرد مطلوبی دارند، درحالی‌که لایدار دوبعدی با توانایی برداشت داده‌ها از سطوح بدون بافت و بی‌نیاز از اطلاعات رنگی، امکان تولید ابرنقاط هایی با تراکم بالا را فراهم می‌کند [۹]. همچنین چرخش لایدار دوبعدی توسط سروو موتور، ابرنقاط سه‌بعدی را ایجاد می‌کند و در صورت ترکیب این داده‌ها با اطلاعات رنگی دوربین، ابرنقاط سه‌بعدی رنگی و متراکم به‌دست می‌آید.

در سامانه‌های نقشه سازی سیار، سنجنده‌ها با دقت‌های مختلف عمل می‌کنند [۱۰]. علاوه بر این، تعیین موقعیت و وضعیت دقیق میان سنجنده‌ها در تولید ابرنقاط رنگی و متراکم اهمیت دارد تا داده‌های لایدار و تصاویر دوربین به‌درستی با یکدیگر هم‌پوشانی کنند. مدلسازی و تخمین پارامترهای کالیبراسیون، علاوه بر افزایش دقت و قابلیت اعتماد سامانه، امکان استفاده از سنجنده‌های متنوع‌تر را فراهم کرده و انعطاف‌پذیری سامانه را افزایش می‌دهد [۱۱]. به عبارت دیگر، برای تولید ابرنقاط ای که علاوه بر اطلاعات مکانی، حاوی- داده‌های رنگی باشد، تلفیق دقیق داده‌های سنجنده تصویری و لایدار ضروری است. این امر با مدل‌سازی صحیح کالیبراسیون داخلی، نسبی و زمانی سنجنده‌ها و همچنین حفظ پایداری پارامترهای داخلی در شرایط محیطی مختلف ممکن می‌شود [۱۰، ۱۱و ۱۲].

یکپارچه‌سازی سامانه‌های لایدار و دوربین نقش مهمی در تولید ابرنقاط متراکم و رنگی دارد و موجب بهبود درک محیط و بازسازی سه‌بعدی می‌شود. برای دستیابی به این هدف، کالیبراسیون دقیق میان سنجنده‌ها، از جمله تنظیمات داخلی و خارجی، ضروری است. روش‌های متعددی برای کالیبراسیون و ادغام این سنجنده‌ها معرفی شده‌اند که هر یک دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. روش دوان و همکاران (۲۰۲۴) با ترکیب محدودیت‌های هندسی چندمسیره، دقت کالیبراسیون بین دوربین استریو و لایدار سه‌بعدی را افزایش داد. استفاده از یک شی سه‌وجهی برای تضمین هم‌صفحه و هم‌خط بودن نقاط، دقت این روش را بهبود بخشیده است[۱۳]. با این حال، پیچیدگی ساخت و استفاده از این ابزار ممکن است کاربرد عملی آن را محدود کند. جیائو و همکاران (۲۰۲۳) روش *LCE-Calib* را ارائه دادند [۱۴]. این روش از یک صفحه شطرنجی برای کالیبراسیون خودکار لایدار و دوربین رویداد استفاده می‌کند. این روش در عین دقت

[1] *Mobile Mapping Systems*
[2] *Inertial Measurement Unit*
[3] *Global Navigation Satellite System*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

بالا، نیازمند تجهیزات خاص است و در شرایط نور کم یا محیط‌های پویا کارایی محدودی دارد. بلتران و همکاران (۲۰۲۲) از یک فرآیند دو مرحله‌ای برای کالیبراسیون استفاده کردند که شامل هدف کالیبراسیون سفارشی و استخراج نقاط مرجع است [۱۵]. هرچند این رویکرد دقت بالایی دارد، اما به دلیل زمان‌بر بودن، در محیط‌های عملیاتی سریع محدودیت دارد.

در رویکرد ژیانگ و همکاران (۲۰۲۱)، از معیارهای آماری برای تنظیم داده‌های لایدار و دوربین استفاده شد[۱۶]. این روش نیازمند داده‌های آماری کافی است و در شرایطی که نمونه‌گیری ضعیف باشد، دقت کافی ندارد. لی و همکاران (۲۰۲۲) یک چارچوب خودکار مبتنی بر یادگیری عمیق موسوم به دیپ فیوژن[1] معرفی کردند که داده‌های دوربین و لایدار را برای تشخیص اشیاء سه‌بعدی ادغام کردند [۱۷]. این روش در شرایط پیچیده عملکرد مناسبی دارد. با این حال، این روش به منابع پردازشی بالا و داده‌های آموزشی بزرگ نیاز دارد که ممکن است اجرای آن در زمان واقعی را دشوار سازد. وینتر و نوواک (۲۰۲۴) یک الگوریتم فشرده‌سازی ارائه دادند که داده‌های چندین دوربین و لایدار را ترکیب می‌کند [۱۸]. این روش، در محیط‌هایی با نویز بالا یا داده‌های کم‌چگالی کارایی کمتری دارد.

لیو و همکاران (۲۰۲۴) رویکرد *OmniColor* را برای بهینه‌سازی موقعیت دوربین‌ها در ادغام داده‌های لایدار و دوربین ۳۶۰ درجه ارائه دادند [۱۹]. این روش با بهینه‌سازی جهانی موقعیت دوربین‌ها و حداکثرسازی سازگاری فوتومتریک، ابرنقاط رنگی دقیقی تولید می‌کند و در مواجهه با تغییرات شدید نور محیط عملکرد قابل قبولی دارد. ژو و همکاران (۲۰۲۳) از ویژگی‌های هندسی سطحی برای کالیبراسیون بهره بردند که وابستگی زیادی به وجود سطوح صاف و مشخص داشت و در محیط‌های پیچیده، این محدودیت می‌توانست دقت روش را کاهش دهد [۲۰].

در ادامه، لو و همکاران (۲۰۲۱) با ارائه روشی به نام (*LCCNet*) ، به سمت خودکارسازی کالیبراسیون لایدار و دوربین گام برداشتند [۲۱]. این روش با استفاده از شبکه حجم هزینه، جایگزین تکنیک‌های سنتی مبتنی بر ویژگی شد و توانست کالیبراسیون آنلاین و در لحظه را با دقت بالا انجام دهد. استفاده از این شبکه باعث کاهش خطاهای کالیبراسیون و بهبود چشمگیر هم‌ترازی داده‌های دوربین و لایدار گردید، اما همچنان به منابع پردازشی بالا نیاز داشت. شینوهارا و همکاران (۲۰۲۱) روش *Point2color* را برای رنگ‌آمیزی ابرنقاط سه‌بعدی با استفاده از شبکه‌های مولد شرطی معرفی کردند [۲۲]. این روش با بهره‌گیری از اطلاعات هندسی ابرنقاط و یادگیری عمیق، رنگ‌های مناسب را به نقاط اختصاص می‌دهد و به بهبود نمایش و درک داده‌های سه‌بعدی کمک می‌کند. سپس، چویی و همکاران (۲۰۲۲) رویکردی تحت عنوان *CP+* ارائه دادند که بر تقویت موقعیت‌یابی دوربین‌ها با استفاده از نقشه‌های لایدار بزرگ‌مقیاس تمرکز داشت [۲۳]. در این روش، موقعیت‌های اولیه دوربین با استفاده از داده‌های ادومتری لایدار و اینرسی به‌دست می‌آمد و سپس با انتخاب ابرنقاط خاص و استخراج ویژگی‌های لبه قابل اعتماد، هم‌ترازی بهینه انجام می‌شد. این رویکرد علاوه بر بهبود دقت، امکان استفاده در محیط‌های پیچیده‌تر را فراهم کرد. در نهایت، منوچهری و حسینی‌نوه (۲۰۲۳) سیستمی توسعه دادند که از یک لایدار دو بعدی چرخشی و یک دوربین استریو استفاده می‌کند و توسط گوشه اتاق و مختصات توپ‌های پینگ پنگ به کالیبراسیون نسبی میان لایدار چرخان و دوربین استریو دست می‌یابد [۱۲]. روش آن‌ها به طور مؤثر پارامترهای کالیبراسیون میان ابرنقاط سه‌بعدی حاصل از لایدار چرخان و ابرنقاط دوربین استریو را در حالت ایستا پیدا می‌کند با این حال، خلأ رنگ‌آمیزی ابرنقاط در این روش وجود دارد.

در بسیاری از روش‌های گذشته، یکی از چالش‌های

[1] *DeepFusion*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

اساسی، عدم بهره‌گیری از لایدار چرخان بوده است، چرا که اغلب این روش‌ها به استفاده از لایدارهای دو بعدی محدود شده‌اند. در این میان، روش منوچهری و حسینی‌نوه با استفاده از لایدار چرخان گامی فراتر برداشته و امکان تولید ابرنقاط سه‌بعدی را فراهم کرده است. با این حال، مشکل عدم رنگ‌آمیزی این ابرنقاط همچنان به قوت خود باقی است. افزون بر این، بسیاری از روش‌های کنونی که به رنگی‌سازی ابرنقاط می‌پردازند، وابسته به تجهیزات خاص یا منابع محاسباتی قابل توجهی هستند که استفاده عملی از آن‌ها را در شرایط واقعی به چالش می‌کشد. این محدودیت‌ها نشان‌دهنده نیاز به توسعه روش‌های سریعتر و بهینه‌تری است که هم‌زمان از دقت بالا و کاربردپذیری در محیط‌های عملی برخوردار باشند.

در این پژوهش، برای رفع مشکل رنگ‌آمیزی ابرنقاط و پر کردن خلأ موجود در روش منوچهری و حسینی‌نوه، یک روش سریع و کارآمد معرفی شده است. این روش با بهره‌گیری از لایدار چرخان و دوربین استریو، از کالیبراسیون نسبی میان این دو سنجنده استفاده می‌کند. علاوه بر این، از روش پروجکت بک برای نگاشت اطلاعات رنگی دوربین به ابرنقاط سه‌بعدی استفاده شده است. این رویکرد نه تنها سرعت پردازش را بهبود می‌بخشد، بلکه بدون نیاز به تجهیزات پیچیده یا منابع محاسباتی سنگین، امکان تولید ابرنقاط رنگی را فراهم می‌سازد.

۲- مواد و راهکارها

در این تحقیق، به منظور دستیابی به ابرنقاط سه‌بعدی رنگی با دقت بالا، یک روش ساختاریافته و جامع ارائه شده است. هدف اصلی، ترکیب دقیق داده‌های لایدار چرخان و دوربین استریو برای تولید داده‌های سه‌بعدی رنگی است که کاربردهای گسترده‌ای در مدل‌سازی محیطی و نقشه‌برداری دارند. فرآیند تحقیق شامل پنج مرحله اصلی است که هر مرحله با دقت طراحی و اجرا شده است تا دقت و انسجام داده‌های حاصل تضمین شود. این مراحل به ترتیب شامل کالیبراسیون داخلی دوربین استریو، تولید ابرنقاط سه‌بعدی از لایدار چرخان، کالیبراسیون نسبی بین لایدار و دوربین، رنگی‌سازی ابرنقاط سه‌بعدی، و در نهایت ارزیابی نتایج با استفاده از ابرنقاط مرجع هستند. در ابتدا، کالیبراسیون داخلی دوربین‌ها برای حذف اعوجاج و بهبود دقت تصاویر انجام می‌شود. سپس، داده‌های لایدار پردازش شده و ابرنقاط سه‌بعدی تولید می‌شوند. با تنظیم دقیق وضعیت و انتقال بین لایدار و دوربین، کالیبراسیون نسبی انجام شده و داده‌ها همگام‌سازی می‌شوند. در مرحله بعد، رنگی‌سازی ابرنقاط سه‌بعدی با استفاده از تصاویر دوربین صورت می‌گیرد و در پایان، نتایج با داده‌های مرجع مقایسه و ارزیابی می‌شوند. این فرآیند به‌صورت کلی در قالب نمودار شکل(۱) ارائه شده است.



شکل ۱: نمودار کلی تحقیق.

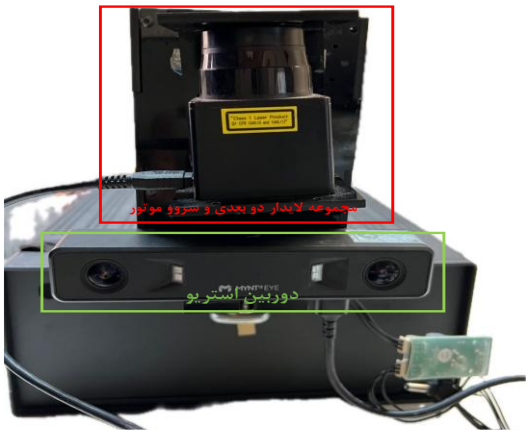
طراحی و پیاده‌سازی سامانه نقشه سازی سیار در دو بخش اصلی، شامل سخت‌افزار و نرم‌افزار، قابل انجام است. برای ارزیابی و توسعه روش پیشنهادی در محیط آزمایشگاهی، یک سامانه نقشه سازی سیار پیشرفته، مطابق با شکل(۲)، طراحی و ساخته شد که از ترکیب چندین سنجنده تخصصی بهره می‌برد. این سامانه شامل یک دوربین استریو *MYNT EYE D1000*، یک سنجنده لایدار دوبعدی مدل *Hokuyo URG-04LX-UG01* و یک سروو موتور *DYNAMIXEL MX-28T* است که برای ایجاد میدان دید سه‌بعدی با امکان

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

چرخش طراحی شده است. جزئیات فنی مربوط به سنجنده‌های استفاده شده در این سامانه در جدول(۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی سنجنده‌های به‌کاررفته در سامانه نقشه سازی سیار.

مشخصات	دوربین	لایدار دو بعدی
مدل	*D1000-50/Color*	*Hokuyo URG-04LX-UG01*
دقت	۷۲۰×۱۲۸۰ پیکسل	۳۰ ± میلی‌متر در ۶۰ الی ۱۰۰۰ میلی‌متر؛ ۳٪ ± در ۱۰۰۰ الی ۴۰۹۵ میلی‌متر
دقت زاویه‌ای	-	تقریباً ° ۳۶٫۰ در هر گام
اندازه پیکسل	۳٫۷۵ × ۳٫۷۵میکرومتر	-
فاصله باز	۱۲۰ میلی‌متر	-
زاویه دید	۳۸°:*V* ،۶۴° :*H* ،۷۰°:*D*	-
فاصله کانونی	۲٫۴۵ میلی‌متر	-
محدوده قابل تشخیص عمق (متر)	۳	۰٫۰۰۲ الی ۵٫۶
حالت اسکن	شاتر جهانی	لایدار دوبعدی (پروفایلر)



شکل ۲: ساختار سامانه نقشه سازی سیار طراحی شده.

۲-۱-کالیبراسیون داخلی دوربین استریو

برای کالیبراسیون دقیق دوربین استریو، روش ژانگ [۲۴] به‌عنوان یکی از رویکردهای پراستفاده بر اساس استفاده از صفحه کالیبراسیون با الگوی شطرنجی شناخته می‌شود. این روش به‌طور مؤثری امکان تعیین پارامترهای داخلی و خارجی دوربین را فراهم می‌سازد. در ابتدا، نقاط ویژگی مشترک در هر جفت تصویر با بهره‌گیری از آشکارسازهایی مانند هریس [۲۵] یا *FAST*[1] [۲۶] استخراج می‌شوند. سپس این نقاط با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند تطبیق‌دهنده-*Brute Force* [۲۷] یا *FLANN*[2] [۲۸] به‌هم تطبیق داده می‌شوند. در این پژوهش به منظور آشکارسازی گوشه-های الگوی شطرنجی در صفحه کالیبراسیون از

[1] *Features from Accelerated Segment Test*
[2] *Fast Library for Approximate Nearest Neighbors*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

الگوریتم *FAST* و برای تطبیق نقاط از *FLANN* استفاده شده است. سپس، در ادامه، ماتریس همنگاری *(H)* برای هر جفت تصویر محاسبه می‌شود که به‌عنوان نمایش هندسی تبدیل بین تصاویر عمل می‌کند. در این مرحله، پارامترهای داخلی دوربین شامل فاصله کانونی*(f)* ، مختصات نقطه اصلی*(pp)* ، و ضرایب اعوجاج شعاعی و مماسی (k_1, k_2, p_1, p_2) مشخص می‌شوند. با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی غیرخطی، نظیر الگوریتم *Levenberg-Marquardt* [۲۹]، این پارامترها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که خطای بازنگاشت نقاط ویژگی شناسایی‌شده به حداقل برسد. این مرحله به شناسایی پارامترهای کالیبراسیون خارجی اختصاص دارد که شامل ماتریس چرخش *(R)* و بردار انتقال *(t)* بین دوربین چپ و راست استریو در فضای سه‌بعدی می‌باشند. این پارامترها رابطه هندسی بین دوربین‌ها و صفحه کالیبراسیون را تعریف می‌کنند. پس از دستیابی به پارامترهای داخلی و خارجی، تصاویر حاصل از دوربین‌های چپ و راست با استفاده از روش براون [۳۰] اصلاح می‌شوند. روش براون یک رویکرد مبتنی بر چندجمله‌ای برای تصحیح اعوجاج لنز است که مختصات هر پیکسل را به کمک رابطه (۱) تنظیم می‌کند:

رابطه(۱)

$$X = x \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + 2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2)$$
$$Y = y \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2)$$

در رابطه (۱) تصحیح اعوجاج، X و Y مختصات پیکسل اصلاح‌شده، و x و y مختصات پیکسل اصلی (پیش از تصحیح) هستند. ضرایب k_2 و k_1 مربوط به اعوجاج شعاعی و p_1 و p_2 مرتبط با اعوجاج مماسی هستند، در حالی که r^2 مربع فاصله پیکسل از مرکز تصویر را نشان می‌دهد. با اعمال این تصحیحات بر تصاویر اصلی، تصاویر اصلاح‌شده‌ای تولید می‌شوند که فاقد اعوجاج و دارای دقت بالاتری برای پردازش‌های بعدی خواهند بود.

۲-۲-تولید ابرنقاط سه بعدی از لایدار پروفایلر چرخان

لایدار مورد استفاده، داده‌های محیط اطراف را به‌صورت پروفایل‌های دوبعدی و در قالب مختصات دوبعدی ارائه می‌دهد. به‌منظور استخراج مختصات سه‌بعدی اشیاء، از ترکیب یک لایدار دوبعدی با یک سروو موتور بهره گرفته شده است. در این روش، با چرخش لایدار حول محوری که توسط سروو موتور ایجاد می‌شود، ابرنقاط سه‌بعدی محیط در سیستم مختصات محلی تولید می‌گردد.

همان‌طور که در شکل(۳) نشان داده شده است، این ترکیب داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی را با چرخش زاویه‌ای ارائه‌شده توسط سروو موتور تلفیق کرده و ابرنقاط با تراکم بالا تولید می‌کند[۱۲]. در نتیجه مختصات سه‌بعدی نقاط با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند:

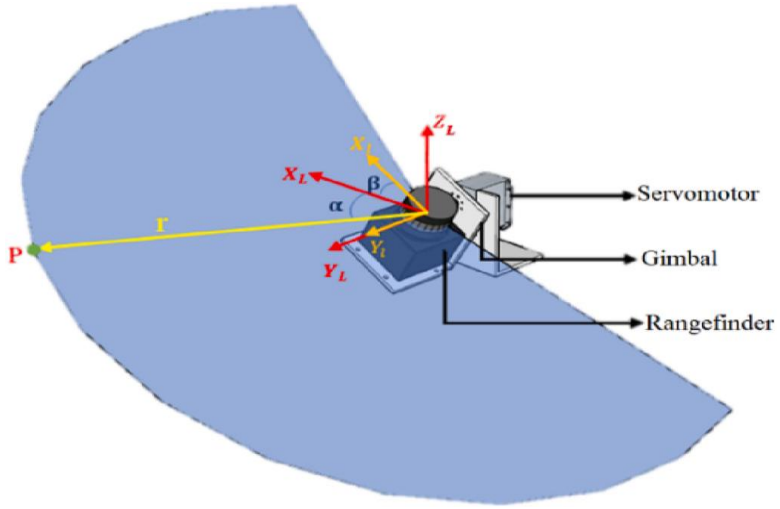
رابطه(۲)

$$X_L = r \cdot cos(\alpha) \cdot cos(\beta)$$
$$Y_L = r \cdot sin(\alpha)$$
$$Z_L = r \cdot cos(\alpha) \cdot sin(\beta)$$

در رابطه (۲)، r نشان‌دهنده فاصله نقطه موردنظر P از مرکز فاصله‌یاب لایدار است. α زاویه بین بردارr و محور X_l را نشان می‌دهد، و β زاویه بین محورها X_l وX_L است که با استفاده از انکودر سروو موتور اندازه‌گیری می‌شود. لایدار دوبعدی با سرعت بالا اشعه لیزر را در یک صفحه دوران داده و فاصله نقاط را با زاویه‌های ثابت از مرکز فاصله‌یاب اندازه‌گیری می‌کند. با چرخش لایدار حول محور Y_L، ابرنقاط ای سه‌بعدی از محیط پیرامون تولید می‌شود. در این ساختار، سروو موتور نقشی کلیدی ایفا می‌کند و زاویه چرخش محور خود را

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند. این اطلاعات برای تولید دقیق مختصات سه‌بعدی نقاط ضروری است.



شکل ۳: ساختار سامانه فاصله‌یاب لیزری سه‌بعدی شامل یک فاصله‌یاب لیزری دو بعدی و یک سروو موتور است[۱۲].

۲-۳-کالیبراسیون نسبی لایدار-دوربین

برای کالیبراسیون داده‌های لایدار-دوربین، مطابق روش منوچهری و حسینی‌نوه (۲۰۲۳) [۱۲]، دوربین و فاصله‌یاب بر پایه ابرنقاط سه‌بعدی تنظیم می‌شوند. بدین منظور، در مرحله نخست، با نصب توپ‌های پینگ‌پنگ به‌عنوان نشانگر در گوشه‌های دیوار و در فواصل معین از یکدیگر، یک میدان آزمون با ویژگی‌های هندسی مشخص ایجاد می‌گردد. به‌طور هم‌زمان، با استفاده از داده‌های لایدار دوبعدی، چرخش حاصل از عملکرد سروو موتور، و بهره‌گیری از رابطه(۲) یک ابرنقاط سه‌بعدی در سیستم مختصات محلی بازسازی می‌شود. در ادامه، به‌صورت هم‌زمان و از طریق دوربین استریو کالیبره‌شده، ابرنقاط سه‌بعدی متناظر از همان میدان آزمون برداشت می‌گردد. در مرحله بعد، با مقایسه دو ابرنقاط سه‌بعدی حاصل از لایدار و دوربین استریو، تطبیق هندسی میان این دو مجموعه داده از طریق نرم افزار *CloudCompare* و الگوریتم هورن [۳۱] انجام می‌شود. در این راستا، فواصل از پیش تعیین‌شده بین توپ‌های نشانگر میدان آزمون به‌عنوان قیود سخت هندسی در مدل محاسباتی وارد می‌شوند.

اجرای این عملیات به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱. هم‌راستاسازی مراکز جرم (*Centroid Alignment*): مراکز جرم هر دو ابرنقاط محاسبه شده و سپس با کم‌کردن مختصات مرکز جرم از هر نقطه، مجموعه‌ها به مبدأ مختصات منتقل می‌شوند.

۲. محاسبه ماتریس کوواریانس متقابل (*Cross-Covariance Matrix*): ماتریس کوواریانس متقابل بین دو ابرنقاط محاسبه می‌شود.

۳. تشکیل کواترنیون و تجزیه به مؤلفه‌های ویژه: یک ماتریس متقارن ۴×۴ از عناصر ماتریس کوواریانس متقابل ساخته می‌شود. تجزیه مقادیر و بردارهای ویژه بر روی این ماتریس انجام می‌گیرد. بردار ویژه متناظر با بزرگ‌ترین مقدار ویژه، کواترنیونی را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده چرخش بهینه است.

۴. استخراج ماتریس چرخش(R) و انتقال(T): ماتریس چرخش و انتقال از کواترنیون به‌دست‌آمده استخراج می‌شود. در صورت نیاز، ضریب مقیاس یکنواخت و بردار انتقالی که بهترین تطبیق را بین مجموعه‌های نقطه‌ای فراهم می‌سازند، محاسبه می‌شوند.

با انجام این عملیات پارامترهای کالیبراسیون نسبی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

میان سیستم مختصات لایدار سه‌بعدی و سیستم مختصات فتوگرامتری به‌دست می‌آیند. این پارامترها شامل ماتریس دوران R_{PL} و بردار انتقال T_{PL} هستند که رابطه (۳) بین سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و سیستم مختصات لایدار سه‌بعدی را تعریف می‌کنند:

رابطه(۳) $$P_P = R_{PL} \cdot P_L + T_{PL}$$

در رابطه (۳)، مرکز اپتیکی دوربین سمت چپ به‌عنوان مبدأ سیستم مختصات فتوگرامتری و مرکز فاصله‌یاب به‌عنوان مبدأ سیستم مختصات لایدار سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود. P_L مختصات نقطه در سیستم مختصات سه بعدی لایدار و P_P مختصات همان نقطه در سیستم مختصات فتوگرامتری (دوربین) می‌باشد. بنابراین، چرخش T_{PL} و انتقال R_{PL} بین این دو سیستم مختصات، به‌عنوان پارامترهای کالیبراسیون نسبی دوربین و لایدار عمل می‌کنند. هدف اصلی، یافتن این پارامترها است تا هر نقطه سه‌بعدی اندازه‌گیری‌شده توسط لایدار بتواند به سیستم مختصات فتوگرامتری منتقل شود. در مرحله نهایی، با استفاده از ماتریس دوران R_{PL} و بردار انتقال T_{PL}، ابرنقاط های تولیدشده توسط لایدار دوبعدی به سیستم مختصات مدل فتوگرامتری (مرکز دوربین چپ) انتقال داده می‌شوند.

۲-۴-رنگی‌سازی ابرنقاط سه‌بعدی

فرض می‌شود که کل سامانه نقشه‌سازی سیار در موقعیتی ثابت قرار دارد و دوربین و لایدار در یک مکان بدون حرکت داده‌ها (ابرنقاط لایدار سه بعدی و تصویر از دوربین) را جمع‌آوری می‌کنند. در این وضعیت، برای هم‌ترازی داده‌های لایدار با سیستم مختصات دوربین چپ، از ماتریس دوران T_{PL} و بردار انتقال R_{PL} استفاده می‌شود. با اعمال این تبدیل‌ها، مختصات سه‌بعدی نقاط لایدار P_L به مختصات سیستم دوربین چپ P_P منتقل می‌شود، که این فرایند با رابطه (۴) به صورت زیر قابل تعریف است:

رابطه(۴) $$P_P = R_{PL} \times P_L + T_{PL}$$

در رابطه (۴)، R_{PL} ماتریس دوران و T_{PL} بردار انتقال هستند که ارتباط هندسی میان سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و مدل فتوگرامتری را نشان می‌دهند. پس از انجام این تبدیل، نقاط لایدار که اکنون در مختصات دوربین چپ قرار دارند، وارد مرحله رنگی‌سازی می‌شوند. در این فرایند، مختصات سه‌بعدی نقاط به صفحه تصویر پرسپکتیو نگاشت می‌شوند و مختصات دوبعدی هر نقطه به پیکسل‌های تصویر متناظر می‌گردد. از آنجا که هر پیکسل دارای اطلاعات رنگی (R, G, B) است، رنگ مربوطه به نقاط ابرنقاط اختصاص می‌یابد. در نتیجه، ابرنقاط سه‌بعدی نه تنها شامل اطلاعات هندسی، بلکه با داده‌های رنگی غنی‌سازی می‌شود و به یک مدل سه‌بعدی بصری و دقیق تبدیل می‌گردد. هدف اصلی فرایند رنگی‌سازی ابرنقاط سه‌بعدی، اتصال مختصات فضایی هر نقطه به اطلاعات رنگی استخراج‌شده از تصویر هم‌مرجع است. از آنجا سامانه در حالت ایستا قرار دارد یک تصویر برای رنگی سازی کافی است.

این فرایند مدل سه‌بعدی را از داده‌های خام هندسی فراتر برده و آن را با اطلاعات بصری کامل می‌کند. برای انجام این کار، ابتدا روابط هندسی تصویربرداری برای نگاشت نقاط سه‌بعدی به صفحه تصویر اعمال می‌شود. هر نقطه سه‌بعدی (X,Y,Z) که در دستگاه مختصات دوربین قرار دارد، با استفاده از ماتریس درونی دوربین K به مختصات تصویری نگاشت می‌شود. ماتریس K به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

رابطه(۵)

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

در رابطه(۵)، K ماتریس، f_x و f_y فاصله‌های کانونی مؤثر در راستاهای افقی و عمودی، و $(c_x . c_y)$ مختصات مرکز تصویر هستند. مختصات سه‌بعدی (X, Y, Z) به مختصات تصویری (u, v) با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

رابطه(۶)

$$[u.v.1]^T = K \times \frac{[X.Y.Z]^T}{Z}$$

با انجام تقسیم بر Z ، مختصات تصویری (u, v) به صورت رابطه (۷) استخراج می‌شوند:

رابطه(۷)

$$u = \left(f_x * \frac{X}{Z}\right) + c_x$$
$$v = \left(f_y * \frac{Y}{Z}\right) + c_y$$

برای اینکه یک نقطه سه‌بعدی قابل رنگ‌آمیزی باشد، باید مختصات تصویری (u, v) در محدوده تصویر قرار بگیرند. اگر عرض تصویر w و ارتفاع آن h باشد، شرط زیر باید برقرار باشد (رابطه(۸)):

رابطه(۸)

$$1 \leq u \leq w$$
$$1 \leq v \leq h$$

مطابق رابطه(۸)، نقاطی که این شرط را رعایت نمی‌کنند، خارج از محدوده تصویر بوده و نمی‌توان برای آن‌ها رنگی اختصاص داد. برای نقاطی که در محدوده تصویر قرار دارند، مقدار رنگ (R, G, B) از مختصات متناظر در تصویر استخراج می‌شود (رابطه(۹)):

رابطه(۹)

$$(R.G.B) = Image(v.u)$$

در این مرحله، هر نقطه سه‌بعدی با مختصات (X, Y, Z)، با اختصاص یک بردار رنگ (R, G, B) ترکیب شده و اطلاعات بصری به داده‌های هندسی افزوده می‌شود. این فرایند که به "بافت‌دهی" یا "رنگ‌آمیزی" ابرنقاط معروف است، یک ابرنقاط سه‌بعدی رنگی تولید می‌کند که علاوه بر اطلاعات هندسی، شامل اطلاعات رنگ نیز می‌باشد.

۲-۵-ارزیابی با ابرنقاط مرجع

به منظور ارزیابی دقت ابرنقاط رنگی نهایی در این سامانه، با استفاده از یک دوربین دیجیتال *NIKON D5500* یک مجموعه ابرنقطه آزمون تولید شد. مشخصات فنی این دوربین در جدول(۲) ارائه شده است. فرآیند تولید ابرنقاط با بهره‌گیری از این دوربین در محیط نرم‌افزار *Metashape* انجام گرفت [۳۲].

جدول ۲: مشخصات دوربین *NIKON D5500*

دوربین و مدل	اندازه تصویر(پیکسل)	اندازه پیکسل(μm)	فاصله کانونی(mm)
NIKON D5500	۴۰۰۰ × ۶۰۰۰	۴٫۰۵×۴٫۰۵	۲۵

خطای بازنگاشت ابرنقاط آزمون برابر با ۱٫۵۴ پیکسل محاسبه شد. همچنین، مقدار تفکیک پذیری زمینی *(GSD)*[1] برابر با ۰٫۲۶۴ *mm/pix* به‌دست آمد.

برای سنجش دقت و کارایی این دو ابرنقاط، از مقدار خطای جذر میانگین مربعات*(RMSE)* [2] استفاده شد. استفاده از *RMSE* که در رابطه (۱۰) آورده شده، این امکان را می‌دهد تا میزان انحراف ابرنقاط رنگی تولید شده توسط سامانه نقشه سازی سیار نسبت موقعیت واقعی را بررسی کرده و به این ترتیب کیفیت ابر نقطه نهایی ارزیابی می‌شود.

رابطه(۱۰)

$$RMSE = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{N}\right)\sum(d_i - \hat{d}_i)^2\right)}$$

که در رابطه (۱۰)، N تعداد نقاط، d_i مختصات واقعی نقطه i در داده آزمون، $\hat{d}_i$ مختصات بدست آمده توسط دستگاه نقشه سازی سیار نقطه i هستند.

در راستای تحلیل جامع‌تر عملکرد سامانه طراحی‌شده، علاوه بر استفاده از شاخص *RMSE* برای سنجش دقت مکانی، دو معیار آماری دیگر نیز مورد استفاده قرار

[1] *Ground Sample Distance*
[2] *Root Mean Squared Error*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

گرفتند که درک کامل‌تری از کیفیت خروجی را فراهم می‌سازند. این معیارها عبارت‌اند از میانگین قدرمطلق خطا (*MAE*)[1] و انحراف معیار خطا (*STD*).[2] همچنین، چگالی نقاط در واحد سطح به عنوان شاخصی از توان تفکیک فضایی سامانه بررسی شد.

میانگین قدرمطلق خطا (*MAE*)، شاخصی برای اندازه‌گیری میانگین اختلاف مطلق بین مختصات نقاط متناظر در دو مجموعه ابرنقاط (مرجع و تولیدی) است. این معیار طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

رابطه(۱۱)

$$MAE = \left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N}|X_i - \hat{X}_i|$$

در رابطه(۱۱)، N تعداد کل نقاط مورد ارزیابی، X_i مختصات واقعی نقطه‌ی i در ابرنقطه مرجع و $\hat{X}_i$ مختصات متناظر در ابرنقطه تولیدشده توسط سامانه است.

برای بررسی میزان پراکندگی خطاها نسبت به میانگین آن‌ها، از شاخص انحراف معیاراستفاده شد. این شاخص طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

رابطه(۱۲)

$$STD = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N}\left(X_i - \hat{X}_i - \bar{e}\right)^2}$$

در رابطه(۱۲)، $\bar{e}$ میانگین خطا (*bias*) و سایر نمادها همانند رابطه ۱۱ هستند. این معیار می‌تواند پایداری سیستم را در تولید نقاط با خطای کم و منظم نشان دهد.

چگالی فضایی ابرنقطه به‌عنوان شاخصی از توان برداشت جزئیات محیط در سطح مشخصی از فضا محاسبه می‌شود. این چگالی طبق رابطه (۱۳) بیان می‌گردد:

رابطه(۱۳)

$$\text{چگالی} = \frac{\text{تعداد نقاط}}{\text{مساحت}}$$

۳-نتایج

اجرای روش پیشنهادی در سه مرحله انجام شد: مرحله اول شامل کالیبراسیون داخلی دوربین بود. در این مرحله، یک سامانه سخت‌افزاری آزمایشی شامل لایدار دوبعدی همراه با سروو موتور و دوربین استریو طراحی و پیاده‌سازی شد. سپس پارامترهای داخلی دوربین و ابرنقاط اولیه سه‌بعدی تولیدشده توسط لایدار محاسبه گردید. در مرحله دوم، کالیبراسیون نسبی میان دوربین استریو (با مرجعیت دوربین چپ) و لایدار چرخان انجام شد که طی آن، ماتریس‌های انتقال و چرخش میان این دو سنجنده تعیین گردید. در مرحله سوم، رنگی‌سازی ابرنقاط با نگاشت مستقیم رنگ‌های تصویر دوربین چپ به ابرنقاط لایدار صورت گرفت و بدین ترتیب ابرنقاط سه‌بعدی رنگی تولید شد. این رویکرد، بدون نیاز به استفاده از تکنیک‌های پیچیده، امکان تولید داده‌های رنگی دقیق را فراهم ساخت.

نتایج ارزیابی‌های مربوط به کالیبراسیون نسبی سنجنده‌ها در شکل(۴) آورده شده است. این شکل نمونه‌هایی از تصاویر شامل نقاط شناسایی‌شده با استفاده از روش ژانگ را نمایش می‌دهند که در فرآیند کالیبراسیون دوربین استریو برای دوربین‌های چپ و راست به کار گرفته شده‌اند. شکل(۵) توزیع و پوشش تصاویر به کار رفته در فرآیند کالیبراسیون دوربین استریو *MYNT EYE D1000* را نمایش می‌دهد. در این شکل، موقعیت دوربین‌های سمت چپ (با رنگ آبی) و سمت راست (با رنگ قرمز) نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.

[1] *Mean Absolute Error*
[2] *STandard deviation*

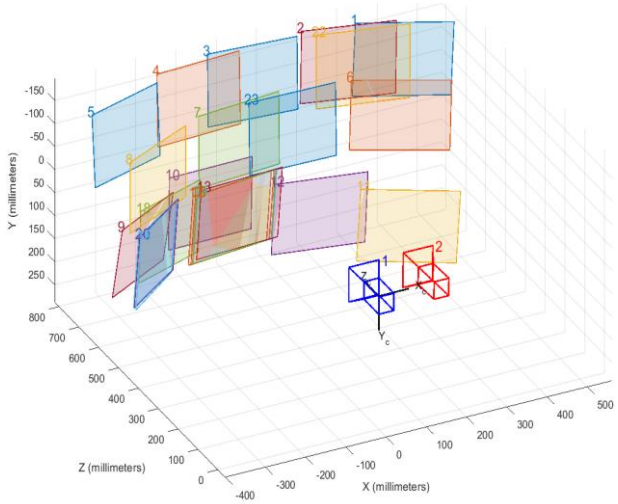
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

نقاط شناسایی شده بر روی صفحه شطرنجی دوربین راست

نقاط شناسایی شده بر روی صفحه شطرنجی دوربین چپ



شکل ۴: چند نمونه تصاویر نقاط شناسایی شده توسط روش ژانگ [۲۴] برای دوربین چپ و راست که در عملیات کالیبراسیون دوربین استریو *MYNT EYE D1000* استفاده شد.



شکل ۵: پوشش تصاویر مورد استفاده در کالیبراسیون دوربین استریو *MYNT EYE D1000* که به صورت دوربین مرکز تصویربرداری شده‌اند و موقعیت دوربین‌های سمت چپ(آبی) و سمت راست(قرمز) نسبت به هم.

جدول(۳) نتایج کالیبراسیون داخلی و نسبی دوربین‌های سمت چپ و راست را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده دقت بالای سیستم کالیبراسیون و هماهنگی مناسب با مقادیر اسمی دوربین است. فاصله کانونی به‌دست‌آمده از کالیبراسیون برای دوربین چپ ($F(x)$=۷۵۵٫۷۳۳۲، $F(y)$=۷۴۹٫۳۷۰۷) و دوربین راست ($F(x)$ = ۷۳۷٫۰۷۹۷، $F(y)$ =۷۳۸٫۱۵۶۵) در مقیاس پیکسل، با توجه به اندازه پیکسل (۳٫۷۵ میکرومتر)، به مقدار اسمی ۲٫۴۵ میلی‌متر نزدیک است. مختصات نقطه اصلی برای هر دو دوربین، مقادیر دقیق و سازگاری را نشان می‌دهند که با مشخصات اسمی دوربین‌ها هماهنگ است. همچنین، خطای شعاعی و مماسی بسیار کوچک گزارش شده است، که بیانگر تأثیر ناچیز اعوجاج بر دقت نهایی است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

در بخش کالیبراسیون نسبی مطابق جدول(۴)، مقادیر زاویه‌های چرخش (ω =۰٫۰۰۷۹، φ =۰٫۰۲۷۶ و κ =-۰٫۰۱۹۶) نشان‌دهنده هم‌راستایی دقیق دوربین‌ها است و مقادیر انتقال (X = -۱۱۹٫۰۰۷۹ میلی‌متر، Y = -۰٫۳۰۴۱ میلی‌متر، Z = -۰٫۸۲۱ میلی‌متر) نیز به‌خوبی با فاصله اسمی دوربین‌ها در راستای محور X (فاصله باز ۱۲۰ میلی‌متر) تطابق دارد. این نتایج تأیید می‌کنند که فرآیند کالیبراسیون با دقت بالا اجرا شده و مقادیر به‌دست‌آمده، با مشخصات اسمی دوربین‌ها سازگار هستند. این دقت بالا پیش‌نیاز ضروری برای تولید داده‌های سه‌بعدی متراکم و رنگی است.

جدول۳: پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین سمت چپ و سمت راست

پارامتر	دوربین چپ		دوربین راست	
فاصله کانونی (پیکسل)	$F(x)$=۷۵۵٫۷۳۳۲	(+/- ۶٫ ۸۶۰۳)	$F(x)$ =۷۳۷٫۰۷۹۷	(+/- ۶٫ ۸۶۰۳)
	$F(y)$=۷۴۹٫۳۷۰۷	(+/- ۶٫ ۸۷۷۷)	$F(y)$ =۷۳۸٫۱۵۶۵	(+/- ۶٫ ۸۷۷۷)
مختصات نقطه اصلی (پیکسل)	x =۶۷۱٫۲۷۴۵	(+/- ۴٫ ۳۰۶۵)	x =۶۸۲٫۹۷۰۴	(+/- ۴٫ ۲۴۷۳)
	y =۲۷۹٫۳۶۶۲	(+/- ۵٫ ۰۷۸)	y =۲۶۹٫۴۷۳۹	(+/- ۴٫ ۸۳۶۱)
خطای شعاعی	-۰٫۴۷۳۹	(+/- ۰٫ ۰۰۴۰)	-۲۶۹٫۴۷۳۹	(+/- ۰٫ ۰۰۴۰)
	۰٫۰۸۹۴	(+/- ۰٫ ۰۰۳۶)	۲۶۹٫۴۷۳۹	(+/- ۰٫ ۰۰۳۶)
خطای مماسی	۰٫۰۰۷۹	(+/- ۰٫ ۰۰۰۵)	۰٫۰۰۷۹	(+/- ۰٫ ۰۰۰۵)
	-۰٫۰۰۱۱	(+/- ۰٫ ۰۰۰۶)	-۰٫۰۰۱۱	(+/- ۰٫ ۰۰۰۶)

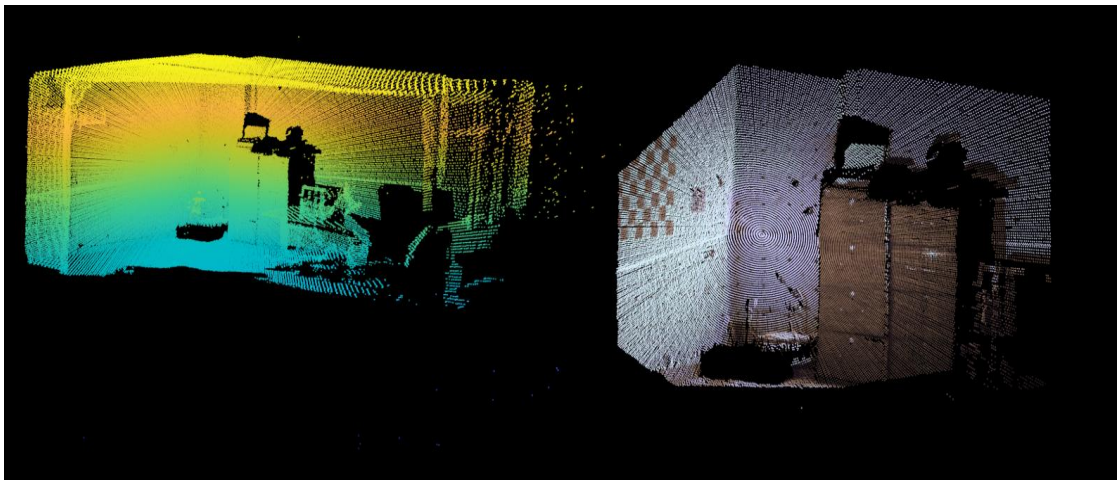
جدول۴: پارامترهای چرخش و انتقال دوربین راست به چپ

پارامتر	مقدار	خطا
Omega (ω)	۰٫ ۰۰۷۹	+/- ۰٫ ۰۰۲
Phi (φ)	۰٫ ۰۲۷۶	+/-۰٫ ۰۰۳۵
Kappa (κ)	-۰٫ ۰۱۹۶	+/-۰٫ ۰۰۰۷
X	-۱۱۹٫ ۹۳۶	+/-۰٫ ۷۴۴۷
Y	-۰٫ ۳۰۴۱	+/-۰٫ ۸۰۳۲
Z	-۰٫ ۸۲۱	+/-۰٫ ۶۰۹

برای کالیبراسیون نسبی بین ابرنقاط تولید شده توسط لایدار و تصاویر دوربین، مجموعه‌ای از نقاط سه‌بعدی مشخص بر روی گوشه‌های دیوار در محیط آزمایشگاهی انتخاب گردید. این نقاط به‌عنوان معیار مرجع برای تنظیم داده‌های لایدار و دوربین مورد استفاده قرار گرفتند. در این فرآیند، ابرنقاط ایجادشده از تصاویر کالیبره‌شده دوربین استریو با ابرنقاط تولیدشده توسط لایدار، با استفاده از نرم‌افزار *CloudCompare* هم‌تراز شدند که نتیجه این فرآیند، یک ماتریس تبدیل دقیق بود که پارامترهای چرخش و انتقال را به‌طور دقیق تخمین زد. خطای نهایی آن *RMSE* برابر با ۰٫۰۰۲۶۵۴۱ متر محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت بالای کالیبراسیون میان داده‌های لایدار و دوربین است. پس از اعمال پارامترهای کالیبراسیون خارجی میان ابرنقاط لایدار و دوربین چپ، سیستم مختصات نقاط لایدار با موفقیت به سیستم مختصات دوربین منتقل

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

شد. شکل(۶) سمت چپ، ابرنقاط خام حاصل از کالیبراسیون هندسی بین سیستم مختصات لایدار و دوربین چپ را به تصویر می‌کشد، و سمت راست، نسخه رنگی‌شده و متراکم همان ابرنقاط را نمایش می‌دهد.



شکل ۶ : ابر نقطه بدست آمده حاصل: کالیبراسیون میان سیستم مختصات لایدار و دوربین سمت چپ(سمت راست) و ابرنقاط متراکم رنگی شده آن(سمت چپ).

با اجرای این فرآیند، نقاط برداشت‌شده توسط لایدار که پیش‌تر در دستگاه مختصات لایدار تعریف شده بودند، اکنون به چارچوب مختصات دوربین چپ منتقل شده‌اند. این تطبیق مکانی، امکان افزودن اطلاعات رنگی تصاویر دوربین به نقاط لایدار را فراهم کرده است. بررسی تصویر رنگی تولیدشده نشان می‌دهد که هر نقطه از ابرنقاط به‌طور دقیق با رنگ متناظر خود در تصویر دوربین هماهنگ شده است. ارزیابی کیفی نشان می‌دهد که رنگ‌ها به‌درستی و متناسب با موقعیت‌های هندسی خود قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، سطوح عمودی و افقی موجود در ابرنقاط با رنگ‌هایی منطبق با بافت واقعی محیط رنگ‌آمیزی شده‌اند. این هماهنگی به‌ویژه در تمایز میان عوارض دارای بافت (مانند دیوارها با نشان‌های هدف کالیبراسیون) و اشیاء با رنگ‌های متمایز (مانند تجهیزات و وسایل موجود بر روی میز یا قفسه‌ها) به‌وضوح قابل مشاهده است. کیفیت بالای رنگ و جزئیاتی که ابرنقاط رنگی ارائه می‌دهد، نشان‌دهنده صحت کالیبراسیون در هر دو بخش مکانی و زمانی است. هیچ گونه انحراف رنگی یا عدم هم‌ترازی میان رنگ و عمق در نقاط قابل مشاهده نیست، که این امر به‌وضوح موفقیت فرآیند کالیبراسیون خارجی میان لایدار و دوربین چپ را از نظر هندسی و ترکیب داده‌های رنگی اثبات می‌کند. جدول(۵) مقادیر بدست آمده از ارزیابی کمی کیفیت ابرنقاط رنگی ساخته شده توسط سامانه را نشان می‌دهد. ابتدا، مقدار *RMSE* برابر با ۰/۰۲۹۴ متر نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن وزن بیشتر برای خطاهای بزرگ، دقت کلی بسیار مناسبی حاصل شده است. علاوه بر این، نزدیکی این مقدار به *MAE* (۰/۰۲۱۷ متر) بیانگر آن است که خطاهای جهشی یا غیرمعمول *(Outliers)* در مجموعه داده محدود بوده و خطاها عموماً به‌صورت یکنواخت توزیع شده‌اند. از سوی دیگر، انحراف معیار خطا *(STD)* برابر با ۰/۰۱۳۲ متر، نشان‌دهنده‌ی پراکندگی نسبتاً اندک خطاها پیرامون مقدار میانگین است و دلالت بر پایداری مناسب فرایندهای کالیبراسیون داخلی و نسبی و تلفیق داده‌های لایدار و دوربین دارد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

از منظر توان تفکیک فضایی، چگالی ۴۲۹۳۱ نقطه در هر متر مربع حکایت از قابلیت بالای سامانه در برداشت جزئیات سه‌بعدی حتی در حالت ایستا دارد. این تراکم بالا می‌تواند در کاربردهایی نظیر مدلسازی دقیق سازه‌ها، مستندسازی سه‌بعدی و تحلیل‌های مهندسی، کارآمد و سودمند باشد. در مجموع، مجموعه‌ی این شاخص‌ها نمایانگر آن است که روش تلفیق و رنگی‌سازی پیشنهادی توانسته ابرنقاطی متراکم و رنگی با دقت قابل قبول تولید نماید.

جدول۵: جمع‌بندی نتایج ارزیابی ابرنقاط رنگی ساخته شده و مقایسه آن با ابرنقاط مرجع

شاخص ارزیابی	مقدار به‌دست‌آمده
RMSE	۰٫۰۲۹۴ متر
MAE	۰٫۰۲۱۷ متر
STD	۰٫۰۱۳۲ متر
چگالی ابرنقطه	۴۲۹۳۱ نقطه در متر مربع

۴-نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فرآیند کالیبراسیون و تلفیق داده‌های چندسنجنده‌ای در سامانه لایدار نقشه ساز سیار با هدف تولید ابرنقاط سه‌بعدی متراکم و رنگی به‌طور جامع بررسی شد. هدف اصلی این تحقیق، رفع محدودیت‌های موجود در روش [۱۲] برای تولید ابرنقاط رنگی با استفاده از لایدار چرخان بود. این پژوهش با بهینه‌سازی فرآیندهای کالیبراسیون و ادغام داده‌های لایدار پروفایلر چرخان توسط سروو موتور و دوربین استریو، امکان تولید ابرنقاط متراکم و رنگی را در شرایط ایستا فراهم کرد.

برای دستیابی به این هدف، یک سامانه نقشه سازی سیار، متشکل از لایدار چرخان و دوربین استریو، طراحی و توسعه داده شد. در این سامانه، پارامترهای کالیبراسیون داخلی و نسبی با دقت بالا به دست آمد و فرآیند رنگی‌سازی ابرنقاط با استفاده از اطلاعات تصویری دوربین چپ و هم‌ترازی دقیق داده‌های چندسنجنده‌ای انجام شد. در طول فرآیند، نقاط برداشت‌شده توسط لایدار، که پیش‌تر در دستگاه مختصات لایدار تعریف شده بودند، به چارچوب مختصات دوربین چپ منتقل شدند و اطلاعات رنگی تصاویر به‌طور دقیق به ابرنقاط اعمال گردید.

ارزیابی کمی و کیفی حاکی از دقت مناسب سامانه در تلفیق و رنگ‌آمیزی ابرنقاط لایدار است. در این ارزیابی خطای *RMSE* برابر با ۰٫۰۲۹۴ متر و معیارهای *MAE* و *STD* (به‌ترتیب ۰٫۰۲۱۷ متر و ۰٫۰۱۳۲ متر) بین ابرنقاط رنگی ساخته شده توسط سامانه و ابرنقاط با تراکم بالای مرجع بدست آمد. افزون بر این، ثبت تراکم ۴۲۹۳۱ نقطه در هر متر مربع، تراکم مناسب در تولید ابرنقاط رنگی توسط سامانه مورد مطالعه را تأیید می‌کند. این داده‌ها نشان می‌دهند که سامانه طراحی‌شده، علی‌رغم استفاده از سخت‌افزار مقرون‌به‌صرفه، می‌تواند خروجی سه‌بعدی متراکم و رنگی با دقت قابل قبول ارائه دهد و برای کاربردهای گسترده در نقشه‌برداری و بازسازی سه‌بعدی سودمند باشد.

در این پژوهش، فرآیند رنگی‌سازی ابرنقاط در شرایط ایستا با موفقیت اجرا شد، اما برای گسترش کاربردهای عملی سامانه‌های نقشه سازی سیار، اجرای این فرآیند در شرایط متحرک پیشنهاد می‌شود. در حالت متحرک، چالش‌هایی مانند تطبیق دقیق داده‌های لایدار و دوربین در حضور حرکت، تغییرات سریع زاویه دید، و انحراف زمانی میان سنجنده‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

مراجع

[1] M. Javanmardi, E. Javanmardi, Y. Gu, and S. Kamijo, "Towards high-definition 3D urban mapping: Road feature-based registration of mobile mapping systems and aerial imagery," Remote Sensing, vol. 9, no. 10, p. 975, 2017.

[2] A. Mancini, E. Frontoni, and P. Zingaretti, "Automatic road object extraction from mobile mapping systems," in Proceedings of 2012 IEEE/ASME 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 2012: IEEE, pp. 281-286.

[3] D. Espinel-Gomez, W. Fernandez-Gomez, J. Moreno-Moreno, D. Carranza-Leguizamo, and C. Marrugo, "A Smart Mobile Mapping Application for the Evaluation of Road Infrastructure in Urban and Rural Corridors," in Workshop on Engineering Applications, 2024: Springer, pp. 175-185.

[4] M. Elhashash, H. Albanwan, and R. Qin, "A review of mobile mapping systems: From sensors to applications," Sensors, vol. 22, no. 11, p. 4262, 2022.

[5] S. Jiang, D. Weng, J. Liu, and W. Jiang, "Editorial on Special Issue "3D Reconstruction and Mobile Mapping in Urban Environments Using Remote Sensing"," vol. 16, ed: MDPI, 2024, p. 3236.

[6] I. Puente, H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, and P. Arias, "Review of mobile mapping and surveying technologies," Measurement, vol. 46, no. 7, pp. 2127-2145, 2013.

[7] E. Khoramshahi et al., "Accurate calibration scheme for a multi-camera mobile mapping system," Remote Sensing, vol. 11, no. 23, p. 2778, 2019.

[8] J. Jiao, H. Ye, Y. Zhu, and M. Liu, "Robust odometry and mapping for multi-lidar systems with online extrinsic calibration," IEEE Transactions on Robotics, vol. 38, no. 1, pp. 351-371, 2021.

[9] C. Yuan, S. Bi, J. Cheng, D. Yang, and W. Wang, "Low-cost calibration of matching error between lidar and motor for a rotating 2D lidar," Applied Sciences, vol. 11, no. 3, p. 913, 2021.

[10] C. Park, P. Moghadam, S. Kim, S. Sridharan, and C. Fookes, "Spatiotemporal camera-LiDAR calibration: A targetless and structureless approach," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 1556-1563, 2020.

[11] M. B. Alatise and G. P. Hancke, "A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods," IEEE Access, vol. 8, pp. 39830-39846, 2020.

[12] M. Manouchehri and A. H. Ahmadabadian, "Extrinsic calibration of a camera and a 2D laser range finder using ping pong balls and the corner of a room," Measurement, vol. 216, p. 113011, 2023.

[13] J. Duan, Y. Huang, Y. Wang, X. Ye, and H. Yang, "Multipath-Closure Calibration of Stereo Camera and 3D LiDAR Combined with Multiple Constraints," Remote Sensing, vol. 16, no. 2, p. 258, 2024.

[14] J. Jiao, F. Chen, H. Wei, J. Wu, and M. Liu, "Lce-calib: automatic lidar-frame/event camera extrinsic calibration with a globally optimal solution," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 28, no. 5, pp. 2988-2999, 2023.

[15] J. Beltrán, C. Guindel, A. De La Escalera, and F. García, "Automatic extrinsic calibration method for lidar and camera sensor setups," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 10, pp. 17677-17689, 2022.

[16] P. Jiang, P. Osteen, and S. Saripalli, "Calibrating lidar and camera using semantic mutual information," arXiv preprint arXiv:2104.12023, 2021.

[17] Y. Li et al., "Deepfusion: Lidar-camera deep fusion for multi-modal 3d object detection," in Proceedings of the

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2022, pp. 17182-17191.

[18] J. Winter and R. Nowak, "Point Cloud Densification Algorithm for Multiple Cameras and Lidars Data Fusion," Sensors (Basel, Switzerland), vol. 24, no. 17, p. 5786, 2024.

[19] B. Liu et al., "OmniColor: A Global Camera Pose Optimization Approach of LiDAR-360Camera Fusion for Colorizing Point Clouds," arXiv preprint arXiv:2404.04693, 2024.

[20] X. Xu et al., "Fusionrcnn: Lidar-camera fusion for two-stage 3d object detection," Remote Sensing, vol. 15, no. 7, p. 1839, 2023.

[21] X. Lv, B. Wang, Z. Dou, D. Ye, and S. Wang, "LCCNet: LiDAR and camera self-calibration using cost volume network," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021, pp. 2894-2901.

[22] T. Shinohara, H. Xiu, and M. Matsuoka, "Point2color: 3d point cloud colorization using a conditional generative network and differentiable rendering for airborne lidar," in Proceedings of the IEEE/CVF Conference on computer vision and pattern recognition, 2021, pp. 1062-1071.

[23] J. Cui and S. Schwertfeger, "CP+: Camera Poses Augmentation with Large-scale LiDAR Maps," in 2022 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), 2022: IEEE, pp. 69-74.

[24] Z. Zhengyou, "A flexible new technique for camera calibration," Microsoft Research Technical Report, 1998.

[25] J. Sánchez, N. Monzón, and A. Salgado De La Nuez, "An analysis and implementation of the harris corner detector," Image Processing On Line, 2018.

[26] E. Rosten and T. Drummond, "Machine learning for high-speed corner detection," in Computer Vision–ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Proceedings, Part I 9, 2006: Springer, pp. 430-443.

[27] A. Jakubović and J. Velagić, "Image feature matching and object detection using brute-force matchers," in 2018 International Symposium ELMAR, 2018: IEEE, pp. 83-86.

[28] V. Vijayan and P. Kp, "FLANN based matching with SIFT descriptors for drowsy features extraction," in 2019 Fifth International Conference on Image Information Processing (ICIIP), 2019: IEEE, pp. 600-605.

[29] J. J. Moré, "The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory," in Numerical analysis: proceedings of the biennial Conference held at Dundee, June 28–July 1, 1977, 2006: Springer, pp. 105-116.

[30] C. B. Duane, "Close-range camera calibration," Photogramm. Eng, vol. 37, no. 8, pp. 855-866, 1971.

[31] B. K. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," Journal of the optical society of America A, vol. 4, no. 4, pp. 629-642, 1987.

[32] K. Kingsland, "Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage," Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, vol. 18, p. e00157, 2020.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.13, No.2, Summer 2025

Research Paper

Calibration and Sensor Fusion in a Mobile LiDAR Mapping System: Generating Dense Colored Point Clouds from a Rotating LiDAR and Stereo Camera in Static Mode

Sahar Bayati [1], Mohammad Saadat Seresht [2*], Ali Hosseininaveh [3], Midya Rostami [4]

1- M.Sc. Student in Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Associate professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
4- PhD. candidate of Remote Sensing, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Mobile Mapping Systems, as advanced technologies in the field of geomatics, provide the possibility of collecting spatial and geometric data dynamically. These systems, produce accurate and geo-referenced three-dimensional maps utilizing various sensors. The collected data which include three-dimensional coordinates and images for spatial analyses, and are used in various modeling applications.One of the most important outputs of these systems is the production of colored point clouds, in which the spatial information of each point is combined with the colored data obtained from the camera. These colored point clouds provide a better insight of the three-dimensional structure of the features and the surrounding objects and are highly efficient in modeling processes, spatial analysis, and documentation.These data have a large number of uses, from creating 3D urban models for city management, evaluating pavement quality and damages on roads, mapping of energy transmission and communication lines, to capturing road and underground tunnels.In addition, LiDAR point cloud information, when combined with camera images, is of great importance for rescue units and crisis management; because it records the environmental details in critical situations with high speed and accuracy.In this research, a LiDAR-based mobile mapping system was designed and developed, which includes a rotating 2D LiDAR by a servo motor that generates dense 3D point clouds, and the colorization process of the obtained 3D point clouds was accurately performed using the image data of the left camera of the stereo one. In this study, the calibration process and data fusion of the stereo camera in the LiDAR mobile mapping system, with the aim of producing dense and colored 3D point clouds, was comprehensively investigated. The evaluation results of the colored point clouds compared to the reference point clouds showed that the colorization process of the point clouds in static conditions had an RMSE of 0.029 meters, MAE of 0.0217 meters, STD of 0.0132 meters, and point cloud density of 42931 points per square meter. They also indicated that the colored point clouds were created with high accuracy.These findings demonstrate the capability of the proposed method in providing dense and colored 3D data with desirable accuracy

Key words: *Mobile Mapping Systems, Colored 3D Point Cloud, Spatial Calibration, Rotating LiDAR.*

Correspondence Address*: College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 21 6111 4377*
Email: *msaadat@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-25]

[DOI: 10.66224/jgit.13.2.87]