

کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین با استفاده از تست فیلد فتوگرامتریک و قید نقطه روی صفحه

محمدامین منوچهری^۱، علی حسینی نوه^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری-دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

aminman1994@email.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری-دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

hosseininaveh@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت: اردیبهشت ماه ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: خرداد ماه ۱۴۰۲)

چکیده

استفاده از ترکیب فاصله‌یاب و دوربین در حوزه رباتیک، نقشه‌برداری و خودروهای خودران، برای تهیه نقشه و برداشت اطلاعات رنگ و بافت اشیاء، بسیار مفید است. به‌منظور تلفیق داده‌های این دو سنسور، باید آن‌ها با دقت بالا نسبت به هم کالیبره شوند، به این معنی که بردار انتقال و ماتریس دوران آن‌ها نسبت به هم مشخص باشد. این مقاله یک روش برای کالیبراسیون یک لایدار دوبعدی (فاصله‌یاب لیزری صفحه‌ای) نسبت به یک دوربین پیشنهاد می‌کند که از همان تست‌فیلدهای سه‌بعدی رایج در کارهای فتوگرامتری مانند کالیبراسیون دوربین استفاده می‌کند. در روش پیشنهادی، قید نقطه روی صفحه و یک قید اضافی دیگر برای به‌دست‌آوردن پارامترهای کالیبراسیون استفاده شده است که در تحقیقات گذشته چنین قیدهایی برای صفحه شطرنجی استفاده شده بود. برای پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی یک سیستم شامل یک فاصله‌یاب دوبعدی، دوربین استریو و سروو موتور طراحی و ساخته شد. این روش با یکی از دقیق‌ترین روش‌های کالیبراسیون جدید که از یک تست فیلد فتوگرامتریک و توپ‌های پینگ‌پنگ استفاده می‌کرد، مقایسه شد. مزیت روش پیشنهادی نسبت به این روش عدم استفاده از توپ‌های پینگ‌پنگ و عدم نیاز به انتخاب نقاط مربوط به توپ‌های پینگ‌پنگ در ابرنقاط است که فرآیندی دستی و زمان‌بر است. همچنین، روش پیشنهادی با روش جیافن و همکاران که از ساختار هرمی ایجاد شده در گوشه اتاق برای کالیبراسیون استفاده می‌کند، مقایسه شد. در آخر، پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب نسبت به دوربین در روش پیشنهادی، روش کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه‌بعدی و روش جیافن و همکاران محاسبه شد. RMSE نقاط چک برای این سه روش به ترتیب ۱۴/۲۴، ۱۲/۴۰ و ۱۵/۹۴ میلی‌متر بود. اگرچه RMSE روش پیشنهادی نسبت به روش کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه‌بعدی کمی کمتر است، ولی این روش به توپ پینگ‌پنگ نیازی ندارد و عملیات زمان‌بر انتخاب نقاط مربوط به توپ‌های پینگ‌پنگ و برازش کره به آن‌ها را ندارد.

واژگان کلیدی: فاصله‌یاب دوبعدی، کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب، باندل‌اجسم‌نت، تست فیلد فتوگرامتریک، قید نقطه روی

صفحه

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

به دلیل اندازه کوچک و قیمت پایین فاصله‌یاب‌های دوبعدی^۱ و دوربین‌ها این دو سنسور در بیشتر کارهای تهیه نقشه از محیط و تعیین موقعیت سنسور به‌صورت هم‌زمان^۲ [۲-۱]، تشخیص اشیا^۳ [۳] و موبایل مپینگ^۴ [۴] با هم ترکیب می‌شوند. دوربین‌ها بادقت بالایی اطلاعات بافت و رنگ اشیا را گزارش می‌کنند، از طرفی فاصله‌یاب‌ها بادقت بسیار خوبی فاصله را اندازه‌گیری می‌کنند. برای استفاده از مزایای هر دو سنسور و برداشت اطلاعات مربوط به رنگ و بافت اشیا و اطلاعات هندسی، باید داده‌های این دو سنسور با هم ترکیب شوند. باین‌حال، نصب دقیق این دو سنسور نسبت به هم کار سختی است. برای رفع این مشکل، پارامترهای کالیبراسیون خارجی برای توجیه دو سنسور نسبت به هم محاسبه می‌شوند. این پارامترها شامل بردار انتقال و ماتریس دوران فاصله‌یاب و دوربین نسبت به یکدیگر هستند.

عموماً، برای انجام کالیبراسیون خارجی چندین سنسور مختلف از خصوصیات مشترک موجود در داده‌های آن‌ها استفاده می‌شود. باین‌حال، یافتن نقاط یا خصوصیات مشترک در داده‌های دوربین و فاصله‌یاب به دو دلیل کار دشواری است. اولاً، داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی به‌صورت یک ابر نقطه دوبعدی (پروفیل) است که نتیجه تقاطع صفحه اسکن فاصله‌یاب و سطوح اشیا مختلف است. از طرفی ویژگی‌های زیادی مانند لبه‌ها و گوشه‌ها در داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی ثبت نمی‌شوند که در ابرنقاط سه‌بعدی و تصاویر مشخص است. ثانیاً، طول‌موج اشعه ای که در فاصله‌یاب‌ها به کار برده می‌شود، از محدوده دید انسان خارج است و در تصاویر هم قابل‌مشاهده نیست؛ بنابراین نمی‌توان داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی را تصاویر مشاهده کرد. به همین دلیل، یافتن یک روش مناسب و کاربردی برای انجام کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب دوبعدی، فرآیندی چالش‌برانگیز و ضروری است.

در گذشته، چندین روش برای کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین معرفی شدند که از یک سری تخته با

اشکال هندسی مختلفی مثل مثلث و سازه ای V شکل استفاده می‌شدند. لی و همکاران [۵] از یک سازه با ساختار مثلثی برای اخذ داده‌ها و کالیبراسیون با قید نقطه روی خط استفاده می‌کردند. واسیلوسکی و اشتراوس [۶] از یک تخته با ساختاری V شکل استفاده کردند و محل برخورد صفحه‌ها را در داده‌های فاصله‌یاب استخراج می‌کردند، همچنین فصل مشترک صفحات در این حالت که یک خط بود را در تصاویر گرفته شده استخراج می‌کردند. پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی قید نقطه‌روی‌خط، پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین دو سنسور محاسبه می‌شدند. سیم و همکاران [۷] از یک تست فیلد^۵ با ساختار V شکل و قید سه نقطه روی خط استفاده کردند. گرچه این روش‌ها قیدهای استفاده شده برای کالیبراسیون دو سنسور را بهبود دادند، اما هنوز به تعداد داده‌های بیشتری از تارگت‌ها در ایستگاه‌های مختلف نیاز داشتند و دقت آن‌ها وابسته به مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون بودند. در سال‌های اخیر، شماری از محققین روش‌هایی بر اساس هندسه هرمی معرفی کرده‌اند. چن و همکاران [۸] از یک سازه مکعبی شکل و قیود نقطه روی خط جهت کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب دوبعدی استفاده کردند که دستکم به سه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی از تارگت‌های تست فیلد نیاز داشت. گومز اوجدا و همکاران [۹] فرآیندی را برای کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب دوبعدی با برداشت گوشه‌ها در اجسام ساختگی ارائه کردند. روش فوق از قیود خط روی صفحه و همچنین نقطه روی صفحه برای ساختن ارتباط بین دو سنسور برای محاسبه مقادیر اولیه و بهینه‌سازی استفاده می‌کردند. باین‌حال، این روش به سه اسکن فاصله‌یاب دو بعدی برای به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه پارامترهای خارجی کالیبراسیون و تعداد اسکن‌های بیشتری برای اطمینان از نتیجه‌ی دقیق نیاز داشت. روش‌های فوق دو ضعف قابل‌توجه دارند: اول اینکه، هر چند از چندین اسکن فاصله‌یاب در فرآیند کالیبراسیون استفاده می‌کنند، اما برخی از این داده‌ها مناسب نیستند و ممکن است سبب شوند که جواب‌های به‌دست‌آمده از دقت مناسبی برخوردار نباشند. دومین مشکل این است که روش‌های مذکور به طور معمول از جواب منحصربه‌فردی

^۱ 2D Laser range finder

^۲ Simultaneous localization and mapping

^۳ Object Detection

^۴ Mobile mapping

^۵ Test field

برخوردار نیستند و یا به کمینه محلی همگرا خواهند شد که ممکن است نتایج کالیبراسیون را با خطا همراه کنند.

یک روش کالیبراسیون توسط هو و همکاران [۱۰] ارائه شد که فقط با استفاده از یک اسکن فاصله یاب از تارگتها، جواب منحصر به فردی را ارائه کرد. آن‌ها از یک هرم سه ضلعی به عنوان الگوی کالیبراسیون استفاده کردند و با استفاده از Perspective-Three-Line [۱۱-۱۲]، موقعیت فاصله یاب و دوربین را محاسبه کردند. برای کالیبراسیون دوربین، از طول دو لبه استفاده شد. با این حال، اندازه گیری دقیق طول لبه ها ممکن است دشوار باشد و این امر می تواند به نویز حساس باشد، زیرا طول لبه ها بر اساس دو نقطه پایانی تعیین می شود و در صورت وجود نویز، دقت آن کاهش می یابد.

جیافن و همکاران [۱۳] از یک هرم در گوشه اتاق استفاده کردند و کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله یاب دوبعدی را انجام دادند. محققین این عملیات را به دو بخش مجزا تقسیم کردند. در بخش اول، با استفاده از P3P، ماتریس دوران و بردار انتقال فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد محاسبه شدند. در بخش دوم، با استفاده از معادلات DLT، ماتریس دوران و بردار انتقال دوربین نسبت به تست فیلد را محاسبه می کردند. سپس با استفاده از بردار انتقال و ماتریس دوران دوربین و فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد، پارامترهای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله یاب دوبعدی را نسبت به هم محاسبه می کردند. این روش دو مشکل اساسی داشت. اولاً، دیوارها و کف اتاق باید کاملاً مسطح و صاف و بدون انحنای باشند و دوبه دو بر هم عمود باشند. این مشکل می تواند باعث شود که هرمی که برای کالیبراسیون در نظر گرفته شده، قائم الزاویه نباشد و در نتیجه پارامترها با خطا محاسبه می شوند. مشکل دوم این روش این است که به یک تست فیلدی بانقاط کنترل مختصات دار نیاز دارد.

علاوه بر این، در سال های گذشته روش های مختلفی برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب و دوربین ارائه شده اند که اغلب از صفحات شطرنجی استفاده کرده اند. با استفاده از یک شبکه از نقاط موجود بر روی صفحه شطرنجی، می توان موقعیت نسبی دوربین را نسبت به صفحه شطرنجی محاسبه کرد. چون صفحه شطرنجی یک سطح صاف است یافتن نقاط فاصله یاب که بر روی صفحه شطرنجی قرار دارند، آسان است. بنابراین، ارتباط بین دوربین و فاصله یاب

از طریق صفحه شطرنجی به دست می آید. ژانگ و پلس [۱۴] برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب و دوربین از یک صفحه مسطح شطرنجی با قیود نقطه روی صفحه استفاده کردند، یعنی باید نقاط فاصله یاب دوبعدی بر روی صفحه شطرنجی قرار گیرد. این روش برای به دست آوردن مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون حداقل به ۵ اسکن فاصله یاب در ایستگاه های مختلف نیاز دارد. علاوه بر این، برای بهینه سازی مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون، قید نقطه روی صفحه، برای همه نقاط فاصله یاب دوبعدی استفاده می شد. در این روش این احتمال وجود دارد که به دلیل مقادیر اولیه نامناسب، نتیجه بهینه سازی به مقدار کمینه محلی همگرا شود. بر اساس روش ژانگ و همکاران [۱۵]، یک جعبه ابزار اتوماتیک با هدف کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله یاب ارائه شد. ژو و دنگ [۱۶] قید خطروی صفحه را به کار بردند تا بردار انتقال و ماتریس دوران را به صورت جداگانه به دست آورند. با در نظر گرفتن اینکه بردار جهت لیزر همواره بر بردار نرمال صفحه شطرنجی عمود است، این قید بهینه سازی مقادیر اولیه را با همان قیود انجام می دهد. این روش برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون خارجی، حداقل به سه اسکن فاصله یاب و برای بهینه سازی غیرخطی نیز به اسکن فاصله یاب های بیشتری نیاز دارد. واسکونسولوس و همکاران [۱۷] از یک صفحه شطرنجی به عنوان الگوی کالیبراسیون استفاده کردند تا قیود نقطه-خط-صفحه را به مسأله perspective-three-point (P3P) تبدیل کنند. پس از تخمین مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون خارجی، بهینه سازی را با کمینه کردن خطای پروژکشن^۱ لیزر انجام دادند. از سوی دیگر این روش برای به دست آوردن مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون، دستکم به سه اسکن فاصله یاب نیاز داشت و وجود چند جواب مختلف و مشکلات انحطاط در حل مسئله P3P کار را دشوار می کند.

فومیو و همکاران [۱۸] از یک صفحه شطرنجی و قید نقطه روی صفحه استفاده کرد. آن‌ها فاصله یاب دوبعدی و دوربین را در ایستگاه های مختلف قرار می دادند و صفحه شطرنجی را برداشت کردند. در همه ایستگاه ها فاصله یاب دوبعدی ۹۰ درجه دوران داده می شد و قید جدیدی را ایجاد می کرد. با بهینه سازی تابع هزینه نهایی که شامل دو

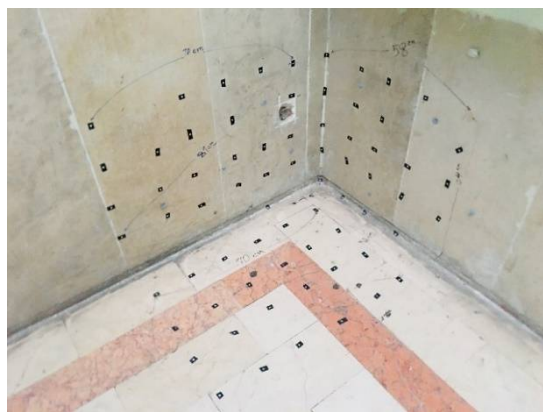
^۱ Projection

قید نقطه روی صفحه و قید اضافی بودند پارامترهای کالیبراسیون را محاسبه کردند.

منوچهری و همکاران [۱۹] یک روش کالیبراسیون به نام ابر نقطه سه بعدی برای کالیبراسیون فاصله‌یاب و دوربین ارائه دادند. در این روش با استفاده از یک سرووموتور، فاصله‌یاب دو بعدی دوران پیدا می‌کرد و ابر نقطه سه بعدی از تست فیلد تهیه می‌کرد. تست فیلد مورد استفاده علاوه بر تارگت‌های فتوگرامتری دارای تعدادی توپ پینگ پنگ بود. سپس نقاط مربوط به هر توپ پینگ پنگ جدا می‌شد و به آن‌ها یک کره برازش داده می‌شد. مختصات مراکز کره‌های برازش داده شده به عنوان مختصات مراکز توپ‌های پینگ پنگ در ابر نقطه در نظر گرفته می‌شد. علاوه بر این، در همان ایستگاهی که ابر نقطه سه بعدی برداشت می‌شد، یک تصویر از تست فیلد گرفته می‌شد. دوربین در موقعیت‌های دیگر قرار می‌گرفت و تصاویر بیشتری از تست فیلد گرفته می‌شد و با انجام باندل اجسمنت مختصات همه تارگت‌ها و توپ‌های پینگ پنگ محاسبه می‌شد. با داشتن مختصات مختصات توپ‌های پینگ پنگ در دو سیستم مختصات فاصله‌یاب سه بعدی و دوربین، پارامترهای کالیبراسیون با استفاده از معادلات کانفرمال سه بعدی به دست می‌آمد. مشکل این روش زمانبر بودن انتخاب نقاط مربوط به هر توپ در ابر نقطه است که فرآیندی زمانبر است. همچنین این روش نیازمند توسپ‌های پینگ پنگ است که در اکثر تست فیلدهای فتوگرامتری وجود ندارند. منوچهری و همکاران [۲۰] روش کالیبراسیون با ابر نقطه سه بعدی را با چند روش دیگر [۲۱، ۱۳] مقایسه کردند و روش کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه بعدی دقت بسیار خوبی داشت.

تست فیلدهای فتوگرامتری غالباً در فرآیند کالیبراسیون لایدهای سه بعدی [۲۳] و دوربین [۲۴، ۲۳] به کار برده می‌شوند. همچنین استفاده از تست فیلد برای کالیبراسیون خارجی سنسورهای دوربین و فاصله‌یاب در دسر زیادی ندارد. این مقاله یک روش برای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب دوبریدی با استفاده از یک تست فیلد سه بعدی بدون استفاده از توپ‌های پینگ پنگ ارائه می‌دهد ولی به دقتی مشابه با روش کالیبراسیون با ابر نقطه سه بعدی [۱۹] می‌رسد. مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش فوق عدم

استفاده از توپ‌های پینگ پنگ و انتخاب نقاط مربوط به هر توپ به صورت دستی در فرآیند کالیبراسیون است که فرآیندی زمان‌بر است. از سوی دیگر فومیو و همکاران [۱۸] که از صفحات شطرنجی برای کالیبراسیون فاصله‌یاب و دوربین استفاده می‌کردند، از معادلات DLT برای تعیین پارامترهای خارجی دوربین بهره می‌بردند که نسبت به معادلات شرط هم خطی دقت کمتری دارند. در این تحقیق از معادلات شرط هم خطی و از یک تست فیلد سه بعدی استفاده شد. همچنین این روش نسبت به روش فومیو و همکاران [۱۸] در هر ایستگاه یک تست فیلد سه بعدی را به جای یک صفحه شطرنجی برداشت می‌کند و از نظر فتوگرامتری انتظار می‌رود که به دقت بهتری منجر شود. شکل ۱ تست فیلدی را نشان می‌دهد که از تعدادی تارگت رایج در فتوگرامتری و تعدادی توپ تشکیل شده است. تمامی تارگت‌ها با توزیع یکسان بر روی کف اتاق و دیوارها نصب شده اند. تارگت‌ها در تصاویر به خاطر کنتراست بین رنگ سیاه و سفید به راحتی قابل شناسایی هستند. می‌توان به سادگی در هر گوشه ای از اتاق تارگت‌ها را نصب کرد و عملیات کالیبراسیون را انجام داد. در این تحقیق تست فیلد به عنوان یک مرجع مشترک برای کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب استفاده شد.

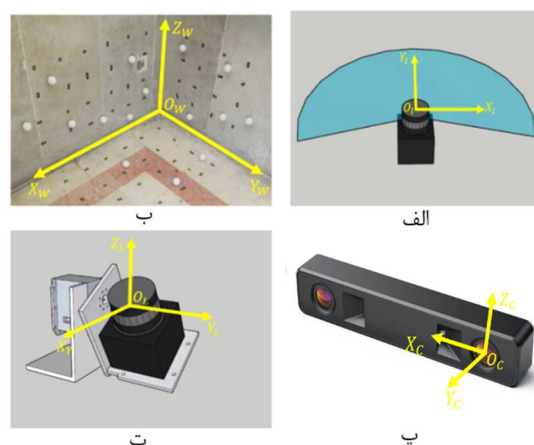


شکل ۱- تست فیلد مورد استفاده در این تحقیق

در بخش دوم این مقاله روش پیشنهادی برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین ارائه می‌شود. بخش سوم پیاده‌سازی روش ارائه شده و دو روش جدید دیگر با سیستم طراحی شده را به تفصیل بیان می‌کند. در بخش چهارم دقت و نتایج کالیبراسیون روش پیشنهادی و دو روش دیگر آورده شده است. بخش پنجم این مقاله مربوط به نتیجه‌گیری است.

۲- روش پیشنهادی

در این مطالعه، برای درک بهتر روش پیشنهادی در ابتدا تعاریفی از سیستم‌های مختصات مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است. در شکل ۲، چهار سیستم مختصات مربوط به تست فیلد، دوربین، فاصله یاب (منظور از فاصله یاب یک سیستم تولید ابر نقطه سه بعدی است که در بخش ۲-۴ نیز توضیح داده می شود) و فاصله یاب دوبعدی نشان داده شده است.



شکل ۲- الف: سیستم مختصات فاصله یاب دوبعدی، ب: سیستم مختصات تست فیلد، پ: سیستم مختصات دوربین که مبدأ آن مرکز اپتیکی دوربین است، در این شکل دوربین سمت چپ از یک دوربین استریو، به عنوان مبدأ سیستم مختصات قرار داده شده است، ت: سیستم مختصات مربوط به فاصله یاب

بطوری که سیستم مختصات فاصله یاب دوبعدی با $(O_L - X_L Y_L Z_L)$ نشان داده شده است. محور Y این سیستم مختصات دقیقاً رو به سمت جلوی آن تعریف می شود. محور X در این سیستم مختصات نیز قائم بر محور Y و در سمت راست آن در صفحه اسکن قرار می گیرد. سیستم مختصات تست فیلد با $(O_W - X_W Y_W Z_W)$ نشان داده شده است. مبدأ این سیستم مختصات، گوشه اتاق است و فصل مشترک دیوارها و کف اتاق محورهای این سیستم مختصات را تشکیل می دهند. سیستم مختصات دوربین با $(O_C - X_C Y_C Z_C)$ نشان داده شده است. مرکز اپتیکی دوربین، مبدأ سیستم مختصات دوربین است و صفحه XZ آن با صفحه تصویر موازی است. سیستم مختصات فاصله یاب نیز با $(O_L - X_L Y_L Z_L)$ نشان داده شده است. فاصله یاب را می توان به یک سروموتور متصل کرد و محیط را به صورت سه بعدی برداشت کرد. محور Y در این سیستم مختصات به سمت جلوی فاصله یاب

و در امتداد شفت سروو موتور است و محور X آن عمود به محور Y در سمت چپ با ۹۰ درجه انحراف قرار دارد. محور Z این سیستم مختصات نیز در امتداد شاقولی طوری تعریف می شود که سیستم دست راستی باشد. در بخش ۲-۴، توجیه محورهای این سیستم با بیان شده است.

با انجام کالیبراسیون خارجی، فاصله یاب و دوربین با یکدیگر ارتباط برقرار می کنند. این کار امکان انتقال هر نقطه که توسط فاصله یاب اندازه گیری شده به سیستم مختصات دوربین و برعکس را به دنبال دارد. پارامترهای کالیبراسیون شامل ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات فاصله یاب و سیستم مختصات دوربین هستند. برای هر نقطه دلخواهی مثل P، مختصات آن نقطه را در سیستم مختصات فاصله یاب با $P_L = (x_L, y_L, z_L)$ ، در سیستم مختصات دوربین با $P_C = (x_C, y_C, z_C)$ و در سیستم مختصات تست فیلد با $P_W = (x_W, y_W, z_W)$ نشان داده می شود. پارامترهای کالیبراسیون خارجی با استفاده از R_{LC} و T_{LC} به ترتیب به عنوان ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات فاصله یاب و دوربین مشخص می شوند. برای هر نقطه دلخواهی همچون P، رابطه (۱) برقرار است:

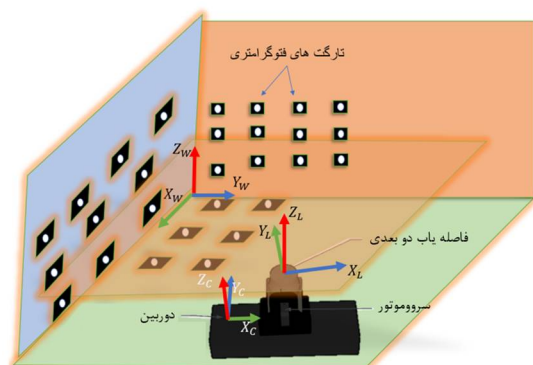
$$P_C = R_{LC} P_L + T_{LC} \quad (1)$$

رابطه (۱) ارتباط بین سیستم مختصات فاصله یاب و سیستم مختصات دوربین را نشان می دهد. در ادامه روشی جدید برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب و دوربین ارائه می شود. در روش ارائه شده فاصله یاب و دوربین در تمامی ایستگاهها ابر نقطه سه بعدی و تصویر برداشت می کنند.

شکل ۳ مراحل انجام کالیبراسیون روش پیشنهادی را نمایش می دهد. در هر ایستگاه فاصله یاب دوبعدی توسط یک سروو موتور دوران می یابد و یک ابر نقطه سه بعدی از تست فیلد تهیه می کند. در تمامی ابر نقاط تولید شده از تست فیلد در ایستگاههای مختلف، بردار نرمال بر دیوارها و کف تست فیلد محاسبه می شود. علاوه بر ابر نقاط تولید شده در ایستگاهها، تصاویری از تست فیلد گرفته می شود. با استفاده از تصاویر گرفته شده، باندل اجسمنت^۱ انجام می شود و مختصات همه تارگتها در سیستم مختصات دوربین در همه ایستگاهها محاسبه می شود. سپس بردار

^۱ Bundle adjustment

موقعیت مبدأ تست فیلد در سیستم مختصات دوربین در ایستگاه نام است و N_b تعداد ایستگاه‌هایی است که دوربین و فاصله‌یاب در این ایستگاه‌ها تست فیلد را برداشت می‌کنند.



شکل ۴- ارتباط بین پارامترهای خارجی فاصله‌یاب و دوربین و سیستم‌های مختصات در یک ایستگاه در برابر تست فیلد

نقطه لیزری نام در ابرنقطه تهیه شده در ایستگاه نام که بر روی صفحه q_k قرار دارد با $P_{k,L}^{i,j}$ نشان داده می‌شود. به این ترتیب:

$$P_C^{i,j} = R_{LC} P_{k,L}^{i,j} + T_{LC} \quad (3)$$

$P_C^{i,j}$ نقطه متناظر در سیستم مختصات دوربین در ایستگاه نام را نشان می‌دهد. تعداد نقاط ابرنقطه روی صفحه q_k در ایستگاه نام با n_k^i نشان داده می‌شود.

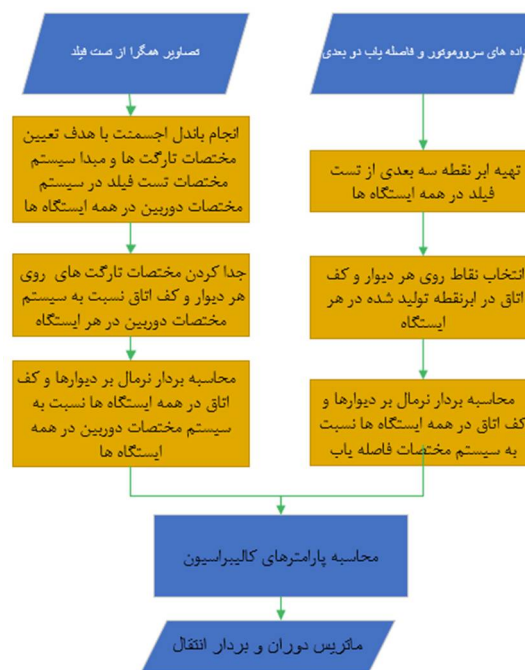
رابطه ۲ نشان می‌دهد که حاصل ضرب داخلی بردار نرمال بر صفحه q_k در ایستگاه نام و بردار موقعیت مبدأ تست فیلد در سیستم مختصات دوربین در همان ایستگاه برابر است با حاصل ضرب داخلی بردار موقعیت هر نقطه فاصله‌یاب روی صفحه q_k در ایستگاه نام در سیستم مختصات دوربین است. علاوه بر قید نقطه روی صفحه، قید دیگری که در بخش ۲-۲ شرح داده می‌شود، در کالیبراسیون مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۲- قید اضافی

چنانچه در ایستگاه نام، بردار نرمال بر صفحه q_k در سیستم مختصات دوربین را با $N_{k,C}^i$ نشان دهیم و همچنین بردار نرمال در سیستم مختصات فاصله‌یاب را با $N_{k,L}^i$ نشان دهیم، آنگاه این دو بردار به صورت زیر با هم مرتبط هستند:

$$N_{k,C}^i = R_{LC} N_{k,L}^i \quad (4)$$

نرمال بر دیوارها و کف تست فیلد باتوجه به مختصات محاسبه شده تارگت‌ها نسبت به سیستم مختصات دوربین در ایستگاه‌های مختلف، محاسبه می‌شود. در آخر پارامترهای کالیبراسیون با استفاده از قیودی که در ادامه توضیح داده می‌شود به دست می‌آیند.



شکل ۳- فلوچارت کالیبراسیون به روش پیشنهادی

۱-۲- قیدهای اساسی

شکل ۴ ارتباط بین پارامترهای خارجی فاصله‌یاب و دوربین و سیستم‌های مختصات را در یک ایستگاه نمایش می‌دهد. پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین سیستم مختصات فاصله‌یاب و دوربین با R_{LC} و T_{LC} بیان می‌شود که به ترتیب ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات فاصله‌یاب و دوربین است. روش‌های کالیبراسیون مرسوم [۲۴] از قید نقطه روی صفحه برای یک تست فیلد صفحه‌ای شطرنجی استفاده می‌کنند، اما در این تحقیق از قیود اساسی نقطه روی صفحه برای یک تست فیلد سه بعدی فتوگرامتری که در گوشه یک اتاق قرار دارد، استفاده خواهد شد. به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\arg \min_{R_{LC}, T_{LC}} \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{k=1}^3 \frac{1}{n_k^i} \sum_{j=1}^{n_k^i} (r_k^{i^T} (R_{LC} P_{k,L}^{i,j} + T_{LC}) - r_k^{i^T} t^i)^2 \quad (2)$$

از نظر هندسی r_k^i بردار نرمال بر صفحه q_k در سیستم مختصات دوربین در ایستگاه نام است، t^i نشان‌دهنده

اگر بتوان این بردارها را به دست آورد، آنگاه می‌توان با کمینه‌کردن تفاوت بین $N_{k,C}^i$ و r_k^i را محاسبه کرد:

$$\arg \min_{R_{LC}} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{k=1}^3 \|r_k^i - R_{LC} N_{k,L}^i\| \quad (5)$$

ژو و دن [۲۷] برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای دورانی فاصله‌یاب سه‌بعدی به‌صورت مستقل، از چنین قیدی برای یک تست فیلد مسطح استفاده کرده است.

۲-۳- تعیین پارامترهای کالیبراسیون

قیود اضافی (۵) بر اساس بردار نرمال بر صفحات تست فیلد در سیستم مختصات‌های فاصله‌یاب و دوربین هستند. در کالیبراسیون‌هایی که از ابرنقاط سه‌بعدی استفاده می‌کنند (از طریق فاصله‌یاب سه‌بعدی یا فاصله‌یاب دوبعدی دوار که به یک سروو موتور متصل باشد) قیود اضافی بادقت بیشتری از اسکن متراکم سه‌بعدی به دست می‌آید و بنابراین همان‌طور که در [۲۷] نشان داده شده است، می‌توان دوران و انتقال را جداگانه و دقیق محاسبه نمود. در حالی که در کالیبراسیون‌هایی که از فاصله‌یاب دوبعدی استفاده می‌شود [۱۸]، قیود اضافی (۵) به دلیل تراکم پایین نقاط خیلی موثر نیستند. بنابراین برای محاسبه پارامترهای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب، قیود اضافی (۵) را به قیود اساسی (۲) اضافه می‌کنیم. به این ترتیب:

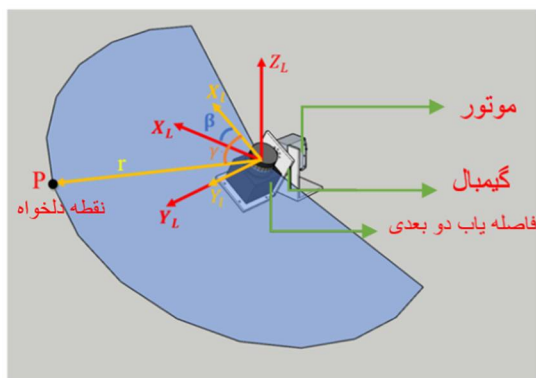
$$\arg \min_{R_{LC}, T_{LC}} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{k=1}^3 \frac{1}{n_k^i} \sum_{j=1}^{n_k^i} (r_k^{i,T} (R_{LC} P_{k,L}^{i,j} + T_{LC}) - r_k^{i,T} t^i)^2 + \arg \min_{R_{LC}} \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{k=1}^3 \|r_k^i - R_{LC} N_{k,L}^i\| \quad (6)$$

۲-۴- تهیه ابرنقطه سه‌بعدی

لایدارهای دوبعدی اشعه لیزر را با سرعت بسیار زیادی در یک صفحه با فاصله زاویه‌ای یکسان دوران می‌دهند و به‌صورت هم‌زمان طول تک‌تک نقاط را از مرکز ارسال اشعه اندازه می‌گیرند. اگر این فاصله‌یاب‌ها حول یک محور، مثلاً امتداد شفت یک سروو موتور که از مرکز فاصله‌یاب عبور می‌کند، دوران یابد، می‌تواند از محیط یک ابرنقطه سه‌بعدی تهیه کند. سروو موتورهایی که مقدار چرخش شفت را بادقت بالا اندازه‌گیری می‌کنند، می‌توانند برای چرخش فاصله‌یاب‌های دوبعدی و تهیه ابرنقطه سه‌بعدی استفاده شوند. چنانچه فاصله‌یاب دوبعدی را بتوان به یک سروو

موتور متصل نمود طوری که امتداد شفت سروو موتور از محل ارسال اشعه لیزر فاصله‌یاب دوبعدی عبور کند (مرکز فاصله‌یاب دوبعدی) یک فاصله‌یاب سه‌بعدی ساخته می‌شود. در چنین حالتی محور Y_L بر امتداد شفت سروو موتور منطبق خواهد شد. محور Z فاصله‌یاب سه‌بعدی (محور Z_L) بر محور Y_L عمود و در امتداد شاقولی تعریف می‌شود. برای اینکه سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی دست راستی باشد محور X_L را طوری تعریف می‌شود که از قانون دست راست در تعریف سیستم‌های مختصات تبعیت کند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده، برای هر نقطه دلخواه P سه پارامتر اندازه‌گیری می‌شود که شامل طول بین مرکز فاصله‌یاب تا نقطه‌ی دلخواه P (r)، زاویه بین محور X_L با بردار r (γ)، زاویه مابین محور X_L و محور X_L (β)، که دقیقاً زاویه مابین صفحه‌ی $X_L O_L Y_L$ و صفحه‌ی $X_L O_L P$ می‌باشد) که این زاویه به وسیله آنکودر موجود در سروموتور اندازه گرفته می‌شود. در صورتی که زاویه β مقدارش صفر باشد، محورهای X_L و X_L دقیقاً منطبق خواهند شد. مختصات هر نقطه دلخواه P که توسط سیستم فاصله‌یاب سه‌بعدی برداشت شده با استفاده از روابط (۷) در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی به دست می‌آید.

$$\begin{cases} x_L = r \cos(\gamma) \cos(\beta) \\ y_L = r \sin(\gamma) \\ z_L = r \cos(\gamma) \sin(\beta) \end{cases} \quad (7)$$



شکل ۵- ساختار سیستم فاصله‌یاب سه‌بعدی که شامل فاصله‌یاب دوبعدی و سروموتور است و توسط یک گیمبال به هم متصل شده‌اند

از طریق دیتاهایی که سروموتور و فاصله‌یاب دوبعدی به ما می‌دهند و رابطه (۷۷) یک ابر نقطه سه‌بعدی را می‌توان تولید کرد. سیستم موردنظر می‌تواند در

ایستگاه‌های مختلف قرار می‌گیرد و از تست فیلد موردنظر ابر نقطه سه‌بعدی تولید می‌کند.

۲-۵- محاسبه t^i از طریق باندل اجسمنت

همان‌طور که گفته شد، t^i مختصات مبدأ سیستم مختصات تست فیلد نسبت به سیستم مختصات دوربین در ایستگاه نام است. در تمام ایستگاه‌ها فاصله‌یاب و دوربین تست فیلد را برداشت می‌کنند. با داشتن مجموعه ای از تصاویر در ایستگاه‌های مختلف می‌توان از طریق تکنیک باندل اجسمنت^۱ [۲۸] پارامترهای توجیه داخلی دوربین‌ها، توجیه خارجی دوربین‌ها و مختصات همه نقاط گرهی را محاسبه نمود.

در فرآیند باندل اجسمنت، مراکز تارگت‌های فتوگرامتری به‌عنوان نقاط گرهی در تصاویر در نظر گرفته می‌شوند. در صورتی که حداقل مختصات سه‌بعدی سه تارگت غیرواقع بر روی یک خط در اختیار باشد می‌توان باندل اجسمنت را انجام داد. به‌این‌ترتیب با انجام فرآیند باندل اجسمنت، علاوه بر پارامترهای توجیه داخلی و توجیه خارجی دوربین، مختصات سه‌بعدی مراکز تارگت‌های سیاه‌وسفید در سیستم مختصات دوربین به دست می‌آید. پس از انجام باندل اجسمنت، مختصات همه دوربین‌ها نسبت به سیستم مختصات تست فیلد در اختیار است. با قراردادن مبدأ سیستم مختصات سه‌بعدی در مرکز اپتیکی دوربین در هر ایستگاه، مختصات همه تارگت‌ها و همچنین مبدأ سیستم مختصات تست فیلد نسبت به سیستم مختصات دوربین در هر ایستگاه (t^i) به دست می‌آید.

۲-۶- محاسبه r_k^i

همان‌طور که گفته شد r_k^i بردار نرمال بر صفحه q_k در سیستم مختصات دوربین در ایستگاه نام است. در قسمت قبل نحوه محاسبه مختصات تارگت‌ها نسبت به سیستم مختصات دوربین در هر ایستگاه گفته شد. برای هر ایستگاه نام مختصات تارگت‌ها نسبت به سیستم مختصات دوربین در آن ایستگاه در اختیار است. با داشتن مختصات حداقل سه تارگت در صفحه q_k که روی یک خط نباشند، می‌توان بردار نرمال بر q_k را به‌راحتی محاسبه نمود. اگر بیش از سه

نقطه در اختیار باشد از طریق سرشکنی، بردار r_k^i به‌راحتی محاسبه می‌شود. بدیهی است که هرچه نقاط بیشتری در محاسبه r_k^i استفاده شود، دقت آن بیشتر خواهد بود.

۲-۷- محاسبه $N_{k,l}^i$

همان‌طور که قبلاً گفته شد $N_{k,l}^i$ بردار نرمال بر صفحه q_k نسبت به سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی در ایستگاه نام است. از نظر تئوری برای محاسبه $N_{k,l}^i$ با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی تولید شده در ایستگاه نام، حداقل به سه نقطه بر روی صفحه q_k که روی یک خط نباشند نیاز است تا معادله صفحه q_k و بردار نرمال بر آن را به دست آورد. در عمل می‌توان با استفاده از نقاط بیشتر و از طریق سرشکنی $N_{k,l}^i$ را محاسبه نمود. هر چه تعداد نقاط برای برازش صفحه بیشتر باشد، بردار نرمال بر صفحات بادقت بهتری محاسبه خواهد داشت.

۲-۸- تعیین مقادیر اولیه

با داشتن r_k^i ، $N_{k,l}^i$ ، t^i و ابرنقاط ایستگاه‌های مختلف ($P_{k,K}^{i,j}$)، از طریق کمینه کردن معادله (۶)، پارامترهای کالیبراسیون به دست می‌آید. برای کمینه کردن رابطه ۶ از طریق کمترین مربعات مقادیر اولیه ماتریس دوران و بردار انتقال نیاز است. از رابطه (۶) قیود اساسی در تعیین پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین را می‌توان به شکل یک سیستم خطی توصیف کرد:

$$\begin{bmatrix} r_{x_k}^i \\ r_{y_k}^i \\ r_{z_k}^i \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k,L}^{i,j} \\ y_{k,L}^{i,j} \\ z_{k,L}^{i,j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_{x_k}^i \\ t_{y_k}^i \\ t_{z_k}^i \end{bmatrix} \right\} = 0 \quad (۸)$$

که r_{mn} اجزا ماتریس دوران R_{LC} و بردار انتقال به‌صورت $P_{k,L}^{i,j} = [x_{k,L}^{i,j}, y_{k,L}^{i,j}, z_{k,L}^{i,j}]^T$ می‌باشد. $T_{LC} = [t_x, t_y, t_z]^T$ یک نقطه از ابرنقطه تولید شده در ایستگاه نام روی صفحه q_k از تست فیلد می‌باشد. $r_k^i = [r_{x_k}^i, r_{y_k}^i, r_{z_k}^i]^T$ بردار نرمال بر صفحه q_k در ایستگاه نام در سیستم مختصات دوربین و $t^i = [t_{x_k}^i, t_{y_k}^i, t_{z_k}^i]^T$ بردار موقعیت مبدأ سیستم مختصات تست فیلد نسبت به دوربین در ایستگاه نام است. به طریق مشابه سیستم خطی برای قیود اضافه به شکل زیر خواهد بود:

^۱ Bundel adjustment

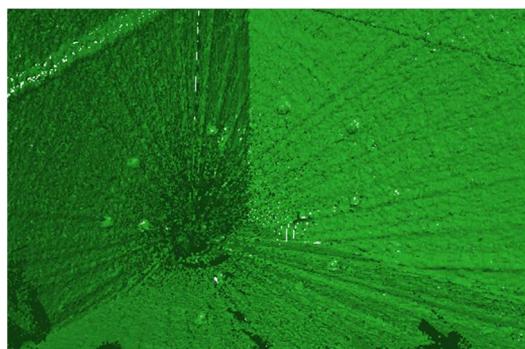
سیستم ساخته شده با زبان سی پلاس پلاس و در سیستم عامل ربات‌ها [۲۹] در محیط linux نوشته شد.



شکل ۶- سیستم طراحی شده که شامل سروموتور، فاصله‌یاب دوبعدی و یک دوربین استریو است

۳-۱- کالیبراسیون با استفاده از روش پیشنهادی

برای انجام کالیبراسیون مطابق روش پیشنهادی، سیستم موردنظر در ۱۲ ایستگاه مختلف در برابر تست فیلد قرار گرفت و در هر ایستگاه یک ابر نقطه سه‌بعدی و یک تصویر از تست فیلد برداشت شد. در ابر نقطه برداشت شده فقط آن نقاطی که دقیقاً روی سطح دیوارها و کف اتاق قرار داشتند برای کالیبراسیون استفاده شدند. سپس با استفاده از ۵۰ تا ۱۰۰ نقطه موجود در روی هر دیوار و کف اتاق در هر ایستگاه، بردار نرمال در سیستم مختصات فاصله‌یاب $(N_{k,l}^i)$ مطابق آنچه در بخش ۲-۷ گفته شد، محاسبه شد. برای هر ایستگاه، ۳ بردار نرمال در سیستم مختصات فاصله‌یاب محاسبه شد.



شکل ۷- نمونه‌ای از ابر نقطه سه‌بعدی تهیه شده از تست فیلد در یکی از ایستگاه‌ها

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{x_k}^i \\ n_{y_k}^i \\ n_{z_k}^i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{x_k}^i \\ r_{y_k}^i \\ r_{z_k}^i \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

در رابطه (۹)، $N_{k,L}^i = [n_{x_k}^i, n_{y_k}^i, n_{z_k}^i]^T$ بردار نرمال بر صفحه q_k در سیستم مختصات فاصله‌یاب در ایستگاه نام است. در محاسبه پارامترهای کالیبراسیون به صورت یکجا، معادلات خطی (۹) به معادلات خطی (۸) اضافه می‌شود و در نهایت یک مجموعه معادله خطی حاصل می‌شود که با استفاده از کمترین مربعات حل می‌شود. جوابی که به دست می‌آید به عنوان مقادیر اولیه برای بهینه سازی غیرخطی رابطه (۶) استفاده می‌شود.

۳- پیاده‌سازی

در این مقاله سه آزمایش با استفاده از داده‌های واقعی جهت پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی انجام شد. در آزمایش اول، روش پیشنهادی در این مقاله پیاده‌سازی شد. دو روش دیگر نیز برای ارزیابی روش پیشنهادی پیاده‌سازی شدند. سنسورهای مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل یک دوربین استریو MYNT EYE D1000 با فاصله کانونی ۲/۴۵ میلی‌متر و ابعاد ۱۲۸۰×۷۲۰ و یک فاصله‌یاب دوبعدی Hokuyo URG-04LX-UG01 بود. فاصله‌یاب دوبعدی موردنظر دارای میدان دید ۲۴۰ درجه و قدرت تفکیک زاویه‌ای ۰/۳۵۲ درجه است. این فاصله‌یاب می‌تواند حداکثر تا فاصله ۵/۶ متر را اندازه‌گیری کند. فاصله‌یاب برای فواصل کمتر از یک متر دارای دقت ± 30 میلی‌متر و برای فاصله‌های بزرگتر از یک متر، دارای دقت ۳ درصد طول اندازه‌گیری شده است. سروموتور DYNAMIXEL MX-28T برای دوران فاصله‌یاب استفاده شد که می‌تواند مقدار زاویه دوران محور را با دقت ۰/۰۸۸ درجه اندازه‌گیری کند. در کالیبراسیون‌های انجام شده، ماتریس دوران و بردار انتقال دوربین سمت چپ و فاصله‌یاب نسبت به هم محاسبه شد. برای انجام آزمایش‌ها، یک سیستم مطابق شکل ۶ طراحی و ساخته شد. از تست فیلدی که در شکل ۱ نمایش داده شده است برای کالیبراسیون استفاده شد.

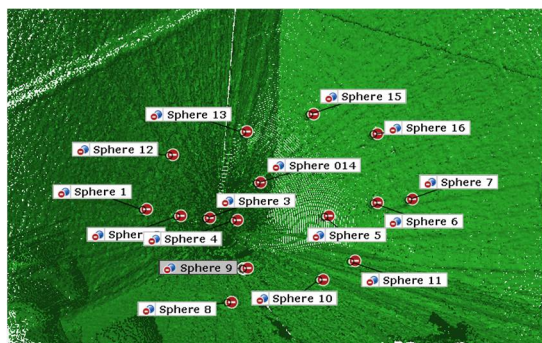
تست فیلد مورد استفاده ابعادی کمتر از دو متر مکعب داشت. نقاط کنترل با توزیع یکسان روی دیوارها و کف اتاق نصب شدند. تمام پردازش‌های لازم برای گرفتن داده از سنسورها و تولید ابر نقطه سه‌بعدی توسط برد NVIDIA

تصاویر گرفته شده در ایستگاه‌های مختلف در نرم‌افزار Australis وارد شدند. در این آزمایش مختصات سه بعدی تارگت‌های نصب شده روی دیوارها در سیستم مختصات تست فیلد (شکل ۱) در اختیار است. پس از انجام باندل‌اجسمت با استفاده از تصاویر گرفته شده، پارامترهای توجیه خارجی و داخلی دوربین‌ها به دست آمد. مقادیر اولیه پارامترهای داخلی دوربین از مستندات دوربین به نرم‌افزار داده شد. در این روش چون نیاز است که مختصات مبدأ سیستم مختصات تست فیلد در سیستم مختصات دوربین در هر ایستگاه در اختیار باشد، به راحتی می‌توان مبدأ سیستم مختصات را به مرکز اپتیکی دوربین در هر ایستگاه منتقل نمود و مختصات مبدأ سیستم مختصات تست فیلد (t^i) را نسبت به سیستم مختصات دوربین در همه ایستگاه‌ها محاسبه کرد. همچنین بردارهای نرمال بر صفحات دیوارها و کف اتاق در سیستم مختصات دوربین در هر ایستگاه (r_k^i) با استفاده از مختصات حداقل سه تارگت روی هر صفحه (کف اتاق یا دیوارها) محاسبه شدند. با در اختیار بودن بردارهای نرمال بر صفحات دیوارها در دو سیستم مختصات فاصله‌یاب ($N_{k,l}^i$) و دوربین (r_k^i) و بردار موقعیت مبدأ سیستم مختصات تست فیلد نسبت به دوربین در ایستگاه‌های مختلف (t^i) پارامترهای کالیبراسیون از طریق کمترین مربعات محاسبه شدند. با توجه شکل ۵، چون سیستم مختصات فاصله‌یاب و دوربین به نحوی در این سیستم توجیه شده اند که تقریباً موازی اند، بردار دوران یک بردار یکه در نظر گرفته شد. مقادیر اولیه بردار انتقال هم باتوجه به فاصله عدسی دوربین از مرکز فاصله‌یاب، برای هر سه مولفه در راستای x ، y و z ۱۲ سانتی متر در نظر گرفته شد. در صورتی که سیستم‌های مختصات وضعیت مشخصی نسبت به هم نداشته باشند می‌توان مطابق آنچه که در بخش ۲-۸ گفته شد، مقادیر اولیه را محاسبه کرد.

۳-۲- انجام کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی [۱۹]

برای پیاده‌سازی این روش، سیستم ساخته شده در برابر تست فیلد به صورتی قرار گرفت که همه تارگت‌ها در کل فضای تصویر در ایستگاه اصلی پخش شدند. در این روش فاصله‌یاب فقط در یک ایستگاه داده جمع آوری می‌کند که به این ایستگاه، ایستگاه اصلی گفته می‌شود. در ایستگاه

اصلی با ترکیب داده‌های فاصله‌یاب دو بعدی و سروموتور یک ابرنقطه سه بعدی با تراکم بسیار زیاد تهیه شد. در داخل تست فیلد تعدادی توپ پینگ‌پنگ برای پیاده‌سازی این روش نصب شد. توپ‌های پینگ‌پنگ بر روی دیوارها و کف اتاق نصب شده بودند. بنابراین در ابرنقطه سه بعدی تهیه شده از تست فیلد، نقاطی که مربوط به توپ‌های پینگ‌پنگ بودند به راحتی از سایر نقاط قابل‌شناسایی بودند. نقاط مربوط به هر توپ در نرم‌افزار گام اینسپکت [۳۰] انتخاب شده و به هر یک از آن‌ها یک کره برازش داده شد. مختصات مراکز کره‌های برازش داده شده به عنوان مختصات مراکز توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه بعدی در نظر گرفته شد. ابرنقطه سه بعدی تولید شده در شکل ۸ نشان داده شده است.

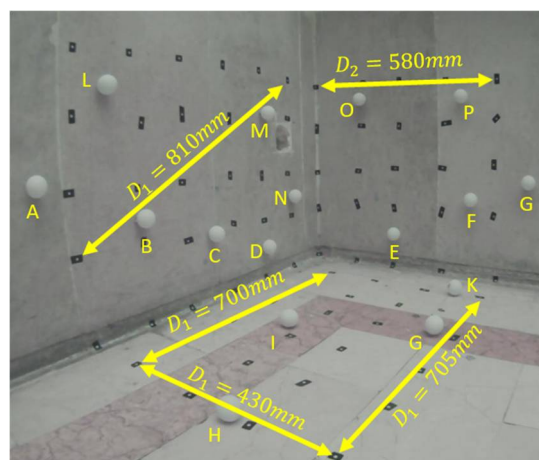


شکل ۸- ابرنقطه سه بعدی برداشت شده توسط سیستم فاصله‌یاب سه بعدی ساخته شده و کره‌های برازش داده شده به توپ‌های پینگ‌پنگ

در ایستگاه اصلی با دوربین‌های چپ و راست از تست فیلد عکس گرفته شد. علاوه بر این، با همان دوربین استریو در موقعیت‌های دیگر از تست فیلد عکس گرفته شد. در مجموع ۱۸ عکس از تست فیلد گرفته شد. مطابق شکل ۸، تارگت‌ها و توپ‌های پینگ‌پنگ به عنوان نقاط متناظر در تصاویر در نظر گرفته شدند و باندل‌اجسمت انجام شد. فرآیند باندل‌اجسمت در نرم‌افزار استرالیس^۱ [۳۱] انجام شد. برای حل مسئله مقیاس، باتوجه به شکل ۸ فاصله بین ۵ جفت تارگت اندازه گرفته شد. این طول‌ها به عنوان قیود ثابت در باندل‌اجسمت اعمال شدند. مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری، مرکز اپتیکی دوربین سمت چپ در ایستگاه اصلی در نظر گرفته شد. به این ترتیب مختصات تارگت‌ها و توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری (سیستم مختصات دوربین در ایستگاه اصلی) به

^۱ Australis

دست آمد. در این روش مختصات تارگتها مجهول در نظر گرفته شد و با استفاده از فاصله‌های اندازه‌گیری شده مسئله مقیاس حل شد.



شکل ۹- تارگتها و فاصله‌های اندازه‌گیری شده برای حل مقیاس

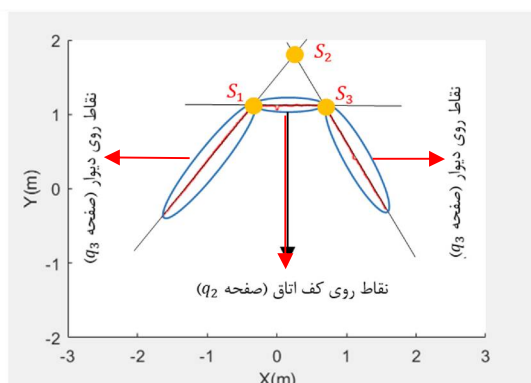
با داشتن مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در دو سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری می‌توان پارامترهای کالیبراسیون را با استفاده از معادلات کانفرمال سه‌بعدی محاسبه کرد. مطابق شکل ۸، مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ که با A، B، C، E، F، G، H، I، J، M، N و P نشان داده شده‌اند به عنوان نقاط کنترل برای به دست آوردن پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین استفاده شدند. مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ که با K، I، D، I، K، L و O نشان داده شده‌اند به عنوان نقاط چک در نظر گرفته شدند. کره‌های A تا P در شکل ۹ به ترتیب متناظر با کره‌های با شماره ۱ تا ۱۶ در شکل ۸ هستند.

۳-۳- انجام کالیبراسیون با روش جیافن و همکاران [۱۳]

در این روش فرآیند کالیبراسیون فاصله‌یاب دویبعی و دوربین به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود. ابتدا ماتریس دوران و بردار انتقال دوربین نسبت به سیستم مختصات تست فیلد محاسبه می‌شود. در مرحله دوم ماتریس دوران و بردار انتقال فاصله‌یاب دویبعی نسبت به سیستم مختصات گوشه اتاق محاسبه می‌شود. برای انجام کالیبراسیون مطابق این روش، سیستم در یک ایستگاه قرار گرفت. در این روش یک تصویر از تست فیلد و یک پروفیل دویبعی که کف اتاق و دیوارهای تشکیل دهنده تست فیلد را برداشت کند، برای

انجام کالیبراسیون کافی است. در این آزمایش زاویه دوران صفحه فاصله‌یاب دویبعی (γ) صفر تنظیم شد در چنین حالتی محورهای X_L و Y_L بر محورهای X_L و Y_L منطبق خواهند بود. با اعمال چنین شرایطی انتظار می‌رود که پارامترهای کالیبراسیون این روش با روش‌های قبلی یکسان شود و بتوان آن‌ها را با هم مقایسه کرد.

در مرحله اول مطابق شکل ۹ فاصله‌یاب طوری در برابر تست فیلد قرار داده شد که بتواند در یک اسکن کف اتاق و دیوارهای اتاق را برداشت کند. سپس با توجه به روش توضیح داده شده در تحقیق [۱۳]، بردار انتقال و ماتریس دوران فاصله‌یاب دویبعی نسبت به تست فیلد با استفاده از روش P3P و سه نقطه S_1 ، S_2 و S_3 به دست آمد.



شکل ۱۰- ابرنقطه دویبعی حاصل از برداشت توپ‌های پینگ‌پنگ

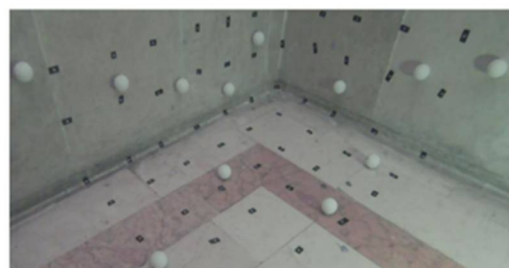
مطابق شکل ۱۰، در مرحله دوم یک تصویر از تست فیلد گرفته شد. تصویر گرفته شده با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین توسط نرم‌افزار ای جی آی سافت متاشپ^۱، با حذف تأثیر اعوجاج لنزها، تصحیح شد.

در ادامه ضرایب DLT برای تصویر پالایش شده با استفاده از ۵۶ نقطه کنترل محاسبه شد. ماتریس دوران و بردار انتقال تصویر فوق نسبت به تست فیلد با استفاده از ضرایب DLT به دست آمد.

در آخر، با استفاده از ماتریس‌های دوران و بردار انتقال دوربین و فاصله‌یاب دویبعی نسبت به تست فیلد، پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب دویبعی نسبت به دوربین به دست آمدند. در این روش هنگام محاسبه پارامترهای توجه خارجی فاصله‌یاب دویبعی این فرض لحاظ شده که دیوارها و کف اتاق دویعه دو برهم عمودند ولی در واقعیت ممکن است چنین نباشد. هر چه زاویه بین کف

^۱ Agisoft Metashape

اتاق و دیوارها انحراف بیشتری از ۹۰ درجه داشته باشند، پارامترهای توجیه خارجی فاصله‌یاب دوبعدی خطای بیشتری خواهند داشت.



الف



ب

شکل ۱۱- الف: تصویر پالایش‌شده، ب: تصویر گرفته‌شده با دوربین که دارای اعوجاج است.

۴- نتایج و ارزیابی

مطابق آنچه که در بخش ۳-۲ گفته شد سیستم در برابر تست فیلد قرار گرفت و یک ابرنقطه سه‌بعدی تهیه شد. توپ‌ها به دلیل ساختار کروی در ابر نقطه به راحتی قابل شناسایی هستند. به هر کدام از توپ‌ها یک کره برازش داده شد. مختصات مراکز کره‌های برازش داده شده به عنوان مختصات مراکز آن توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب در نظر گرفته شد. همچنین با استفاده از تصاویر گرفته شده و انجام باندل اجسمنت مختصات توپ‌ها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری (همان سیستم مختصات دوربین که در این مقاله توضیح داده شد) محاسبه شد. با در اختیار داشتن مختصات توپ‌ها در دو سیستم مختصات مختلف، می‌توان از تعدادی از این توپ‌ها برای ارزیابی روش‌های کالیبراسیون به عنوان نقاط چک استفاده کرد. توپ‌هایی که با D، I، K، L و O نشان داده شده‌اند به عنوان نقاط چک در نظر گرفته شد. با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین دوربین سمت چپ و فاصله‌یاب که در سه آزمایش به دست آمد، مقدار RMSE هر سه

آزمایش محاسبه شد. در جدول ۱ پارامترهای کالیبراسیون و مقدار RMSE هر روش آورده شده است.

جدول ۴، ۳، جدول ۴ و جدول ۵ مختصات محاسبه‌شده‌ی نقاط چک و خطای آن‌ها را در سه روش پیاده‌سازی شده نشان می‌دهد.

در فرآیند ارزیابی روش‌های پیاده‌سازی شده در روش [۱۹]، مراکز توپ‌ها هم به عنوان نقاط چک و هم به عنوان نقاط کنترل استفاده شدند. نقاط کنترل برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون استفاده می‌شوند. در پیاده‌سازی کالیبراسیون به روش جیافن و همکاران [۱۳] که در بخش ۳-۳ انجام شد، با استفاده از هرم با قائده‌ی قائم الزاویه که در گوشه‌ی اتاق ساخته می‌شود، پارامترهای کالیبراسیون به دست می‌آید. در این روش هیچ نقطه‌ی کنترلی برای محاسبه پارامترهای کالیبراسیون استفاده نشده است و پارامترهای کالیبراسیون از طریق هندسه ایجاد شده در گوشه‌ی اتاق به دست آمدند و پارامتری تحت عنوان RMSE نقاط کنترل در این روش تعریف نمی‌شود. RMSE نقاط کنترل در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی [۱۹] را می‌توان به دست آورد ولی چون نقاط کنترل در تعیین پارامترهای کالیبراسیون فقط در این روش به کار رفته اند، نمی‌توان آن‌ها را با دو روش پیاده‌سازی شده دیگر مقایسه کرد.

از سوی دیگر، تعدادی از توپ‌های پینگ‌پنگ که در ابر نقطه سه‌بعدی پراکنده بودند به عنوان نقاط چک جهت ارزیابی سه روش ارائه شده در نظر گرفته شدند. چون این نقاط در محاسبه پارامترهای کالیبراسیون حضور نداشتند و با توزیع مناسبی در محیط تست فیلد پخش شده‌اند، در نتیجه RMSE نقاط چک برای مقایسه و ارزیابی سه روش پیاده‌سازی شده بسیار مناسب است. با توجه به RMSE‌های محاسبه شده برای هر سه روش، به ترتیب کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی [۱۹]، کالیبراسیون روش پیشنهادی و در نهایت کالیبراسیون با استفاده از تست فیلد فتوگرامتریک [۱۳] داشتند.

از سویی دیگر پیاده‌سازی هر کدام از روش‌ها دارای چالش‌ها و مزایای مربوط به خود هستند. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی نیاز است که فاصله‌یاب دوبعدی به یک سروو موتور متصل باشد و یک گیمبال باتوجه به ابعاد و مرکز ارسال پرتو لیزر فاصله‌یاب، طراحی و ساخته شود که کاری زمان‌بر است. علاوه بر این

داده‌های فاصله‌یاب و انکودر سروموتور باید به‌صورت هم‌زمان ضبط شوند تا ابرنقاط دوبعدی نسبت به هم در یک ایستگاه هم‌مرجع شوند که نیازمند برنامه‌نویسی سطح بالایی است. باتوجه‌به چالش‌های موجود، این روش بیشترین دقت را نسبت به دو روش دیگر داشت. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی، توپ‌های پینگ‌پنگ باید حتماً بر روی صفحه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی نصب شوند که در عمل وقت‌گیر است درحالی‌که در روش اول نیازی نبود که توپ‌ها بادقت زیادی درون تست‌فیلد قرار بگیرند. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی، اگر صفحه اسکن فاصله‌یاب دقیقاً موازی با یکی از صفحات سیستم مختصات مدل فتوگرامتری باشد، معادلات تعیین پارامترهای کالیبراسیون همگرا نخواهد شد گرچه در عمل امکان ندارد چنین وضعیتی رخ دهد. پیاده‌سازی روش دوم باتوجه‌به چالش‌هایی که دارد بدترین نتیجه را در بین سه روش داشت. در روش کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق هیچ نقطه کنترلی برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون به کار برده نشد بلکه باتوجه‌به وضعیت هندسی گوشه اتاق فرآیند کالیبراسیون انجام شد. این روش با فرض اینکه صفحات اتاق و کف اتاق دوبه‌دو کاملاً برهم عمودند ارائه شده‌است. این روش بعد از روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی که بسیار زمان‌بر است، بیشترین دقت را داشت. روش سوم نسبت به دو روش قبلی از نظر پیاده‌سازی کمترین چالش را دارد.

جدول ۱- پارامترهای کالیبراسیون و RMSE محاسبه‌شده

روش کالیبراسیون	R			T (mm)	RMSE (mm)
روش پیشنهادی	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۷۴/۵	۱۴/۲۴
	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۸/۱	
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۹۲/۲	
کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی [۱۹]	۱/۰۰۰	-۰/۰۰۳	-۰/۰۰۵	۷۱/۱	۱۲/۴۰
	۰/۰۰۴	۰/۹۹۹	۰/۰۳۸	۰/۴	
	۰/۰۰۵	-۰/۰۳۸	۰/۹۹۹	۱۲۶/۰	
کالیبراسیون به روش جی‌اف‌ان همکاران [۱۳]	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۷۱/۹۶۸	۱۵/۹۴
	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۶/۸۷۹	
	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۷۷/۷۴۴	

جدول ۲- مختصات نقاط چک در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری

	شماره نقطه	X	Y	Z
مدل فتوگرامتری	۴	۱۴۲/۱۳	۱۳۲۴/۷۹	۹۸/۳۹
	۹	۹۲/۳۸	۱۰۷۷/۵۵	-۱۳۸/۰۸
	۱۱	۵۴۲/۵۳	۱۰۸۴/۵۳	-۱۱۸/۵۷
	۱۲	-۲۶۱/۵۹	۸۶۵/۰۸	۲۹۹/۸۲
	۱۵	۴۳۳/۰۲	۱۱۴۹/۷۵	۴۸۷/۷۲
فاصله‌یاب	۴	۶۹/۲۲	۱۳۱۵/۷۰	۶/۵۵
	۹	۸/۰۶	۱۰۷۲/۹۸	-۲۲۷/۹۲
	۱۱	۴۷۱/۰۳	۱۰۸۳/۷۴	-۲۲۲/۵۶
	۱۲	-۳۳۳/۲۸	۸۴۶/۷۳	۲۱۷/۰۷
	۱۵	۳۷۹/۲۱	۱۱۳۵/۲۰	۳۹۴/۶۹

جدول ۳- مختصات محاسبه‌شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون پیشنهادی

شماره نقطه	X	Y	Z	خطا X	خطا Y	خطا Z
۴	۱۴۳/۷۲	۱۳۲۳/۸	۹۶/۷۵	۱/۵۹	-۰/۹۹	-۱/۶۴
۹	۸۲/۵۶	۱۰۸۱/۰۸	-۱۳۷/۷۲	-۹/۸۲	۳/۵۳	۰/۳۶
۱۱	۵۴۵/۵۳	۱۰۹۱/۸۴	-۱۳۲/۳۶	۳/۰۰	۷/۳۱	-۱۳/۷۹
۱۲	-۲۵۸/۷۸	۸۵۴/۸۳	۳۰۷/۲۷	۲/۸۱	-۱۰/۲۵	۷/۴۵
۱۵	۴۵۳/۷۱	۱۱۴۳/۳	۴۸۴/۸۸۷	۲۰/۶۸	-۶/۴۵	-۲/۸۳

جدول ۴- مختصات محاسبه‌شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی [۱۹]

شماره نقطه	X	Y	Z	خطا X	خطا Y	خطا Z
۴	۱۳۵/۲۱	۱۳۲۴/۰۷	۹۸/۸۷	-۶/۹۲	-۰/۷۲	۰/۴۸
۹	۷۷/۶۶	۱۰۷۸/۴۸	-۱۳۳/۵۲	-۱۴/۷۲	۰/۹۲	۴/۵۶
۱۱	۵۴۰/۵۰	۱۰۸۹/۳۲	-۱۲۱/۰۹	-۲/۰۳	۴/۷۸	-۲/۵۳
۱۲	-۲۷۰/۵۹	۸۵۷/۷۱	۳۰۸/۸۶	-۸/۱۰	-۷/۳۷	۹/۰۴
۱۵	۴۳۹/۱۰	۱۱۴۸/۳۷	۴۹۳/۹۷	۶/۰۸	-۱/۳۸	۶/۲۵

جدول ۵- مختصات محاسبه‌شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون به روش جیافن و همکاران [۱۳]

شماره نقطه	X	Y	Z	خطا X	خطا Y	خطا Z
۴	۱۳۰/۲	۱۳۲۶/۰	۹۳/۵	-۱۱/۹۵	۱/۱۹	-۴/۹۰
۹	۷۲/۳	۱۰۷۵/۲	-۱۳۳/۴	-۲۰/۰۷	-۲/۳۱	۴/۶۹
۱۱	۵۳۵/۱	۱۰۹۰/۵	-۱۲۵/۴	-۷/۴	۶/۰۱	-۶/۸۳
۱۲	-۲۶۸/۸	۸۶۰/۲	۳۱۶/۵	-۷/۲۴	-۴/۸۱	۱۶/۶۵
۱۵	۴۴۰/۲	۱۱۶۱/۱	۴۸۹/۳	۷/۱۳	۱۱/۳۱	۱/۵۴

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش مستقل از توپ‌های پینگ‌پنگ با استفاده از یک تست فیلد فتوگرامتری برای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب ارائه شد و با دو روش متداول و جدید مقایسه شد. در روش پیشنهادی سیستم در ۱۲ ایستگاه مختلف قرار گرفت و در هر ایستگاه از تست فیلد یک ابرنقطه تهیه شد. همچنین در هر ایستگاه یک تصویر از تست فیلد گرفته شد و تمام عکس‌ها در فرآیند باندل‌اجسمنت مورد استفاده قرار گرفتند. در آخر از طریق بهینه‌سازی قیود ارائه شده در این تحقیق با استفاده از کمترین مربعات، پارامترهای کالیبراسیون محاسبه شد. در آزمایش دوم که مربوط به پیاده‌سازی یکی از روش‌های بسیار دقیق کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین است، سیستم در برابر تست فیلد در ایستگاه اصلی قرار گرفت و یک ابر نقطه سه‌بعدی از تست فیلد تهیه شد. مراکز توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب استخراج شد. سپس دوربین در موقعیت‌های مختلف قرار گرفت و از تست فیلد عکس‌های بیشتری گرفته شد و با استفاده از تصاویر گرفته شده، باندل‌اجسمنت انجام شد و مختصات تارگت‌ها استخراج شد. با داشتن مختصات تعدادی نقاط در دو سیستم مختصات مختلف ارتباط بین دو سیستم مختصات

که همان پارامترهای کالیبراسیون است از طریق معادلات کانفرمال سه‌بعدی محاسبه شد. در آزمایش سوم گوشه‌اتاق برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد و حل مسئله P3P به کار گرفته شد. سپس با استفاده از نقاط کنترل موجود در تست فیلد موقعیت دوربین نسبت به تست فیلد به دست آمد. در آخر پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین دوربین و فاصله‌یاب با استفاده از پارامترهای خارجی فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین نسبت به تست فیلد محاسبه شد. مزیت روش پیشنهادی نسبت به دو روش گفته شده عدم نیاز به توپ‌های پینگ‌پنگ در تست فیلد و عدم نیاز به انتخاب نقاط مربوط به توپ‌های پینگ‌پنگ به صورت دستی است که فرآیندی زمان‌بر است. همچنین، این روش از معادلات باندل‌اجسمنت برای تعیین مختصات تارگت‌ها استفاده می‌کند که نسبت به روش جیافن و همکاران که از DLT استفاده می‌کردند دقیق‌تر است. با این وجود دقت روش پیشنهادی تقریباً بادقت کالیبراسیون با ابر نقطه سه‌بعدی برابر است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که RMSE روش ارائه شده، روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی و روش جیافن و همکاران به ترتیب ۱۴/۲۴، ۱۲/۴۰ و ۱۵/۹۴ میلی‌متر بود.

سپاسگزاری

تأمین هزینه‌های این پژوهش از سوی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) با شماره ۹۷۰۱۳۸۴۱ صورت گرفت. مراحل طراحی، ساخت و ارزیابی سیستم در آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد.

مراجع

- [۱] P. Biber, H. Andreasson, T. Duckett, and A. Schilling, "3D modeling of indoor environments by a mobile robot with a laser scanner and panoramic camera," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No. 04CH37566), 2004, vol. 4, pp. 3430–3435.
- [۲] Y. Shi *et al.*, "Fusion of a panoramic camera and 2D laser scanner data for constrained bundle adjustment in GPS-denied environments," *Image Vis. Comput.*, vol. 40, pp. 28–37, 2015.
- [۳] A. Kanezaki, T. Suzuki, T. Harada, and Y. Kuniyoshi, "Fast object detection for robots in a cluttered indoor environment using integral 3D feature table," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 4026–4033.
- [۴] C. Wen, L. Qin, Q. Zhu, C. Wang, and J. Li, "Three-dimensional indoor mobile mapping with fusion of two-dimensional laser scanner and RGB-D camera data," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 843–847, 2013.
- [۵] G. Li, Y. Liu, L. Dong, X. Cai, and D. Zhou, "An algorithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 3854–3859.
- [۶] S. Wasielewski and O. Strauss, "Calibration of a multi-sensor system laser rangefinder/camera," in *Proceedings of the Intelligent Vehicles' 95. Symposium*, 1995, pp. 472–477.
- [۷] S. Sim, J. Sock, and K. Kwak, "Indirect correspondence-based robust extrinsic calibration of LiDAR and camera," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 6, 2016, doi: 10.3390/s16060933.
- [۸] Z. Chen, L. Zhuo, K. Sun, and C. Zhang, "Extrinsic calibration of a camera and a laser range finder using point to line constraint," *Procedia Eng.*, vol. 29, pp. 4348–4352, 2012.
- [۹] R. Gomez-Ojeda, J. Briales, E. Fernandez-Moral, and J. Gonzalez-Jimenez, "Extrinsic calibration of a 2d laser-rangefinder and a camera based on scene corners," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 3611–3616.
- [۱۰] Z. Hu, Y. Li, N. Li, and B. Zhao, "Extrinsic calibration of 2-D laser rangefinder and camera from single shot based on minimal solution," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 4, pp. 915–929, 2016.
- [۱۱] F. Shi, X. Zhang, and Y. Liu, "A new method of camera pose estimation using 2D–3D corner correspondence," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 25, no. 10, pp. 1155–1163, 2004.
- [۱۲] L. Zhang, C. Xu, K.-M. Lee, and R. Koch, "Robust and efficient pose estimation from line correspondences," in *Asian Conference on Computer Vision*, 2012, pp. 217–230.
- [۱۳] J. Fan, Y. Huang, J. Shan, S. Zhang, and F. Zhu, "Extrinsic calibration between a camera and a 2D laser rangefinder using a photogrammetric control field," *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2030, 2019.
- [۱۴] Q. Zhang and R. Pless, "Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration)," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*(IEEE Cat. No. 04CH37566), 2004, vol. 3, pp. 2301–2306.
- [۱۵] A. Kassir and T. Peynot, "Reliable automatic camera-laser calibration," in *Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics & Automation*, 2010, pp. 1–10.
- [۱۶] L. Zhou, "A new minimal solution for the extrinsic calibration of a 2D LIDAR and a camera using three plane-line correspondences," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 2, pp. 442–454, 2013.
- [۱۷] F. Vasconcelos, J. P. Barreto, and U. Nunes, "A minimal solution for the extrinsic calibration of a camera and a

- laser-rangefinder,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 34, no. 11, pp. 2097–2107, 2012.
- [۱۸] F. Itami and T. Yamazaki, “An improved method for the calibration of a 2-D LiDAR with respect to a camera by using a checkerboard target,” *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 14, pp. 7906–7917, 2020.
- [۱۹] A. H. A. Mohammadamin Manouchehri, “Extrinsic Calibration between a rotating Laser Rangefinder and a Camera using a Photogrammetric Control Field and Ping Pong balls,” *J. Geomatics Sci. Technol. persian*, 2022.
- [۲۰] M. A. Manouchehri and A. H. Ahmadabadian, “Extrinsic Calibration of Rotating 2D Laser Range Finder and Camera Using Photogrammetric Test Field and Ping Pong Balls,” *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 10, no. 4/W1-2022, pp. 475–481, 2023, doi: 10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-475-2023.
- [۲۱] 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*, p. 113011, 2023.
- [۲۲] A. H. A. Mohammadamin Manouchehri, “Extrinsic Calibration of a Camera and a 2D Laser Range Finder Using Ping Pong Balls and the Corner of a Room,” *Submitt. to “Measurement,”* 2023.
- [۲۳] M. A. Abbas, D. D. Lichti, A. K. Chong, H. Setan, and Z. Majid, “An on-site approach for the self-calibration of terrestrial laser scanner,” *Measurement*, vol. 52, pp. 111–123, 2014.
- [۲۴] C. S. Fraser, “Digital camera self-calibration,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 52, no. 4, pp. 149–159, 1997.
- [۲۵] S. Cronk, C. Fraser, and H. Hanley, “Automated metric calibration of colour digital cameras,” *Photogramm. Rec.*, vol. 21, no. 116, pp. 355–372, 2006, doi: 10.1111/j.1477-9730.2006.00380.x.
- [۲۶] F. Itami and T. Yamazaki, “A simple calibration procedure for a 2D LiDAR with respect to a camera,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 17, pp. 7553–7564, 2019.
- [۲۷] L. Zhou and Z. Deng, “Extrinsic calibration of a camera and a lidar based on decoupling the rotation from the translation,” in *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2012, pp. 642–648.
- [۲۸] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon, “Bundle adjustment—a modern synthesis,” in *International workshop on vision algorithms*, 1999, pp. 298–372.
- [۲۹] “ROS: Home.” <https://www.ros.org/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [۳۰] “GOM Inspect.” <https://www.gom-inspect.com/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [۳۱] “Australis - Photometrix Photogrammetry Software.” <https://www.photometrix.com.au/australis/> (accessed Mar. 24, 2022).