

کالیبراسیون خارجی فاصله یاب دوبعدی دوار و دوربین با استفاده از تست فیلد فتوگرامتری و توپ‌های پینگ‌پنگ

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 فروردین ۱۴۰۱، تاریخ تصویب خرداد ۱۴۰۱)

چکیده

ترکیب فاصله‌یاب و دوربین کاربرد زیادی در حوزهٔ رباتیک، نقشه‌برداری و خودروهای خودران جهت تهیه نقشه و برداشت اطلاعات رنگ و بافت اشیاء دارد. برای تلفیق داده‌های فاصله‌یاب و دوربین، باید این دو سنسور با دقت زیادی نسبت به هم کالیبره شوند، یعنی بردار انتقال و ماتریس دوران آن‌ها نسبت به هم مشخص باشد. در این تحقیق، سه روش مختلف برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین ارائه شده است. در فرآیند کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی و ابرنقطه دوبعدی، توپ‌های پینگ‌پنگ به‌عنوان تارگت‌های مشترک که در داده‌های دوربین و فاصله‌یاب قابل‌شناسایی هستند، استفاده می‌شود. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی، با استفاده از ابر نقطه تولیدشده از تست فیلد در ایستگاه اصلی و انجام باندل‌اجسمنت با استفاده از مجموعه تصاویر گرفته‌شده از تست فیلد، پارامترهای کالیبراسیون محاسبه می‌شود. در این روش، ابرنقطه سه‌بعدی از ترکیب داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی و سروموتور به دست می‌آید. از طرف دیگر، با استفاده از تصاویر گرفته‌شده از تست فیلد و تکنیک باندل‌اجسمنت، موقعیت توپ‌ها در مدل فتوگرامتری به دست می‌آید. روش دوم مشابه روش اول است با این تفاوت که به‌جای ابرنقطه سه‌بعدی از ابرنقطه دوبعدی استفاده شده‌است. در روش اول و دوم مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در دو سیستم مختصات مختلف در دسترس است؛ بنابراین، ارتباط بین دو سیستم مختصات با معادلات کانفرمال سه‌بعدی به دست می‌آید. در روش سوم با استفاده از هرم ایجادشده در گوشه اتاق و حل مسئله perspective-three-point، پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی در ایستگاه اصلی نسبت به تست فیلد فقط با یک اسکن محاسبه می‌شود. پارامترهای کالیبراسیون دوربین ایستگاه اصلی نسبت به تست فیلد از طریق باندل‌اجسمنت و معادلات کانفرمال سه‌بعدی محاسبه می‌شود. در آخر، پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب نسبت به دوربین به دست می‌آید. با توجه به RMSE محاسبه‌شده برای نقاط چک، به ترتیب کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی، کالیبراسیون با استفاده از گوشهٔ اتاق و کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی بیشترین دقت را داشتند.

واژگان کلیدی: فاصله‌یاب دوبعدی، کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین، دوربین، باندل‌اجسمنت، Perspective-Three-Point

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

دوربین‌ها و فاصله‌یاب‌های دوبعدی^۱ به دلیل اندازه کوچک و ارزان قیمت بودنشان در اکثر کارهای موبایل مپینگ^۲ [۱]، تشخیص‌اشیا^۳ [۲] و نقشه‌برداری از محیط و تعیین موقعیت هم‌زمان^۴ [۳، ۴] با هم ترکیب می‌شوند. دوربین می‌تواند اطلاعات مربوط به رنگ و بافت اشیاء را بادقت بالایی ثبت کند، درحالی‌که فاصله‌یاب می‌تواند فاصله را بادقت بسیار خوبی اندازه‌گیری کند. برای اینکه از مزیت هر دو سنسور استفاده شود و اطلاعات هندسی سه‌بعدی و اطلاعات مربوط به رنگ و بافت اشیاء برداشت شود، باید اطلاعات دو سنسور با هم تلفیق شوند. از طرف دیگر، نصب دقیق سنسورها نسبت به هم کار دشواری است. برای حل این مشکل، باید پارامترهای کالیبراسیون خارجی مربوط به توجیه این دو سنسور نسبت به هم محاسبه شوند. این پارامترها شامل دوران و انتقال دوربین و فاصله‌یاب هستند. معمولاً کالیبراسیون خارجی چند سنسور با استفاده از ویژگی‌های مشترکی که در داده‌های آن سنسورها وجود دارد، انجام می‌شود. باین‌وجود، پیداکردن نقاط یا ویژگی‌های مشترک در داده‌های فاصله‌یاب و دوربین به دو دلیل مشکل است. اولاً، فاصله‌یاب دوبعدی یک پروفیل به‌عنوان خروجی می‌دهد که حاصل تقاطع صفحه اسکن فاصله‌یاب و سطح اشیا است. برخلاف ابر نقاط سه‌بعدی و تصاویر که در آن‌ها ویژگی‌های زیادی همچون گوشه‌ها و لبه‌ها مشخص است، در داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی چنین ویژگی‌هایی ثبت نمی‌شود. ثانیاً، طول موج لیزری که در فاصله‌یاب استفاده می‌شود، خارج از محدوده بینایی است؛ بنابراین، داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی در تصاویر قابل‌مشاهده نیست. ازاین‌رو، یافتن روشی مناسب جهت انجام کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب امری ضروری و چالش‌برانگیز می‌باشد.

روش‌های کالیبراسیون مختلفی در سال‌های گذشته ارائه شده که اغلب آن‌ها از صفحات شطرنجی استفاده کرده‌اند. با استفاده از شبکه‌ای از نقاط موجود در یک صفحه شطرنجی، موقعیت نسبی دوربین نسبت به صفحه شطرنجی قابل محاسبه است. از طرفی، چون صفحه

شطرنجی یک سطح صاف است، پیداکردن نقاط فاصله‌یاب که بر روی صفحه شطرنجی قرار دارند، ساده است؛ بنابراین، ارتباط بین دوربین فاصله‌یاب از طریق صفحه شطرنجی به دست می‌آید. ژانگ و پلس [۵] برای انجام کالیبراسیون از یک صفحه شطرنجی با قید نقطه روی صفحه استفاده کردند، یعنی باید نقاط فاصله‌یاب بر روی صفحه شطرنجی باشد. این روش حداقل به ۵ شات^۵ در موقعیت‌های مختلف برای به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه پارامترهای کالیبراسیون نیاز دارد. اغلب بیش از ۲۰ شات برای به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه مناسب لازم است که بسیار زمان‌بر است. علاوه بر این، برای بهینه‌سازی مقادیر اولیه پارامترها، قیود نقطه روی صفحه، برای تمام نقاط فاصله‌یاب استفاده می‌شد. نتیجه بهینه‌سازی ممکن است به‌دلیل مقادیر اولیه نامناسب به مقدار کمینه محلی همگرا شود. بر اساس روش ژانگ، کسیر و پینوت [۶] یک جعبه‌ابزار خودکار برای کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب ارائه کردند. ژو و دنگ [۷] از قید خط‌روی صفحه استفاده کردند. این قید بادر نظرگرفتن اینکه همواره بردار جهت لیزر بر بردار نرمال صفحه شطرنجی عمود است، ماتریس دوران را از بردار انتقال جدا می‌کرد و به‌این‌ترتیب دوران و انتقال به‌صورت جداگانه به دست می‌آمد. بهینه‌سازی مقادیر اولیه نیز با همان قیود انجام می‌شد. این روش از نظر تئوری حداقل به سه شات برای تعیین مقادیر اولیه پارامترهای خارجی و به شات‌های بیشتری برای بهینه‌سازی غیرخطی نیاز دارد. واسکونسولوس و همکاران [۸] از یک صفحه شطرنجی به‌عنوان الگوی کالیبراسیون استفاده کرد تا قید نقطه-خط-صفحه در فضای سه‌بعدی را به مسئله perspective-three-point (P3P) تبدیل کند. پس از به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه پارامترهای خارجی، بهینه‌سازی را از طریق کمینه کردن خطای پروجکشن^۶ لیزر انجام می‌شد. باین‌وجود، این روش برای به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه، حداقل به سه شات نیاز داشت؛ همچنین، وجود چند جواب مختلف و مشکلات انحطاط در حل P3P کار را سخت می‌کرد [۹-۱۱].

علاوه بر این، چند روش دیگر معرفی شدند که از یک سری تخته با اشکال هندسی مختلفی مثل مثلث، ۷ شکل و مکعبی، به‌عنوان الگوی برای کالیبراسیون استفاده کردند.

^۱ Laser Range Finder^۲ Mobile Mapping^۳ Object Detection^۴ Simultaneous Localization and Mapping^۵ Shot^۶ Projection

لی و همکاران [۱۲] از یک تخته‌ی مثلثی شکل برای کالیبراسیون و برداشت داده‌ها با قید نقطه روی خط استفاده کردند. واسیلوسکی و اشتراوس [۱۳] از یک تخته ۷ شکل استفاده کردند و محل تقاطع تخته‌ها را در نقاط فاصله‌یاب استخراج کردند؛ همچنین، فصل مشترک دو صفحه را که یک خط بود در تصاویر به‌دست‌آوردند. با انجام بهینه‌سازی قید نقطه‌روی‌خط، پارامترهای کالیبراسیون خارجی به دست آمدند. سیم و همکاران [۱۴] از یک تخته ۷ شکل و قید سه نقطه روی خط استفاده کردند. گرچه این روش‌ها قیود بین دو سنسور را بهبود دادند، اما هنوز به تعداد شات‌های زیاد از تارگت‌ها در موقعیت‌های مختلف نیاز داشتند و دقت آن‌ها وابسته به مقادیر اولیه مناسب پارامترها بودند. در سالهای اخیر، شماری از محققین روش‌های بهتری را بر اساس یک ساختار هرمی ارائه کرده‌اند. چن و همکاران [۱۵] از یک ساختار مکعبی و قید نقطه روی خط برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین استفاده کرد که حداقل به سه شات از تارگت نیاز داشت. گومز اوجدا و همکاران [۱۶] روشی را برای کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین با برداشت گوشه‌ها در اشیاء تصنعی معرفی کردند. این روش از قیدهای خط روی صفحه و نقطه روی صفحه برای ایجاد ارتباط بین دو سنسور برای حل مقادیر اولیه و بهینه‌سازی استفاده می‌کرد. با این حال، این روش به سه شات برای به‌دست‌آوردن مقادیر اولیه پارامترهای خارجی و شات‌های بیشتری برای اطمینان از نتیجه‌ی دقیق نیاز داشت.

روش‌های گفته‌شده دو مشکل بزرگ دارند: اگرچه آن‌ها از چند شات استفاده می‌کنند، ولی برخی از شات‌های نامناسب ممکن است باعث شوند که جواب‌ها دقت مناسبی نداشته باشند. دوم اینکه روش‌های ذکر شده غالباً جواب منحصر به فرد ندارند و یا اینکه به کمینه محلی همگرا می‌شوند که ممکن است نتایج کالیبراسیون با خطا همراه شود.

هو و همکاران [۱۷] یک روش کالیبراسیون ارائه کردند که فقط به یک شات از تارگت‌ها نیاز داشت و جواب منحصر به فردی به دست آوردند. آن‌ها از یک هرم سه ضلعی به‌عنوان الگویی برای کالیبراسیون استفاده کردند و موقعیت دوربین و فاصله‌یاب را به ترتیب با استفاده از perspective-three-line [۱۸، ۱۹] و P3P به‌دست‌آوردند. آن‌ها برای کالیبراسیون دوربین از طول دو لبه برای رسیدن به جواب‌های درست استفاده کردند. با

این حال، اندازه‌گیری دقیق طول لبه‌ها می‌تواند دشوار باشد. علاوه بر این، طول لبه‌ها بر اساس دو نقطه پایانی تعیین می‌شد. زمانی که نقاط انتهایی نویز دارند، طول لبه‌ها دقیق نیست، بنابراین آن‌ها به نویز حساس هستند. جیافن و همکاران [۲۰] با استفاده از هرم شکل گرفته در گوشه یک اتاق، کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین را انجام دادند. آن‌ها عملیات کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین را به دو قسمت مستقل از هم تقسیم کردند. در بخش اول، پارامترهای توجیه خارجی فاصله‌یاب نسبت به تست‌فیلد^۱ را با استفاده از P3P محاسبه کردند. در بخش دوم، پارامترهای توجیه خارجی دوربین را نسبت به تست‌فیلد با استفاده از DLT به‌دست‌آوردند. آن‌ها با داشتن پارامترهای توجیه خارجی دوربین و فاصله‌یاب نسبت به تست‌فیلد، کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین را انجام دادند. مشکل این روش این است که دیوارها و کف اتاق باید کاملاً صاف و مسطح باشند و هیچ انحنایی نداشته باشند و به‌صورت دوبعدی بر هم عمود باشند، در صورتی که در واقعیت ممکن است چنین نباشد. این مشکل باعث می‌شود هرمی که برای کالیبراسیون در نظر گرفته می‌شود مناسب نباشد. مشکل دوم این روش این است که به یک تست‌فیلد نیاز دارد که مختصات نقاط کنترل آن باید از قبل محاسبه شده باشد.

این مقاله سه روش برای کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی و دوربین با استفاده از تست‌فیلد فتوگرامتری باهدف پوشش مشکلات و محدودیت‌های روش‌های قبل ارائه می‌دهد. کالیبراسیون با روش‌های معرفی‌شده در این مقاله، نتایج دقیق و قابل‌اطمینانی را ارائه می‌کند. تست‌فیلدهای فتوگرامتری غالباً در فرآیند کالیبراسیون دوربین [۲۱، ۲۲] و فاصله‌یاب‌های سه‌بعدی [۲۳] به کار برده می‌شوند. علاوه بر این، استفاده از تست‌فیلد برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین در دسر زیادی ندارد. شکل ۱ تست‌فیلدی را نشان می‌دهد که از تعدادی تارگت سیاه و سفید و توپ پینگ‌پنگ تشکیل شده‌است. تارگت‌ها با توزیع یکنواخت بر روی دیوارها و کف اتاق نصب شده‌اند. در این تحقیق نیازی نیست که مختصات نقاط کنترل از قبل مشخص باشد. نقاط کنترل در تصاویر به خاطر کنتراست بین رنگ سیاه و سفید به‌راحتی

^۱ Control field

قابل‌شناسایی هستند. از طرف دیگر، توپ‌های پینگ‌پنگ علاوه بر اینکه در تصاویر به راحتی قابل‌شناسایی هستند، به خاطر ساختار کرومی‌شان در ابرنقاط قابل تشخیص اند. می‌توان به سادگی در هر گوشه‌ای از اتاق تارگت‌ها را نصب کرد و عملیات کالیبراسیون را انجام داد. در این تحقیق تست‌فیلد به عنوان یک مرجع مشترک برای کالیبراسیون فاصله‌یاب و دوربین استفاده می‌شود.

در بخش دوم این مقاله به روش‌های پیشنهادی برای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبرین و دوربین پرداخته می‌شود. بخش سوم پیاده‌سازی روش‌ها با یک سیستم طراحی شده را به تفصیل بیان می‌کند. در بخش چهارم دقت و نتایج کالیبراسیون هر سه روش آورده می‌شود. بخش پنجم این مقاله مربوط به نتیجه‌گیری می‌باشد.

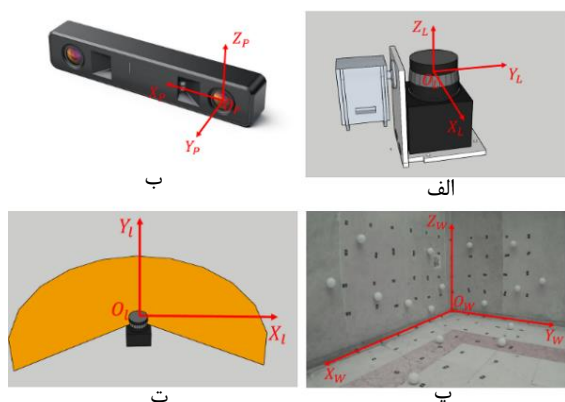


شکل ۱- تست‌فیلد فتوگرامتری

۲- روش‌های پیشنهادی

قبل از پرداختن به روش‌های ارائه‌شده در این مقاله، تعاریفی از سیستم مختصات‌های استفاده‌شده در این تحقیق ارائه می‌شود. در شکل ۲ چهار سیستم مختصات مربوط به فاصله‌یاب دوبرین، فاصله‌یاب سه‌بعدی (از ترکیب فاصله‌یاب دوبرین و سروموتور ساخته می‌شود)، تست‌فیلد و مدل فتوگرامتری نشان داده شده‌است. سیستم مختصات تست‌فیلد با $(O_W - X_W Y_W Z_W)$ نشان داده شده‌است. مبدأ این سیستم مختصات، گوشه اتاق است و فصل مشترک دیوارها و کف اتاق محورهای X_W ، Y_W و Z_W در نظر گرفته می‌شود. سیستم مختصات مدل فتوگرامتری با $(O_P - X_P Y_P Z_P)$ نشان داده شده‌است. مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری است و صفحه $X_P O_P Z_P$ با صفحه تصویر در آن ایستگاه موازی است. ایستگاه اصلی، ایستگاهی است که در آن سیستم مورد

نظر که شامل دوربین و فاصله‌یاب است، داده جمع‌آوری می‌کند. سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبرین نیز با $(O_I - X_I Y_I Z_I)$ نشان داده شده‌است. محور Y_I به سمت جلوی فاصله‌یاب و محور X_I در سمت چپ محور Y_I با ۹۰ درجه انحراف قرار دارد. سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی نیز با $(O_L - X_L Y_L Z_L)$ نشان داده شده‌است. در بخش ۱-۲ توجه محورهای این سیستم به تفصیل بیان می‌شود.



شکل ۲- الف: سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی، ب: سیستم مختصات مدل فتوگرامتری که مبدأ آن مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی است، در این شکل دوربین سمت چپ از یک دوربین استریو مبدأ قرار داده شده است، پ: سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبرین، ت: سیستم مختصات تست‌فیلد

با انجام کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین، ارتباط بین فاصله‌یاب و دوربین به دست می‌آید و پس از آن می‌توان هر نقطه که توسط فاصله‌یاب دوبرین یا سه‌بعدی اندازه‌گیری شده را به سیستم مختصات مدل فتوگرامتری منتقل کرد. پارامترهای کالیبراسیون شامل ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات فاصله‌یاب (دوبرین و سه‌بعدی) و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری است. برای هر نقطه دلخواه P ، مختصات این نقطه در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی به صورت $P_L = (x_L, y_L, z_L)$ در سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبرین به صورت $P_I = (x_I, y_I)$ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به صورت $P_P = (x_P, y_P, z_P)$ و در سیستم مختصات تست‌فیلد به صورت $P_W = (x_W, y_W, z_W)$ می‌باشد. پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین سیستم مختصات‌های فاصله‌یاب سه‌بعدی و مدل فتوگرامتری با R_{PL} و T_{PL} بیان می‌شود که به ترتیب ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات است. برای هر نقطه دلخواه P رابطه (۱) برقرار است:



شکل ۳- فلوجارت کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه بعدی

۲-۱-۱- تهیه ابر نقطه سه بعدی

فاصله یاب های دوبعدی با سرعت بسیار زیادی اشعه لیزر را با فاصله زاویه ای یکسان در یک صفحه دوران می دهند و هم زمان فاصله تک تک نقاط تا مرکز فاصله یاب را اندازه می گیرند. با دوران فاصله یاب دوبعدی حول محور Y_L می توان یک ابر نقطه سه بعدی از محیط تولید کرد. برای دوران فاصله یاب می توان از سروموتورهایی استفاده کرد که زاویه چرخش شفت را با دقت بسیار زیاد اندازه گیری می کنند. برای ساخت فاصله یاب سه بعدی، می توان فاصله یاب دوبعدی را به گونه ای به سروموتور متصل کرد که امتداد شفت سروموتور از مرکز فاصله یاب (محل ارسال اشعه ی لیزر) عبور کند و در امتداد محور Y_L باشد. در این حالت، محور Y_L منطبق بر محور Y_I خواهد بود. به این ترتیب، همیشه امتداد شفت سروموتور و محورهای Y_L و Y_I بر هم منطبق خواهند بود. محور Z_L قائم بر محور Y_L و در امتداد شاقولی به سمت بالا تعریف می شود. محور X_L نیز طوری تعریف می شود که سیستم دست راستی باشد.

برای تهیه ابر نقطه سه بعدی، باید داده های فاصله یاب دوبعدی و سروموتور با هم ترکیب شوند. با توجه به شکل ۴ برای هر نقطه دلخواه P که توسط سیستم فاصله یاب سه بعدی برداشت می شود، سه مشاهده انجام می شود که شامل فاصله نقطه P تا مرکز فاصله یاب (r) ، زاویه بردار r با محور X_I (γ) ، زاویه بین محور X_L و محور X_I (β) ، همان زاویه بین صفحه $X_I O_L Y_I$ و صفحه $X_L O_L Y_L$ (صفحه $X_I O_L Y_I$) که توسط انکودر سروموتور اندازه گیری می شود. چنانچه زاویه β برابر صفر باشد، محورهای X_L و X_I بر هم منطبق خواهند بود. مختصات هر نقطه ی برداشت شده

$$P_p = R_{PL} P_L + T_{PL} \quad (1)$$

رابطه (۱) ارتباط بین سیستم مختصات های فاصله یاب سه بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری را نشان می دهد. به طریق مشابه رابطه (۲) ارتباط بین سیستم مختصات فاصله یاب دوبعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری را بیان می کند (در این حالت مولفه z نقطه P_L صفر در نظر گرفته می شود):

$$P_p = R_{Pl} P_l + T_{Pl} \quad (2)$$

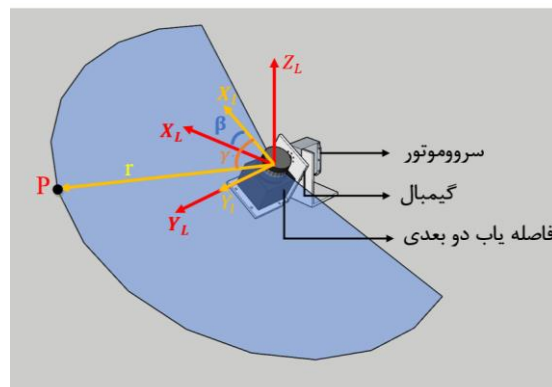
R_{Pl} و T_{Pl} پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب دوبعدی و دوربین هستند. در ادامه سه روش مختلف برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب و دوربین ارائه می شود. در روش های ارائه شده فاصله یاب فقط در ایستگاه اصلی ابر نقطه برداشت می کند ولی دوربین در چند ایستگاه مختلف تصویربرداری می کند.

۲-۱-۲ کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه بعدی

شکل ۳ مراحل کالیبراسیون با استفاده از ابر نقطه سه بعدی را نشان می دهد. در ابتدا با دوران فاصله یاب توسط یک سروموتور و تلفیق داده های فاصله یاب دوبعدی و انکودر سروموتور، یک ابر نقطه سه بعدی تولید می شود. نقاط مربوط به هر توپ در ابر نقطه انتخاب می شود و یک کره به هریک از آن ها برازش داده می شود. مختصات مراکز کره ها، مختصات مراکز توپ های پینگ پنگ هستند. در ایستگاه اصلی و چند ایستگاه مختلف دیگر از تست فیلد عکسبرداری می شود. از طریق باندل اجسمنت مختصات توپ ها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به دست می آید. با استفاده از مختصات توپ ها در دو سیستم مختصات مختلف، پارامترهای کالیبراسیون را می توان محاسبه کرد.

مثل نقطه P در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی با استفاده از روابط (۳) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} x_L = r \cos(\gamma) \cos(\beta) \\ y_L = r \sin(\gamma) \\ z_L = r \cos(\gamma) \sin(\beta) \end{cases} \quad (3)$$



شکل ۴- ساختار سیستم فاصله‌یاب سه‌بعدی که شامل فاصله‌یاب دوبعدی و سروموتور است و توسط یک گیمبال به هم متصل شده‌اند

با استفاده از داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی و سروموتور و رابطه (۳) می‌توان از تست فیلد یک ابرنقطه‌ی سه‌بعدی تهیه کرد. چون توپ‌های پینگ‌پنگ ساختار کروی مشخصی دارند، پیدا کردن نقاط مربوط به آن‌ها در ابرنقطه ساده است. نقاط مربوط به هر توپ را جدا کرده و به هر یک از آن‌ها یک کره برازش داده می‌شود. مراکز این کره‌ها مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ هستند. به‌این‌ترتیب مختصات سه‌بعدی مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی $(P_L^1, P_L^2, \dots, P_L^n)$ به دست می‌آید.

۲-۱-۲- تهیه مدل فتوگرامتری از تست فیلد

در همان ایستگاه اصلی که در مرحله قبل ابرنقطه سه‌بعدی تهیه شد، با دوربین از تست فیلد عکس گرفته می‌شود. چنانچه دوربین در موقعیت‌های مختلف دیگری قرار داده شود و از تست فیلد تصاویر بیشتری گرفته شود، می‌توان با استفاده از تصاویر گرفته‌شده، باندل‌اجسمنت^۱ [۲۴] انجام داد. در فرآیند باندل‌اجسمنت، مراکز تارگت‌های فتوگرامتری و مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ به‌عنوان نقاط مشترک در تصاویر در نظر گرفته می‌شوند. برای حل مسأله مقیاس، می‌توان فاصله بین چند تارگت را اندازه‌گیری کرد

و به‌عنوان قید ثابت در فرآیند باندل‌اجسمنت وارد کرد. مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی، مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری در نظر گرفته می‌شود. توجیه محورهای سیستم مختصات مدل فتوگرامتری در بخش ۲ توضیح داده شد. به‌این‌ترتیب، با انجام فرآیند باندل‌اجسمنت، علاوه بر پارامترهای توجیه‌داخلی و توجیه‌خارجی دوربین، مختصات سه‌بعدی مراکز تارگت‌های سیاه و سفید و مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری $(P_P^1, P_P^2, \dots, P_P^n)$ به دست می‌آید.

۲-۱-۳- محاسبه پارامترهای کالیبراسیون

همان‌طور که گفته شد، مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی، مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و مرکز فاصله‌یاب دوبعدی در ایستگاه اصلی به‌عنوان مبدأ سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، ماتریس دوران و بردار انتقال بین سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی، همان پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب و دوربین خواهند بود. در این قسمت هدف یافتن بردار انتقال T_{CL} و ماتریس دوران R_{CL} بین سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری است، طوری که بتوان هر نقطه‌ای که با فاصله‌یاب سه‌بعدی برداشت می‌شود را به سیستم مختصات مدل فتوگرامتری منتقل کرد. رابطه (۱) ارتباط بین سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری را بیان می‌کند که می‌توان آن را به شکل رابطه (۴) نوشت:

$$P_P = \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}}_{R_{PL}} \underbrace{P_L}_{T_{PL}} + \underbrace{\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}}_{T_{PL}} \quad (4)$$

^۱ Bundel adjustment

یاب سه بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری مشخص باشد، نیاز است. این توپها نباید بر روی یک خط باشند. چنانچه ماتریس A کمبود مرتبه نداشته باشد، با استفاده از کمترین مربعات، [۲۵] می توان برآوردی از تصحیحات پارامترها را با رابطه (۸) محاسبه نمود.

$$\hat{\delta}_X = (A^T A)^{-1} A^T \delta_L \quad (۸)$$

و در هر تکرار مجهولات را با رابطه زیر به روزرسانی کرد:

$$\hat{X} = X_{(0)} + \hat{\delta}_X \quad (۹)$$

از آنجاکه این برآورد برای دستگاه معادلات خطی شده است، جواب کمترین مربعات دستگاه معادلات غیرخطی (۷) از طریق تکرار به دست می آید. برای این کار با استفاده از برآورد $\hat{X}$ در اولین تکرار، مجدداً دستگاه معادلات غیرخطی (۷) حول این برآورد خطی ایجاد می شود و جواب کمترین مربعات دستگاه معادلات خطی شده جدید محاسبه می گردد. این کار تا آنجا تکرار می شود که $\hat{\delta}_X$ در حد خطای قابل قبول در سرشکنی (از نظر تئوری برابر صفر شود) گردد.

چون رابطه (۱) غیرخطی است و با سری تیلور خطی می شود، برای تعیین مجهولات آن، باید مقادیر اولیه مجهولات در اختیار باشد. چنانچه صفحات XOY در سیستم مختصات فاصله یاب سه بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری تقریباً موازی باشند، می توان مقادیر اولیه ω و ϕ را صفر در نظر گرفت. مقدار اولیه T_z را هم می توان میانگین مولفه ی Z مراکز توپها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری در نظر گرفت. برای محاسبه مقادیر اولیه T_x ، T_y و κ می توان از معادلات کانفرمال دوبعدی استفاده کرد. معادلات کانفرمال دوبعدی به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa \\ -\sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

با در نظر گرفتن تغییر متغیرهای زیر:

$$R_{PL} = R_\omega R_\phi R_\kappa$$

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_{PL} یک ماتریس 3×3 است که با زوایای بین محورهای سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و محورهای سیستم مختصات فاصله یاب سه بعدی (ω ، ϕ ، κ) ساخته می شود و T_{PL} یک بردار 3×1 است که مختصات مبدأ سیستم مختصات فاصله یاب سه بعدی نسبت به سیستم مختصات مدل فتوگرامتری است. رابطه (۴) بر حسب پارامترهای ω ، κ ، ϕ ، T_x ، T_y و T_z غیرخطی است، ابتدا باید آن را به دستگاه معادلات خطی تبدیل کرده و جواب دستگاه را از طریق تکرار محاسبه کرد. برای این کار با استفاده از سری تیلور می توان نوشت:

$$L + v = \underbrace{F(X_{(0)})}_{L_{(0)}} + \underbrace{\frac{dF(X)}{dX}}_A \bigg|_{X=X_{(0)}} (X - X_{(0)}) + \dots \quad (۶)$$

بردار $F(X_{(0)})$ ، برداری از مقادیر ثابت است و $L_{(0)}$ در نظر گرفته می شود، ماتریس $\frac{dF(X)}{dX} \big|_{X=X_0}$ را A و بردار خطاها v نامیده می شود. به این ترتیب، معادله غیرخطی (۴) به معادله خطی زیر تبدیل می شود:

$$\begin{cases} \delta_L + v = A \delta_X \\ \delta_L = L - L_{(0)} \\ \delta_X = X - X_{(0)} \end{cases} \quad (۷)$$

برای تعیین مجهولات حداقل به سه توپ پینگ پنگ که مختصات مراکز آنها در سیستم مختصات های فاصله

$$\begin{cases} a = \lambda \cos \kappa \\ b = \lambda \sin \kappa \\ c = T_x \\ y = T_y \end{cases} \quad (11)$$

رابطه (10) را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_L & y_L & 1 & 0 \\ -y_L & x_L & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (12)$$

دستگاه معادلات (12) خطی است و می‌توان مستقیماً مجهولات پارامترهای تبدیل آن را که a, b, c و d هستند را با استفاده از حداقل مراکز دو توپ پینگ‌پنگ که مختصات آن‌ها در هر دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و فاصله‌یاب سه‌بعدی مشخص است محاسبه کرد، چنانچه مختصات n توپ در دو سیستم مختصات گفته‌شده در اختیار باشد، دستگاه معادلات به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} x_P^1 \\ y_P^1 \\ \vdots \\ x_P^n \\ y_P^n \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_L^1 & y_L^1 & 1 & 0 \\ -y_L^1 & x_L^1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_L^n & y_L^n & 1 & 0 \\ -y_L^n & x_L^n & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{a_{(2n) \times 4}} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}_{s_{4 \times 1}} \quad (13)$$

$l_{(2n) \times 1}$ $a_{(2n) \times 4}$ $s_{4 \times 1}$

با استفاده از کمترین مربعات می‌توان نوشت:

$$\hat{s} = (a^t a)^{-1} a^t l \quad (14)$$

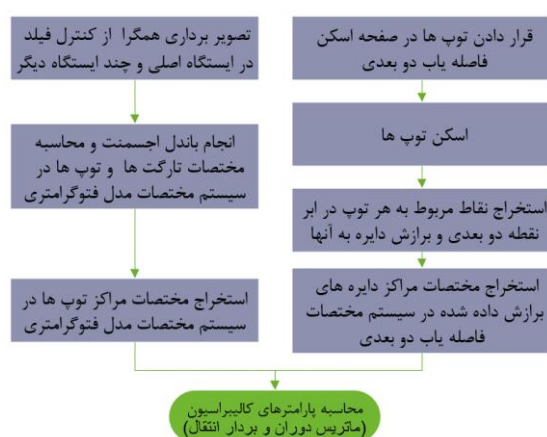
پس از محاسبه a, b, c و d می‌توان مقادیر اولیه پارامترهای κ و T_x, T_y را به‌دست آورد:

$$\begin{cases} \kappa = \tan^{-1} b/a \\ T_x = C \\ T_y = d \end{cases} \quad (15)$$

با استفاده از مقادیر اولیه به‌دست‌آمده برای مجهولات، درون یک حلقه در هر تکرار ماتریس A و بردار δ_L محاسبه می‌شوند و مقدار تصحیحات مربوط به مجهولات با رابطه (8) به دست می‌آید، سپس همه‌ی مجهولات را با رابطه (9) به روز رسانی می‌شوند. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار تصحیلات به‌دست‌آمده برای مجهولات از یک حد آستانه با مقدار بسیار کوچک، کمتر شود.

۲-۲- کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی

شکل 5 فلوچارت کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی را نشان می‌دهد. در این روش باید توپ‌های پینگ‌پنگ در صفحه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی قرار داده‌شوند. پس از اسکن توپ‌ها توسط فاصله‌یاب دوبعدی، نقاط مربوط به هر توپ پینگ‌پنگ را جدا کرده و به هر کدام یک دایره برازش داده می‌شود. مختصات مراکز دایره‌ها، مختصات مراکز توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی هستند. سپس، در ایستگاه اصلی و چند ایستگاه دیگر از تست‌فیلد عکس گرفته می‌شود. با انجام باندل‌اجسمنت مختصات توپ‌ها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به دست می‌آید. با استفاده از مختصات مراکز توپ‌ها در دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و فاصله‌یاب دوبعدی، ارتباط این دو سیستم مختصات که همان پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین است به دست می‌آید.



شکل 5- فلوچارت کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی

این روش کاملاً مشابه روش قبلی است، با این تفاوت که از طریق یک ابرنقطه دوبعدی که در ایستگاه اصلی برداشت می‌شود، کالیبراسیون انجام می‌شود. در این روش

۲-۳- کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق

ایده این روش از تحقیق جیافن و همکاران [۲۰] گرفته شده است. تفاوت این روش با روش آن‌ها این است که آن‌ها از تست‌فیلدی استفاده می‌کردند که مختصات تارگت‌های تست‌فیلد از قبل در اختیار بود، ولی در این روش نیازی نیست که مختصات تارگت‌ها از قبل مشخص باشد. همچنین آن‌ها فقط از یک تصویر و معادلات DLT برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون دوربین نسبت به تست‌فیلد استفاده می‌کردند، در حالی که این روش از تصاویر بیشتری و تکنیک باندل‌اجسمنت استفاده می‌کند.

شکل 6 فلوچارت کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق را نشان می‌دهد. در این روش ابتدا تست‌فیلد توسط فاصله‌یاب در ایستگاه اصلی برداشت می‌شود و به نقاط روی دیوارها و کف اتاق خطوطی برازش داده می‌شود. با استفاده از نقاط تقاطع خطوط برازش داده شده، کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب نسبت به تست‌فیلد انجام می‌شود. با استفاده از تصاویر گرفته شده در ایستگاه اصلی و چند ایستگاه دیگر، باندل‌اجسمنت انجام می‌شود و مختصات تارگت‌ها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به دست می‌آید. ماتریس دوران و بردار انتقال سیستم مختصات مدل فتوگرامتری نسبت به تست‌فیلد محاسبه می‌شود. چون مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی است، بنابراین ماتریس دوران و بردار انتقال به دست آمده همان ماتریس دوران و بردار انتقال دوربین ایستگاه اصلی نسبت به تست‌فیلد هستند. با داشتن پارامترهای کالیبراسیون فاصله‌یاب و دوربین نسبت به تست‌فیلد، پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین را می‌توان محاسبه کرد.

اگر $(R_{PW}|T_{PW})$ و $(R_{IW}|T_{IW})$ به ترتیب بردار انتقال و ماتریس دوران سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری نسبت به سیستم مختصات تست‌فیلد باشند، آنگاه برای هر نقطه‌ی دلخواه P می‌توان نوشت:

$$P_P = R_{PW} P_W + T_{PW} \quad (16)$$

$$P_I = R_{IW} P_W + T_{IW} \quad (17)$$

در داخل تست‌فیلد و در مقابل صفحه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی، چندین توپ پینگ‌پنگ قرار داده می‌شود، طوری که فاصله‌یاب وسط توپ‌های پینگ‌پنگ را که دارای بیشترین شعاع است را برداشت کند. به این ترتیب، نیمه هر توپ پینگ‌پنگ در بالای صفحه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی و نیمه دیگر آن در پایین صفحه فاصله‌یاب دوبعدی قرار می‌گیرد. هر توپ توسط چندین نقطه برداشت می‌شود و می‌توان نقاط مربوط به هر توپ را جدا کرده و به آن نقاط یک دایره برازش داد. مراکز آن دایره‌ها مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ خواهند بود. بر اساس آنچه گفته شد، مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی $(P_I^1, P_I^2, \dots, P_I^n)$ به دست می‌آیند.

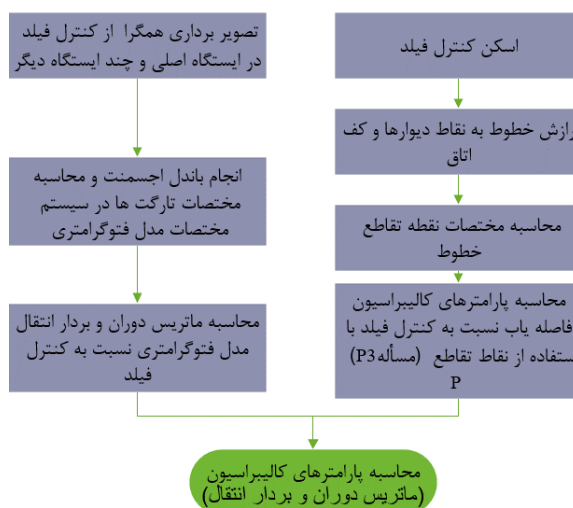
چنانچه در همان ایستگاه اصلی و در چند موقعیت دیگر از تست‌فیلد عکس گرفته شود، می‌توان با استفاده از مجموعه تصاویر گرفته شده و تکنیک باندل‌اجسمنت مختصات سه‌بعدی توپ‌های پینگ‌پنگ را در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری محاسبه کرد. در فرآیند باندل‌اجسمنت مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی به عنوان مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری در نظر گرفته می‌شود. برای حل مسئله مقیاس نیز می‌توان فاصله بین چند تارگت را اندازه گرفت و به عنوان قید در باندل‌اجسمنت وارد کرد. به این صورت مختصات مراکز تارگت‌های فتوگرامتری و مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری $(P_P^1, P_P^2, \dots, P_P^n)$ به دست می‌آید.

باتوجه به اینکه مختصات توپ‌های پینگ‌پنگ در دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی در اختیار است، می‌توان مشابه آنچه که در قسمت ۳-۱-۲ گفته شد، پارامترهای کالیبراسیون را که شامل بردار انتقال T_{PI} و ماتریس دوران R_{PI} است را محاسبه کرد. نکته قابل ذکر این است که در بخش ۳-۱-۲ ارتباط بین دو سیستم مختصات سه‌بعدی محاسبه می‌شد در حالی که در این روش سیستم مختصات مدل فتوگرامتری سه‌بعدی است، اما سیستم مختصات فاصله‌یاب دو بعدی، دوبعدی است. بنابراین، برای محاسبه پارامترهای کالیبراسیون، مؤلفه Z مختصات مراکز توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی، صفر در نظر گرفته می‌شود و پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین محاسبه می‌شوند.

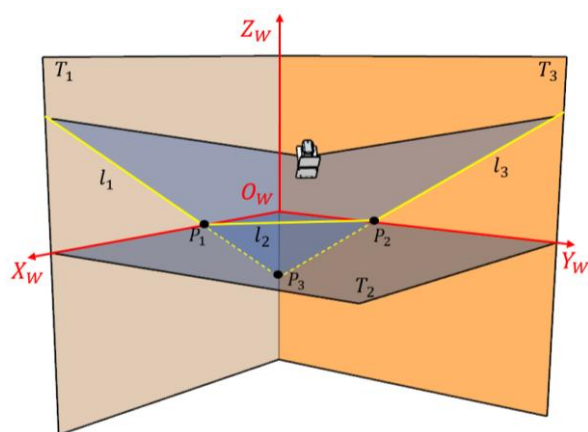
رابطه (۲) ارتباط بین سیستم مختصات فاصله یاب دوبعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری را نشان می دهد. باتوجه به روابط (۲)، (۱۶) و (۱۷) می توان نوشت:

$$\begin{cases} T_{Pl} = T_{PW} - R_{Pl} T_{IW} \\ R_{Pl} = R_{PW} R_{IW}^{-1} \end{cases} \quad (18)$$

فرآیند کالبراسیون در این روش به دو بخش مستقل از هم تقسیم می شود که شامل: کالبراسیون فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد (تعیین T_{IW} و R_{IW}) و کالبراسیون دوربین ایستگاه اصلی نسبت به تست فیلد (تعیین T_{IW} و R_{IW}).



شکل ۶- فلوچارت کالبراسیون با استفاده از گوشه اتاق



شکل ۷- کالبراسیون فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد

۲-۳-۱- کالبراسیون فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد

برای به دست آوردن موقعیت و وضعیت فاصله یاب دوبعدی نسبت به سیستم مختصات تست فیلد، باید فاصله یاب به نحوی در مقابل تست فیلد قرار گیرد که صفحه اسکن فاصله یاب بتواند دیوارها و کف گوشه اتاق را برداشت کند. با استفاده از خطوط حاصل از تقاطع صفحه اسکن فاصله یاب دوبعدی و صفحات T1، T2 و T3، می توان مسئله P3P را حل کرد و موقعیت و وضعیت فاصله یاب را نسبت به سیستم مختصات تست فیلد به دست آورد. با استفاده از هرم مثلثی قائم الزاویه $O_W P_1 P_2 P_3$ ساخته شده در گوشه اتاق، جواب P3P به دست می آید. برای خطوط L_1 ، L_2 و L_3 داریم:

$$\begin{cases} y = m_{L_1} x + b_{L_1} \\ y = m_{L_2} x + b_{L_2} \\ y = m_{L_3} x + b_{L_3} \end{cases} \quad (19)$$

خطوط L_1 ، L_2 و L_3 را می توان با برازش خط به نقاط برداشت شده در صفحات T1، T2 و T3 به دست آورد. با استفاده از کمترین مربعات می توان شیب (m) و عرض از مبدأ (b) هر خط را به دست آورد. از تقاطع خطوط نقاط P_1 ، P_2 و P_3 حاصل می شود:

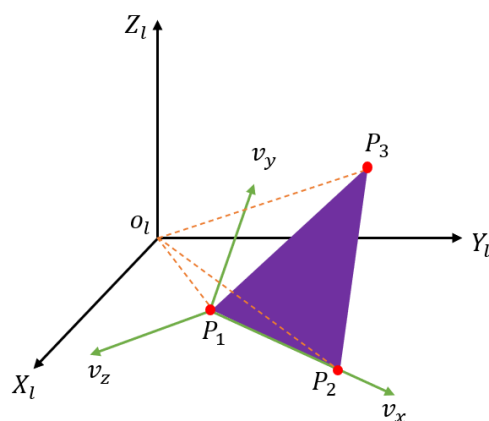
$$\begin{cases} x_{P_1} = \frac{b_{L_2} - b_{L_1}}{m_{L_1} - m_{L_2}} \\ x_{P_2} = \frac{b_{L_3} - b_{L_2}}{m_{L_2} - m_{L_3}} \\ x_{P_3} = \frac{b_{L_3} - b_{L_1}}{m_{L_1} - m_{L_3}} \end{cases} \quad (20)$$

با داشتن مؤلفه x نقاط تقاطع، از طریق رابطه (19) مؤلفه y آن ها به دست می آید. سه نقطه P_1 ، P_2 و P_3 مبدأ سیستم مختصات تست فیلد، یک هرم مثلثی قائم الزاویه را تشکیل می دهند. چنانچه d_1 ، d_2 و d_3 اضلاع هرم باشند، طول آن ها از طریق رابطه زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} d_1 = \|P_1 - P_2\| \\ d_2 = \|P_1 - P_3\| \\ d_3 = \|P_2 - P_3\| \end{cases} \quad (21)$$

نقطه P_1, P_2 و P_3 در صفحه $v_x P_1 v_y$ قرار می‌گیرند. ماتریس دوران این سیستم مختصات نسبت به سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی R_1 در نظر گرفته می‌شود. به طریق مشابه، می‌توان همین کار را برای سیستم مختصات $v_x v_y v_z$ با نقاط Q_1, Q_2 و Q_3 انجام داد. ماتریس دوران این سیستم مختصات را می‌توان نسبت به سیستم مختصات تست‌فیلد به‌دست‌آورد. سیستم مختصات $v_x v_y v_z$ را می‌توان به‌عنوان یک سیستم مختصات واسط برای محاسبه ماتریس دوران فاصله‌یاب نسبت به سیستم مختصات تست‌فیلد استفاده کرد.

$$R_{IW} = R_1 R_2^{-1} \quad (25)$$



شکل ۸- هم‌مرجع‌سازی سه نقطه‌ای

سپس بردار انتقال را می‌توان با استفاده از تناظری که بین مجموعه نقاط (P_1, P_2, P_3) و (Q_1, Q_2, Q_3) وجود دارد، محاسبه کرد.

$$T_{LW} = \sum_{i=1}^3 (P_i - R_{LW} Q_i) / 3 \quad (26)$$

هرم قائم‌الزاویه‌ای که توسط گوشه‌های اتاق ساخته می‌شود در کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به تست‌فیلد استفاده می‌شود. ممکن است صفحات اتاق دقیقاً بر هم عمود نباشند و به‌اندازه α از ۹۰ درجه انحراف داشته باشند. مطابق شکل ۹، در شرایط ایده‌آل یک هرم با قائم‌الزاویه با سه صفحه T_1, T_2 و T_3 ایجاد می‌شود. صفحه اسکن فاصله‌یاب دوبعدی، سه صفحه فوق را به‌ترتیب در سه خط l_1, l_2 و l_3 قطع می‌کند. اگر

عملگر $\| \cdot \|$ نمایانگر فاصله 2-norm بین دو نقطه است. طول‌های $O_W P_1, O_W P_2$ و $O_W P_3$ به ترتیب λ_1, λ_2 و λ_3 در نظر گرفته می‌شوند. با فرض اینکه هر سه صفحات تشکیل دهنده گوشه اتاق دو به دو بر هم عمود هستند می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \lambda_1^2 + \lambda_2^2 = d_1^2 \\ \lambda_1^2 + \lambda_3^2 = d_2^2 \\ \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (27)$$

در حالت کلی ۸ جواب برای مسئله P3P وجود دارد [۹]. با توجه به اینکه در رابطه (۲۲) زاویه‌ای وجود ندارد و طول اضلاع همواره بزرگتر از صفر هستند، جواب منحصر به فرد زیر را خواهیم داشت:

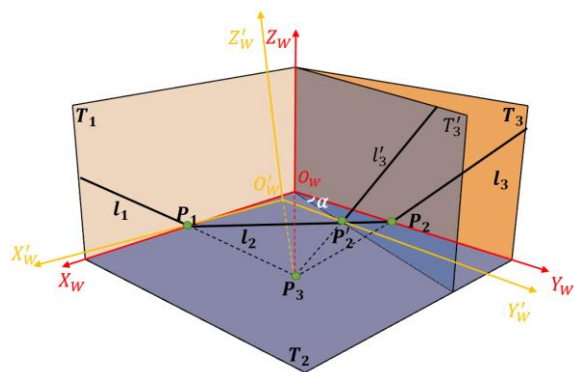
$$\begin{cases} \lambda_1 = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 - d_3^2}{2}} \\ \lambda_2 = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_3^2 - d_2^2}{2}} \\ \lambda_3 = \sqrt{\frac{d_2^2 + d_3^2 - d_1^2}{2}} \end{cases} \quad (28)$$

در سیستم مختصات تست‌فیلد سه نقطه Q_1, Q_2, Q_3 را متناظر با نقاط P_1, P_2, P_3 در نظر می‌گیریم. با توجه به اینکه این سه نقطه بر روی محورهای سیستم مختصات تست‌فیلد قرار دارد و فاصله آن‌ها از O_W برابر λ_1, λ_2 و λ_3 است، می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} Q_1 = (\lambda_1, 0, 0) \\ Q_2 = (0, \lambda_2, 0) \\ Q_3 = (0, 0, \lambda_3) \end{cases} \quad (29)$$

مجموعه مختصات‌های نقاط (P_1, P_2, P_3) و (Q_1, Q_2, Q_3) مختصات نقاط متناظر در دو سیستم مختصات مختلف هستند. بنابراین، حل پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به سیستم مختصات تست‌فیلد (تعیین R_{IW} و T_{IW}) در واقع یک مسئله هم‌مرجع‌سازی سه نقطه‌ای است [۲۶]. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با استفاده از نقاط P_1, P_2 و P_3 یک سیستم مختصات جدید ساخته شده است و نقطه P_1 که در سیستم مختصات فاصله‌یاب قرار دارد، به‌عنوان مبدأ این سیستم مختصات در نظر گرفته می‌شود و هر سه

صفحات اتاق کاملاً برهم عمود نباشند؛ به عنوان مثال، اگر T_3 به اندازه α انحراف داشته باشد باعث می شود که قائدهی هرم کاملاً قائم الزاویه نباشد. در چنین حالتی صفحه اسکن فاصله‌یاب، سه صفحه T_1 ، T_2 و T'_3 را قطع می کند و خطوط l_1 ، l_2 و l'_3 فصل مشترک تقاطع آن ها می شود هرم را به ترتیب در سه نقطه P_1 ، P'_2 و P_3 قطع کند.



شکل ۹- تأثیر قائم نبودن صفحات دیوار

در شرایط ایده آل هرم $O_W P_1 P_2 P_3$ برای حل مسئله P3P به کار برده می شود و در آخر دوران و انتقال سیستم مختصات فاصله‌یاب نسبت به $O_W X_W Y_W Z_W$ را که پارامترهای ترفیع فاصله‌یاب هستند، به دست می آید. به دلیل انحراف α ، نقطه ایده آل P_2 به P'_2 تغییر می یابد و هرم مثلثی $O_W P_1 P'_2 P_3$ یک هرم مثلثی با قائده قائم الزاویه نخواهد بود. با این حال مسأله P3P ساده شده حل می شود، یعنی یک هرم قائم الزاویه $O'_R P_1 P'_2 P_3$ تشکیل می شود و سیستم مختصات جدید $O'_W X'_W Y'_W Z'_W$ شکل می گیرد. در این شرایط پارامترهای کالیبراسیون خارجی محاسبه شده فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد نسبت به $O'_W - X'_W Y'_W Z'_W$ محاسبه شده است. بنابراین، دوران و انتقال بین $O_W X_W Y_W Z_W$ و $O'_W X'_W Y'_W Z'_W$ برابر با خطای کالیبراسیون فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به سیستم مختصات تست فیلد است که به دلیل انحراف α اتفاق می افتد. هرچه مقدار α بزرگ باشد، اختلاف بین $P_1 P_2$ و $P_1 P'_2$ بیشتر می شود و در نتیجه خطای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به سیستم مختصات تست فیلد بیشتر می شود.

در این روش فقط از یک اسکن فاصله‌یاب دوبعدی برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب دوبعدی نسبت به سیستم مختصات تست فیلد استفاده شد. هرم قائم الزاویه ای که در گوشه اتاق ساخته می شود، باعث می شود که جواب P3P منحصر به فرد شود. تقاطع سه خط

می تواند تناظر بین داده های فاصله یاب و تست فیلد را تعیین کند. علاوه بر این، در این روش مستقیماً از داده های فاصله یاب همچون روش ژانگ [۵] استفاده نمی شود. در این روش از خطوط برازش داده شده به داده های فاصله یاب استفاده شده است که تأثیر نویزها را در کالیبراسیون خارجی فاصله یاب کاهش می دهد.

۲-۳-۲- کالیبراسیون خارجی دوربین ایستگاه اصلی نسبت به تست فیلد

هدف این قسمت یافتن پارامترهای کالیبراسیون خارجی دوربین در ایستگاه اصلی نسبت به تست فیلد (R_{PW} و T_{PW}) است. چنانچه در ایستگاه اصلی و چند ایستگاه دیگر با دوربین از تست فیلد عکس گرفته شود، می توان با در نظر گرفتن تارگت ها به عنوان نقاط متناظر در تصاویر، مختصات همه ی تارگت ها را با تکنیک باندل اجسمنت به دست آورد. برای حل مسأله مقیاس می توان فاصله بین چند تارگت را اندازه گرفت و به عنوان قید ثابت در فرآیند باندل اجسمنت اعمال کرد. مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری مثل دو روش قبلی، مرکز اپتیکی دوربین در ایستگاه اصلی است. مطابق شکل ۱۰، S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 چهار تارگت هستند که مختصات آن ها در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری در اختیار است. این تارگت ها بر روی گوشه اتاق و فصل مشترک دیوارها و کف اتاق قرار دارند که به ترتیب مبدأ و محورهای سیستم مختصات تست فیلد هستند. D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب فاصله های بین تارگت S_0 با تارگت های S_1 ، S_2 و S_3 هستند که به شکل زیر به دست می آیند.

$$\begin{cases} D_1 = \|S_0 - S_1\| \\ D_2 = \|S_0 - S_2\| \\ D_3 = \|S_0 - S_4\| \end{cases} \quad (27)$$

نقاط E_0 تا E_3 در سیستم مختصات تست فیلد به ترتیب متناظر با نقاط S_0 تا S_3 در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری هستند. چون این چهار نقطه بر روی گوشه اتاق و فصل مشترک دیوارها و کف اتاق قرار دارند مختصات آن ها در سیستم مختصات تست فیلد به صورت رابطه ۲۸ خواهد بود.

اکنون مختصات چهار نقطه در دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و سیستم مختصات تست فیلد در اختیار است و می توان مشابه آنچه که در بخش ۲-۱-۳ گفته شد،

اتاق نصب شدند. ۱۶ توپ پینگ‌پنگ در تست‌فیلد وجود داشت. پردازش‌های لازم برای تولید ابرنقطه سه‌بعدی توسط NVIDIA Jetson AGX Xavier Developer Kit انجام شد. کدهای سیستم ساخته‌شده با زبان C++ و تحت ROS [۲۷] در محیط linux توسعه داده شد.



شکل ۱۱- سیستم طراحی شده شامل فاصله‌یاب دوبعدی، دوربین استریو و سروموتور

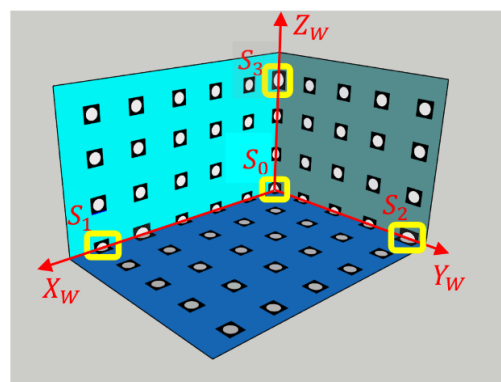
۳-۱- انجام کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی

برای انجام کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه‌بعدی، سیستم ساخته‌شده در برابر تست‌فیلد به صورتی قرار گرفت که همهٔ تارگت‌ها در کل فضای تصویر در ایستگاه اصلی پخش شده باشند. در ایستگاه اصلی با ترکیب داده‌های فاصله‌یاب دوبعدی و سروموتور یک ابرنقطه سه‌بعدی با تراکم بسیار زیاد تهیه شد. توپ‌های پینگ‌پنگ بر روی دیوارها و کف اتاق نصب شده بودند؛ بنابراین، در ابرنقطه سه‌بعدی به‌دست‌آمده، نقاطی که مربوط به توپ‌های پینگ‌پنگ بودند به‌راحتی از سایر نقاط قابل‌شناسایی بودند. نقاط مربوط به هر توپ پینگ‌پنگ در نرم‌افزار GOM inspect [۲۸] انتخاب شده و به هر یک از آنها یک کره برازش داده شد. مختصات مراکز کره‌های برازش داده‌شده به‌عنوان مختصات مراکز توپ‌ها در سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی در نظر گرفته شد. ابرنقطه سه‌بعدی تولید شده در شکل ۱۲ نشان داده شده‌است.

در ایستگاه اصلی با دوربین‌های چپ و راست از تست‌فیلد عکس گرفته‌شد. علاوه بر این، با همان دوربین

ماتریس دوران R_{PW} و بردار انتقال T_{PW} بین دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و سیستم مختصات تست‌فیلد را محاسبه کرد. با داشتن R_{PW} ، T_{PW} و R_{PI} و T_{PI} می‌توان با رابطه (۱۸) پارامترهای R_{PI} و T_{PI} را به دست آورد.

$$\begin{cases} E_0 = (0, 0, 0) \\ E_1 = (D_1, 0, 0) \\ E_2 = (0, D_2, 0) \\ E_3 = (0, 0, D_3) \end{cases} \quad (28)$$

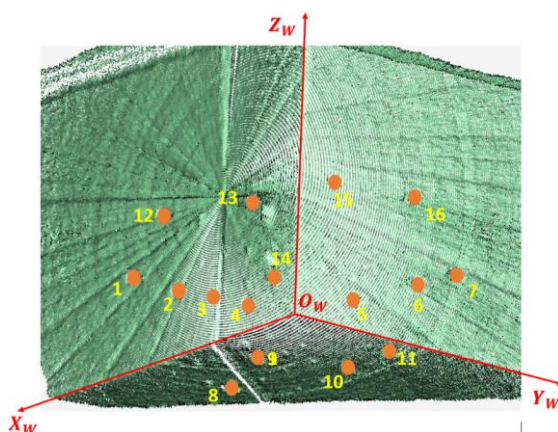


شکل ۱۰- تعیین ماتریس دوران و بردار انتقال سیستم مختصات مدل فتوگرامتری نسبت به سیستم مختصات تست‌فیلد با چهار نقطه

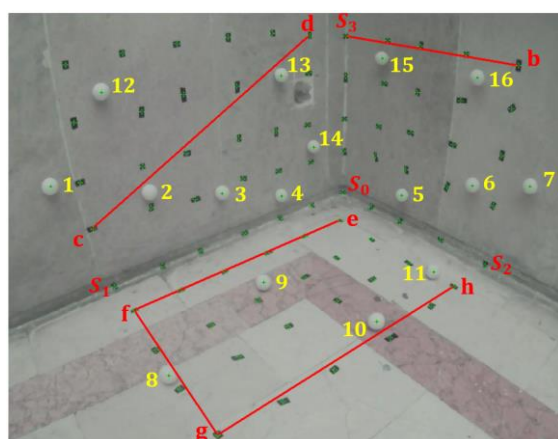
۳- پیاده‌سازی

جهت پیاده‌سازی و ارزیابی روش‌های پیشنهادی در این مقاله، سه آزمایش انجام شد. در آزمایش‌ها از دوربین استریو MYNT EYE D1000 با فاصلهٔ کانونی ۲/۴۵ میلی‌متر و رزولوشن ۱۲۸۰×۷۲۰ پیکسل استفاده شد. فاصله‌یاب دوبعدی استفاده‌شده Hokuyo URG-04LX-UG01 بود. میدان دید این فاصله‌یاب ۲۴۰ درجه و رزولوشن زاویه‌ای آن ۰/۳۵۲ درجه است. حداکثر طول اندازه‌گیری این فاصله‌یاب ۵/۶ متر است. دقت این فاصله‌یاب برای فواصل کمتر از یک متر ± 30 میلی‌متر و برای فواصل بیشتر از یک متر، ۳ درصد فاصله اندازه‌گیری شده‌است. برای دوران فاصله‌یاب از سروموتور DYNAMIXEL MX-28T استفاده شد که می‌تواند زاویه دوران شفت را با دقت ۰/۰۸۸ درجه اندازه بگیرد. در فرآیند کالیبراسیون، بردار انتقال و ماتریس دوران فاصله‌یاب و دوربین سمت چپ نسبت به هم محاسبه شد. برای اتصال تجهیزات ذکر شده، یک سیستم مطابق شکل ۱۱ طراحی و ساخته شد. در آزمایش‌ها از تست‌فیلدی که در شکل ۱ آورده شد استفاده شد. تست‌فیلد مورد استفاده ابعادی حدود یک متر مکعب داشت. نقاط کنترل با توزیع یکنواخت بر روی دیوارها و کف

استریو در موقعیت‌های دیگر از تست‌فیلد عکس گرفته شد. مطابق شکل ۱۳، تارگت‌ها و توپ‌های پینگ‌پنگ به‌عنوان نقاط متناظر در تصاویر در نظر گرفته شدند و باندل‌اجسمنت انجام شد. فرآیند باندل‌اجسمنت در نرم‌افزار Australis [۲۹] انجام شد. برای حل مسئله مقیاس، باتوجه‌به شکل ۱۳ فاصله بین تارگت‌های $b-S_0$ ، $f-g$ ، $d-c$ و $f-e$ اندازه‌گیری شد که طول آن‌ها به ترتیب ۵۸۰، ۸۱۰، ۷۰۰، ۴۳۰ و ۷۰۵ میلی‌متر بود. این طول‌ها به‌عنوان قیود ثابت در باندل‌اجسمنت اعمال شدند. مبدأ سیستم مختصات مدل فتوگرامتری، مرکز اپتیکی دوربین سمت چپ در ایستگاه اصلی در نظر گرفته شد. به‌این‌ترتیب، مختصات تارگت‌ها و توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به‌دست آمد.



شکل ۱۲- ابرنقطه سه‌بعدی برداشت‌شده توسط سیستم فاصله‌یاب سه‌بعدی ساخته‌شده و کره‌های برازش داده‌شده به توپ‌های پینگ‌پنگ



شکل ۱۳- تارگت‌ها و فاصله‌های اندازه‌گیری‌شده برای حل مقیاس

با داشتن مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در دو سیستم مختصات فاصله‌یاب سه‌بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری می‌توان پارامترهای کالیبراسیون را مطابق

آنچه که در بخش ۲-۳ گفته شد محاسبه کرد. مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ با شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به‌عنوان نقاط کنترل برای به‌دست‌آوردن پارامترهای کالیبراسیون خارجی فاصله‌یاب و دوربین استفاده شدند. مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ با شماره ۴، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۵ به‌عنوان نقاط چک در نظر گرفته شدند.

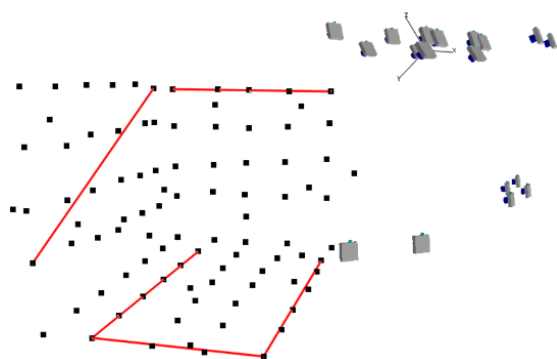
۲-۳- انجام کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی

ایستگاه اصلی در این آزمایش دقیقاً همان ایستگاه اصلی آزمایش مرحله قبل بود. زاویه چرخش صفحه فاصله‌یاب دوبعدی (γ) برابر صفر قرار داده شد، بنابراین، در این حالت محورهای X_L و Y_L به ترتیب بر محورهای X_W و Y_W منطبق هستند و در نتیجه انتظار می‌رود که پارامترهای این آزمایش با آزمایش قبل یکسان باشند. در این آزمایش باید توپ‌های پینگ‌پنگ دقیقاً به‌صورتی در تست‌فیلد قرار گرفته باشند که صفحه برداشت فاصله‌یاب دوبعدی، توپ‌های پینگ‌پنگ را نصف کند.

در ابرنقطه دوبعدی برداشت‌شده مطابق شکل ۱۴، نقاط مربوط به هر توپ پینگ‌پنگ به کمک نرم‌افزار GOM inspect انتخاب شدند و به هر یک از آن‌ها یک دایره برازش داده شد. برای برازش دایره حداقل به سه نقطه برداشت شده از هر توپ نیاز است ولی هرچه تعداد این نقاط بیشتر باشد دقت برازش دایره بهتر خواهد شد. در این آزمایش چون سیستم در همان موقعیت ایستگاه اصلی آزمایش قبل قرار داشت، از همان مدل فتوگرامتری آزمایش قبل استفاده شد. بنابراین، مختصات ۷ نقطه در دو سیستم مختصات فاصله‌یاب دوبعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری به دست آمد. با استفاده از نقاط کنترل پارامترهای کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب محاسبه شد.

۳-۳- انجام کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق

در این آزمایش زاویه چرخش صفحه فاصله‌یاب دوبعدی (γ) برابر صفر قرار داده شد. در نتیجه وضعیت دوربین و فاصله‌یاب در هر سه آزمایش یکسان است و انتظار می‌رود پارامترهای کالیبراسیون یکسان باشند. در این آزمایش سیستم به‌گونه‌ای در مقابل تست‌فیلد مستقر



شکل ۱۶- توزیع ایستگاه‌های تصویر برداری در آزمایش سوم و تارگت‌ها و فواصل اندازه‌گیری شده برای حل مقیاس

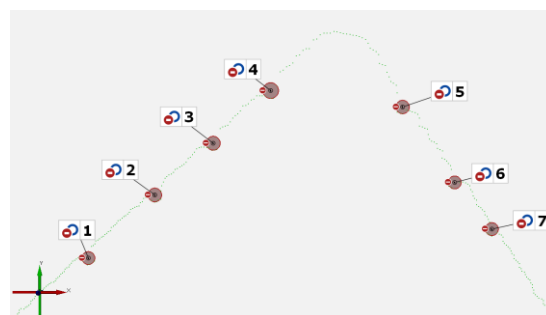
با استفاده از مختصات محاسبه شده برای تارگت‌ها، فاصله بین تارگت‌های S_1-S_0 ، S_2-S_0 و S_3-S_0 در شکل ۱۳ به دست آمد و مختصات نقاط S_0 ، S_1 ، S_2 و S_3 در سیستم مختصات تست‌فیلد به دست آمد. با استفاده از مختصات این چهار نقطه در دو سیستم مختصات مدل فتوگرامتری و تست‌فیلد، T_{PW} و R_{PW} محاسبه شد. در آخر، پارامترهای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب با استفاده از رابطه (۱۸) به دست آمد.

۴- نتایج و ارزیابی

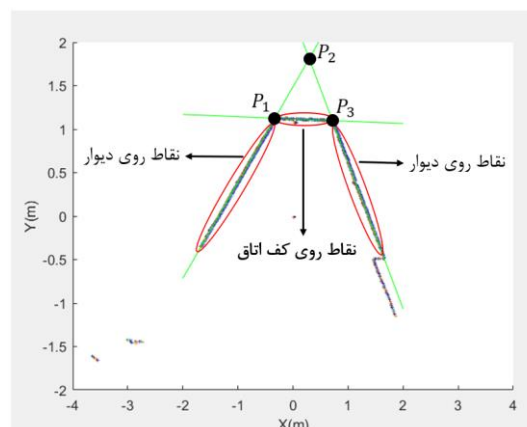
در آزمایش ۱-۳ یک ابرنقطه سه‌بعدی از تست‌فیلد تهیه شد و مختصات مراکز توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم فاصله‌یاب سه‌بعدی به دست آمد. همچنین، از طریق انجام باندل‌اجسمت مختصات توپ‌های پینگ‌پنگ در سیستم مختصات مدل فتوگرامتری نیز به دست آمد. توپ‌های پینگ‌پنگ با شماره ۴، ۹، ۱۱، ۱۲ و ۱۵ به عنوان نقاط چک در نظر گرفته شد. با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین دوربین سمت چپ و فاصله‌یاب که در سه آزمایش به دست آمد، مقدار $RMSE$ در هر سه آزمایش محاسبه شد. جدول ۱ پارامترهای کالیبراسیون و مقدار $RMSE$ هر روش آورده شده است. جدول ۳، جدول ۴ و جدول ۵ مختصات محاسبه شده‌ی نقاط چک و خطای آن‌ها را نشان می‌دهد.

در فرآیند کالیبراسیون و ارزیابی روش‌های پیشنهادی، توپ‌های پینگ‌پنگ به عنوان نقاط کنترل و چک استفاده شد. نقاط کنترل برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون استفاده می‌شوند و در تعیین پارامترهای کالیبراسیون به کار می‌روند. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه

شد که فاصله‌یاب دوبره‌ای کف اتاق و دیوارهای تشکیل‌دهنده تست‌فیلد را در یک اسکن برداشت کرد. شکل ۱۵ پروفیل دوبره‌ای که توسط فاصله‌یاب برداشت شده را نمایش می‌دهد، به نقاط مربوط به دیوارها و کف اتاق سه خط برازش داده شد. ممکن است فاصله‌یاب نقاطی را برداشت کند که آن نقاط مربوط به اشیای بر روی دیوارها یا کف اتاق باشند، در این صورت، آن نقاط در برازش خطوط در نظر گرفته نمی‌شوند. از تقاطع خطوط برازش داده شده نقاط P_1 ، P_2 و P_3 به دست آمد.



شکل ۱۴- ابرنقطه دوبره‌ای حاصل از برداشت توپ‌های پینگ‌پنگ



شکل ۱۵- داده‌های برداشت شده توسط فاصله‌یاب دوبره‌ای، خطوط برازش داده شده به نقاط دیوارها و کف اتاق و تقاطع خطوط

در همان موقعیتی که فاصله‌یاب دوبره‌ای اسکن را انجام داد، با دوربین‌های چپ و راست از تست‌فیلد عکس گرفته شد. با استفاده از تصاویر استفاده شده در دو روش قبل و تصاویر گرفته شده در این ایستگاه، باندل‌اجسمت انجام شد. شکل ۱۶ توزیع ایستگاه‌های تصویر برداری و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری را نشان می‌دهد که مبدأ آن مرکز اپتیکی دوربین سمت چپ در ایستگاه اصلی است.

جدول ۲- مختصات نقاط چک در سیستم مختصات فاصله یاب سه بعدی و سیستم مختصات مدل فتوگرامتری

شماره نقطه	X	Y	Z
مدل فتوگرامتری	۴	۱۴۲/۱۳	۱۳۲۴/۷۹
	۹	۹۲/۳۸	۱۰۷۷/۵۵
	۱۱	۵۴۲/۵۳	۱۰۸۴/۵۳
	۱۲	-۲۶۱/۵۹	۸۶۵/۰۸
	۱۵	۴۳۳/۰۲	۱۱۴۹/۷۵
فاصله یاب سه بعدی	۴	۶۹/۲۲	۱۳۱۵/۷۰
	۹	۸/۰۶	۱۰۷۲/۹۸
	۱۱	۴۷۱/۰۳	۱۰۸۳/۷۴
	۱۲	-۳۳۳/۲۸	۸۴۶/۷۳
	۱۵	۳۷۹/۲۱	۱۱۳۵/۲۰

جدول ۳- مختصات محاسبه شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی

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 ۴- مختصات محاسبه شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی

شماره نقطه	X	Y	Z	خطا X	خطا Y	خطا Z
۴	۱۷۷/۹۸	۱۳۲۲/۵۲	۱۰۱/۷۷	۳۵/۸۵	-۲/۲۷	۳/۳۸
۹	۱۱۲/۴۸	۱۰۸۱/۱۱	-۱۳۳/۸۹	۲۰/۱۰	۳/۵۶	۵/۱۹
۱۱	۵۷۵/۴۹	۱۰۷۸/۶۲	-۱۲۲/۴۰	۳۲/۹۶	-۵/۹۱	-۳/۸۴
۱۲	-۲۴۰/۱۰	۸۶۵/۷۵	۳۰۸/۷۱	۲۱/۴۹	۰/۶۷	۸/۸۹
۱۵	۴۷۸/۳۵	۱۱۳۴/۱۰	۴۹۳/۶۸	۴۵/۳۳	-۱۵/۶۵	۵/۹۷

از سوی دیگر پیاده سازی هر کدام از روش های ارائه شده دارای چالش ها و مزایای مربوط به خود هستند. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی نیاز است که فاصله یاب دوبعدی به یک سروموتور متصل باشد و یک گیمبال با توجه به ابعاد و مرکز ارسال پرتو لیزر فاصله یاب، طراحی و ساخته شود که کاری زمانبر است. علاوه بر این، داده های فاصله یاب و انکودر سروموتور باید به صورت همزمان ضبط شوند تا ابرنقاط دو بعدی نسبت به هم در یک ایستگاه هم مرجع شوند که نیازمند برنامه

دو بعدی و ابرنقطه سه بعدی، نقاط کنترل استفاده شده که مراکز تعدادی از توپ های پینگ پنگ بودند، به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته شدند. در روش کالیبراسیون با استفاده از گوشه ای اتاق از طریق هرم با قاعده ای قائم الزاویه که در گوشه ای اتاق ساخته می شود، پارامترهای کالیبراسیون به دست می آید. در این روش، هیچ نقطه ای کنترلی برای محاسبه پارامترهای کالیبراسیون استفاده نشده است. پارامترهای کالیبراسیون از طریق هندسه ایجاد شده در گوشه ای اتاق به دست آمدند و پارامتری تحت عنوان RMSE نقاط کنترل در این روش تعریف نمی شود. RMSE نقاط کنترل در دو روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دو بعدی و ابرنقطه سه بعدی را می توان به دست آورد، ولی چون نقاط کنترل به کار گرفته شده در این دو روش از نظر تعداد و توزیع با هم متفاوت هستند، مقایسه RMSE نقاط کنترل منطقی نخواهد بود. از سوی دیگر، تعدادی از توپ های پینگ پنگ که در ابر نقطه سه بعدی پراکنده بودند، به عنوان نقاط چک جهت ارزیابی روش های ارائه شده در نظر گرفته شدند. چون این نقاط در محاسبه پارامترهای کالیبراسیون حضور نداشتند و با توزیع مناسبی در محیط تست فیلد پخش شده اند، در نتیجه RMSE نقاط چک برای مقایسه و ارزیابی سه روش ارائه شده بسیار مناسب است. با توجه به RMSE های محاسبه شده برای هر سه روش، به ترتیب کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی، گوشه ای اتاق و ابرنقطه دو بعدی بیشترین دقت را داشتند.

جدول ۱- پارامترهای کالیبراسیون و RMSE محاسبه شده

روش کالیبراسیون	پارامترهای کالیبراسیون	RMSE (mm)
کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی	$R = \begin{bmatrix} 1/0.00 & 0/0.00 & -0/0.16 \\ 0/0.00 & 1/0.00 & 0/0.12 \\ 0/0.16 & -0/0.12 & 1/0.00 \end{bmatrix}$ $T = [65/890 \quad 8/385 \quad 107/44]^T$	۱۲,۴۰
کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی	$R = \begin{bmatrix} 1/0.00 & 0/0.29 & -0/0.11 \\ -0/0.29 & 1/0.00 & 0/0.02 \\ 0/0.11 & -0/0.02 & 1/0.00 \end{bmatrix}$ $T = [71/146 \quad 9/328 \quad 97/025]^T$	۳۷,۹۴
کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق	$R = \begin{bmatrix} 1/0.00 & -0/0.03 & -0/0.05 \\ 0/0.04 & 0/999 & 0/0.38 \\ 0/0.05 & -0/0.38 & 0/999 \end{bmatrix}$ $T = [71/082 \quad 0/387 \quad 125/963]^T$	۱۹,۸۱

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق سه روش قابل اطمینان و کاربردی برای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله یاب دوبعدی با استفاده از یک تست فیلد ارائه شد. تست فیلد مورد استفاده علاوه بر تارگت های فتوگرامتری، دارای ۱۶ عدد توپ پینگ پنگ بود. توپ های پینگ پنگ به خاطر شکل هندسی مشخصی که دارند در تصاویر دوربین و در داده های فاصله یاب به راحتی قابل شناسایی هستند. در روش اول علاوه بر داده های فاصله یاب و دوربین، داده های سروموتور نیز برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب و دوربین استفاده شد. روش دوم نیز همانند روش اول بود با این تفاوت که فقط از یک اسکن فاصله یاب دوبعدی استفاده شد. در دو روش نخست، توپ های پینگ پنگ به عنوان تارگت های مشترک برای محاسبه پارامترهای کالیبراسیون استفاده شدند. در روش سوم گوشه اتاق برای کالیبراسیون خارجی فاصله یاب دوبعدی نسبت به تست فیلد و حل P3P به کار گرفته شد. سپس با استفاده از نقاط کنترل موقعیت دوربین ها نسبت به تست فیلد به دست آمد. در آخر، پارامترهای کالیبراسیون خارجی بین دوربین فاصله یاب با استفاده از پارامترهای خارجی فاصله یاب و دوربین نسبت به تست فیلد محاسبه شد. نتایج آزمایش های انجام شده نشان دادند که روش های ارائه شده با توجه به دقت فاصله یاب، بسیار قابل اطمینان هستند و دقت بسیار خوبی دارند.

سپاسگزاری

هزینه های این پژوهش توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به شماره ۹۷۰۱۳۸۴۱ تأمین شد. مراحل ساخت و ارزیابی سیستم در آزمایشگاه فتوگرامتری برد کوتاه دانشکده مهندسی نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد.

نویسی سطح بالایی است. با توجه به چالش های موجود، این روش بیشترین دقت را نسبت به دو روش دیگر داشت.

جدول ۵- مختصات محاسبه شده نقاط چک و خطای نقاط چک در روش کالیبراسیون با استفاده از گوشه اتاق

شماره نقطه	X	Y	Z	خطا X	خطا Y	خطا Z
۴	۱۳۵/۷۴	۱۳۱۵/۶۵	۸۳/۴۸	-۶/۳۹	-۹/۱۴	-۱۴/۹۱
۹	۷۶/۶۱	۱۰۶۴/۰۹	-۱۴۲/۰۲	-۱۵/۷۷	-۱۳/۴۷	-۳/۹۴
۱۱	۵۳۹/۵۱	۱۰۷۶/۷۳	-۱۳۴/۷۶	-۳/۰۱	-۷/۸۱	-۱۶/۲۰
۱۲	-۲۶۶/۲۲	۸۵۳/۴۵	۳۰۹/۴۴	-۴/۶۳	-۱۱/۶۳	۹/۶۲
۱۵	۴۴۴/۳۶	۱۱۵۰/۹۶	۴۷۹/۶۶	۱۱/۳۴	۱/۲۱	-۸/۰۶

در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دوبعدی، توپ های پینگ پنگ باید حتماً بر روی صفحه اسکن فاصله یاب دو بعدی نصب شوند که در عمل وقت گیر است، در حالی که در روش اول نیازی نبود که توپ ها با دقت زیادی درون تست فیلد قرار بگیرند. در روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه دو بعدی، اگر صفحه اسکن فاصله یاب 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. پیاده سازی روش دوم با توجه به چالش هایی 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 با توجه به وضعیت هندسی گوشه اتاق فرآیند کالیبراسیون انجام شد. این روش با فرض اینکه صفحات اتاق و کف اتاق دو به دو کاملاً برهم عمودند ارائه شده است. این روش بعد از روش کالیبراسیون با استفاده از ابرنقطه سه بعدی که بسیار زمانبر است، بیشترین دقت را داشت. روش سوم نسبت به دو روش قبلی از نظر پیاده سازی کمترین چالش را دارد.

مراجع

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] A. Kassir and T. Peynot, "Reliable automatic camera-laser calibration," in *Proceedings of the 2010 Australasian Conference on Robotics & Automation*, 2010, pp. 1–10.
- [7] 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, 2014, doi: 10.1109/JSEN.2013.2284789.
- [8] 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.
- [9] W. J. Wolfe, D. Mathis, C. W. Sklair, and M. Magee, "The perspective view of three points," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 13, no. 01, pp. 66–73, 1991.
- [10] S. Li, C. Xu, and M. Xie, "A robust $O(n)$ solution to the perspective-n-point problem," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 34, no. 7, pp. 1444–1450, 2012.
- [11] B. M. Haralick, C.-N. Lee, K. Ottenberg, and M. Nölle, "Review and analysis of solutions of the three point perspective pose estimation problem," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 13, no. 3, pp. 331–356, 1994.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] R. Gomez-Ojeda, J. Briaes, 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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 (Switzerland)*, vol. 19, no. 9, 2019, doi: 10.3390/s19092030.
- [21] C. S. Fraser, "Digital camera self-calibration," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 52, no. 4, pp. 149–159, 1997, doi: 10.1016/S0924-2716(97)00005-1.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] C. L. Lawson and R. J. Hanson, *Solving least squares problems*. SIAM, 1995.
- [26] P. Allen, "3D Photography: Point Based Rigid Registration," *Sci. Dep. Columbia Univ. New York*, pp. 1–6, 2007, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:3D+Photography+:+Point+Based+Rigid+Registration#9>.

- [27] "ROS: Home." <https://www.ros.org/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [28] "GOM Inspect." <https://www.gom-inspect.com/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [29] "Australis - Photometrix Photogrammetry Software." <https://www.photometrix.com.au/australis/> (accessed Mar. 24, 2022).