



ایجاد مدل سه بعدی از محیط و اشیاء با استفاده از ترکیب داده‌های عمق فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و دوربین نصب شده بر روی ربات متحرک

سعید نوری¹، مهدی علیمحمدی²، علیرضا احمدی فرد³، امیرحسین نایبی آستانه⁴

¹ دانشگاه صنعتی شاهرود دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک گروه مکترونیک saeednouri73@mihanmail.ir

² مهندس انتقال و انتشار، صدا و سیمای مرکز زنجان mahdielec44@gmail.com

³ دانشیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق، Alireza.ahmadyfard@gmail.com

⁴ استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی برق، Am_nayebi@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، مدل‌سازی سه‌بعدی هندسی و بصری از محیط و اشیاء در مقیاس واقعی تشریح می‌شود. مدل ایجاد شده می‌تواند جهت بازرسی از راه دور، فرآیندهای اندازه‌گیری هندسی و مهندسی معکوس مفید واقع شود. ترکیب داده‌های عمق ارائه شده توسط فاصله‌یاب دوبعدی لیزری و داده‌های بافت حاصل از دوربین و یکم رنگی متصل به بازوی ربات متحرک کوکا، مجموعه داده‌هایی مناسب، جهت مدل‌سازی هندسی و بصری محیط یا اشیاء واقعی هستند. در روش پیشنهادی از داده‌های فاصله‌یاب لیزری جهت ایجاد نقاط سه‌بعدی استفاده شد و در نهایت داده‌های بافت (رنگ نقاط اسکن شده) ارائه شده توسط دوربین بر روی این نقاط نگاشت داده شدند. جهت ایجاد چنین نگاشتی کالیبراسیون خارجی دوربین به فاصله‌یاب لیزری انجام گرفت. داده‌های سه‌بعدی عمق و بافت استخراج شده از محیط با استفاده از ردیاب سه‌بعدی حالت ربات، در دستگاه مختصات مرجع بیان شده و مدل سه‌بعدی دارای بافت در دستگاه مرجع ایجاد شد. نقشه‌ی سه‌بعدی حاصل از این روش دارای رزولوشن 0/35 در 0/5 درجه است. بیشینه فاصله‌ی قابل برداشت توسط حسگر فاصله‌یاب لیزری 4 متر، سیستم ردیاب دوربین قادر به ردیابی دوربین با 51 فریم در ثانیه و حرکت تا 50 میکرو متر در دوربین های ردیاب قابل تشخیص است.

واژه‌های کلیدی: نقشه‌برداری سه‌بعدی، ادغام حسگرها، ربات متحرک کوکا، فاصله‌یاب دوبعدی لیزری

1. مقدمه

بازسازی و ارائه‌ی اطلاعات هندسی و بصری از محیط یا اشیاء واقعی یکی از چالش‌های مهم در بینایی کامپیوتری محسوب می‌شود. سیستم‌های ایجاد مدل سه‌بعدی از محیط در مقیاس‌های گوناگون جهت مدل‌سازی شهر، ساختمان‌ها، محیط‌های داخلی و اشیاء توسعه یافته است. همچنین انواع مختلف مدل‌سازی سه‌بعدی از نظر سنسورها و روش‌های جمع‌آوری دیتا، تکنیک‌های پردازش داده و نحوه محاسبه‌ی نتایج موجود است.

حسگرهای مختلفی جهت جمع‌آوری داده از محیط استفاده می‌شود. دوربین‌ها سنسورهای اصلی در این زمینه هستند زیرا تصویر ایجاد شده توسط دوربین، شامل اطلاعات زیادی مانند هندسه‌ی صحنه، رنگ و بافت و غیره است اما تحلیل داده‌های آن‌ها بسیار مشکل است زیرا مسائل بینایی کامپیوتری هنوز دارای چالش‌های بسیار زیادی در محیط‌های واقعی و بدون ساختار هستند.

فاصله‌یاب‌های دوبعدی و سه‌بعدی جهت بازسازی هندسه‌ی محیط بسیار مفید هستند چرا که اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از محیط ارائه می‌دهند. نقشه‌برداری دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از فاصله‌یاب لیزری یک موضوع تحقیقاتی فعال در سال‌های اخیر است. با این حال اسکن‌های سه‌بعدی لیزری دارای قیمت بسیار بالایی هستند. اما با استفاده از فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و بستر دورانی می‌توان اسکن سه‌بعدی لیزری با قیمت کم‌تر ایجاد کرد. این اسکن نسبت به همتای خود به زمان بالاتری جهت اسکن سه‌بعدی محیط نیاز دارد. اسکن ایجاد شده توسط فاصله‌یاب لیزری فاقد اطلاعات بصری بوده و فقط شامل موقعیت نقاط اسکن شده از محیط است، با ترکیب داده‌های فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و اطلاعات بصری دوربین می‌توان مدل سه‌بعدی همراه با بافت از محیط و اشیاء ایجاد کرد. در این تحقیق از ترکیب داده‌های فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و دوربین قرار داده شده بر روی ماهر ربات متحرک شرکت کوکا اقدام به ایجاد مدل سه‌بعدی از محیط و اشیاء موجود در آن شد. مدل ایجاد شده با استفاده از این روش می‌تواند جهت مهندسی معکوس اشیاء با ابعاد بزرگ و کنترل کیفی قطعات با توجه به ایستا بودن قطعه به دلیل وزن و حجم آن مفید واقع شود. یکی دیگر از کاربردهای روش ارائه شده در پایش محل‌های پرخطر مانند نیروگاه‌های هسته‌ای است. پس از ساخت نیروگاه‌ها و با بهره‌برداری از آن فعالیت انسان در نیروگاه متوقف می‌شود. با این وجود پایش دائمی محیط‌های داخلی نیروگاه از اهمیت ویژه برخوردار است با وجود خطاهای موجود در روش‌های مکان‌یابی و تجمعی بودن این خطاها نقشه‌های ایجاد شده دارای خطای بسیار بالا در کارکرد طولانی مدت هستند. با تعبیه‌ی سیستم دنبال‌کننده‌ی حرکتی بصری (بینایی چند گانه) می‌توان نقشه‌ی مناسب از محیط با یک مرجع همیشه ثابت ایجاد کرد که می‌تواند در پایش محیط بسیار مفید واقع شود.

2. مروری بر کارهای انجام شده

نقشه‌برداری سه‌بعدی در دهه‌های اخیر مورد مطالعه بسیاری از محققان ([1][2][3]) قرار گرفته است. بازسازی سه‌بعدی با استفاده از روش‌های مختلف مانند مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی¹، استخراج ساختار از حرکت²، و کینکت فیوژن³ امکان‌پذیر است. در روش‌های بازسازی سه‌بعدی سنسورهای مختلفی مانند کینکت، فاصله‌یاب لیزری، دوربین‌های استریو و دوربین‌های زمان پرواز استفاده می‌شود. مدل سه‌بعدی ایجاد شده با استفاده از این روش‌ها در کاربردهایی مانند بازرسی از دور، فرآیندهای اندازه‌گیری و مهندسی معکوس مفید واقع می‌شود.

بازسازی سه‌بعدی اشیاء و درک صحیح هندسه‌ی آن موجب کاهش زمان و هزینه‌ها می‌شود، در [4] جهت بررسی رفتار دینامیکی قطعات باریک از مدل سه‌بعدی قطعه استفاده شد و نتایج با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی اعتبار سنجی شد.

¹ Simultaneous Localization And Mapping

² Structure From Motion

³ Kinect fusion

این تحقیق، اهمیت بازسازی سه‌بعدی و عدم نیاز به آزمایشگاه با ابزار و وسایل گران قیمت جهت تحلیل رفتار دینامیکی قطعات باریک را نشان داد.

یکی دیگر از سناریوهای استفاده از مدل سه‌بعدی، در کنترل کیفی قطعه ساخته شده با مدل کامپیوتری آن است. کاربرد اسکن سه‌بعدی جهت انجام این عمل را در مقاله [5] می‌توان دید.

در بسیاری از موارد افراد علاقه‌مند به ایجاد یک مدل سه‌بعدی از بدنشان هستند، در [6] اسکن سه‌بعدی جهت اسکن بدن انسان با استفاده از روش استخراج ساختار از حرکت انجام گرفت در این روش با استفاده از کنترلر رزبری پای و 100 دوربین تصاویر از زاویه‌های مختلف در کسری از ثانیه از بدن گرفته می‌شود، برخی از اسکن‌های سه‌بعدی صورت گرفته دارای دقت پایین بودند، در [7] خطیابی و همکاران با بیان این مسئله که دقت بازسازی عمق بطور مستقیم متأثر از کوانتیزه کردن است اقدام بر تشریح تئوری (DT4) و مدل‌سازی ریاضی آن کردند، تکنیک تشریح شده از نسبت حرکت بین جسم و حسگر جهت کاهش خطای کوانتیزه کردن بهره بردند.

1-2 مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی

در این مسئله، ربات، ناوبری خود را از مکانی نامعلوم در محیط ناشناخته شروع می‌کند. پس از درک ویژگی‌های محیط، تخمین‌گر SLAM مجموعه‌ای از پردازش‌ها از جمله تشخیص ویژگی، تعیین جدید بودن ویژگی، محاسبه موقعیت فضایی آن و اضافه کردن آن به ویژگی‌های فعلی نقشه را انجام می‌دهد. هم‌زمان، تخمین‌گر ربات با توجه به ویژگی‌های شناخته‌شده از محیط، مکان ربات را تخمین می‌زند. در این روش، ربات به صورت تدریجی می‌تواند نقشه را از ویژگی‌های محیط ساخته و مکان خودش را پیدا کند [8].

2-2 مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی

اولین حسگر مورد استفاده در نقشه‌برداری سه‌بعدی، حسگر فاصله‌یاب لیزری است. سارمن و همکاران در مطالعه‌ای سیستمی اتوماتیک جهت دیجیتالی کردن محیط‌های داخلی (مدل‌سازی سه‌بعدی محیط) بدون دخالت انسان ارائه داده‌اند. این سیستم از یک ربات خودمختار همراه با فاصله‌یاب سه‌بعدی لیزری و نرم‌افزار مربوطه تشکیل شده بود. در این مطالعه، از الگوریتم تکراری نزدیک‌ترین نقاط^۵ جهت تطبیق نقاط سه‌بعدی و به دست آوردن موقعیت ربات استفاده شده است [9]. برخی از محققان نیز تلاش کرده‌اند تا با استفاده از حسگر فاصله‌یاب دوبعدی لیزری، اقدام به ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی نمایند [8]، [9]. دیوید و همکاران با استفاده از حسگر فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و حسگرهای GNSS^۶ و IMU^۷ نصب شده بر روی پهباد، سیستمی جهت نقشه‌برداری سه‌بعدی هوایی ارائه دادند [10]. در مطالعه [9] روشی برای مدل‌سازی سه‌بعدی شهر، با استفاده از دو حسگر فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و دوربین ارائه شد. در بستر استفاده شده در این روش، از دوربین جهت ایجاد بافت، از حسگر لیزری دوبعدی با خط اسکن عمودی جهت ایجاد مدل سه‌بعدی ساختمان‌ها و از حسگر لیزری دوبعدی با خط اسکن افقی، جهت شناسایی اشیاء در حال حرکت یا موانع جلوی خودرویی که بستر روی آن نصب شده، استفاده شد.

3-2 روش‌های مبتنی بر دوربین‌های رنگی و عمقی

⁴ Dithering technique

⁵ Iterative closest point

⁶ Global Navigation Satellite System

⁷ Inertial measurement unit

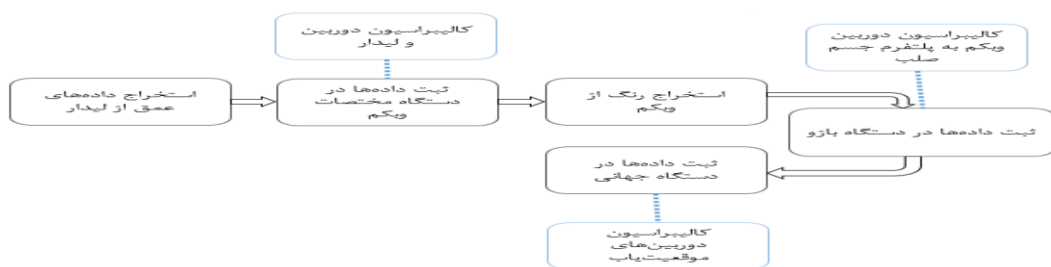
تحقیقات در زمینه‌ی نقشه‌برداری سه‌بعدی، با ظهور حسگرهایی مانند کینکت [11] و اکستین پرو^۸ [12] فعال‌تر شد. این دو حسگر عمق و اطلاعات مرئی صحنه را استخراج نموده و می‌توانند برای نقشه‌برداری سه‌بعدی محیط‌های داخلی در کاربردهای گوناگون مانند ناوبری ربات و درک محیط مورد استفاده قرار گیرند. بازسازی سه‌بعدی آنی با استفاده از یک دوربین عمقی متحرک توسط Newcombe و همکارانش در سال 2011 توسعه داده شد [13]. در این روش با حرکت کینکت توسط کاربر، یک بازسازی سه‌بعدی سریع با جزئیات از محیط‌های داخلی ایجاد می‌شود. سرعت بالای این روش به خاطر استفاده از برنامه‌نویسی موازی است. در این روش فقط از اطلاعات عمق، جهت بازسازی سه‌بعدی استفاده شده و از اطلاعات بصری ارائه شده توسط سنسور کینکت، هیچ استفاده‌ای نشده است.

استفاده از حسگر کینکت در مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی را RGB-D SLAM گویند. هنری^۹ و همکاران، از این روش جهت مدل‌سازی محیط‌های داخلی استفاده کردند [14]. این روش توسط اندرس^{۱۰} و همکارانش نیز مورد مطالعه قرار گرفت [15]. آن‌ها از اطلاعات بصری دوربین کینکت، جهت شناسایی رابط‌های مختلف دوربین در دو فریم استفاده کردند. اطلاعات بصری که جهت تخمین موقعیت دوربین استفاده می‌شود، اغلب دارای خطا بوده و این خطا در تخمین موقعیت‌های بعدی دوربین تأثیر فراوانی داشت؛ حتی در برخی از موارد نقشه‌برداری سه‌بعدی را با شکست مواجه می‌کرد. برای این منظور تعدادی از محققان، از حسگرهایی حرکتی مانند IMU جهت موقعیت‌یابی همراه با فیلتر کالمن استفاده کردند [16]، [17].

3. مراحل بازسازی سه‌بعدی با روش ارائه شده

بازسازی سه‌بعدی شامل دو بخش کالیبراسیون بستر و بازسازی یک خط از صحنه است. مرحله اول از این روش یک‌بار در ابتدا انجام شده و نتایج حاصل از این مرحله در بازسازی یک خط از صحنه استفاده می‌شود. بخش اول تنظیمات پلتفرم بازسازی سه‌بعدی نامیده می‌شود و شامل کالیبراسیون دوربین به لیدار، کالیبراسیون دوربین متصل به بازوی ربات به بستر جسم صلب و کالیبراسیون سیستم استریو موقعیت‌یابی است. بخش دوم دائماً تکرار می‌شود تا یک صحنه به صورت کامل بازسازی شود. در این مرحله ربات در ابتدای مسیر اسکن قرار می‌گیرد، سپس بازوی ربات شروع به اسکن صحنه مقابل خود می‌کند با حرکت مفصل پایه ربات با گام حرکتی 0.5 درجه فاصله‌یاب لیزری یک خط از محیط اسکن می‌کند. داده‌های اسکن شده با استفاده از نتایج کالیبراسیون خارجی دوربین وبکم و فاصله‌یاب به مختصات دوربین وبکم نگاشت داده شده و رنگ هر نقطه از تصویر حاصل از وبکم، استخراج می‌شود.

موقعیت بازوی ربات با استفاده از جسم هدف نصب شده بر روی آن مشخص است. با نگاشت داده‌های اسکن شده به مختصات جسم صلب هدف با نتایج کالیبراسیون سیستم استریو داده‌ها به مختصات جهانی نگاشت داده می‌شوند. شکل (1) مراحل بازسازی سه‌بعدی تک خط از صحنه را نمایش می‌دهد.



شکل 1: مراحل بازسازی تک خط از صحنه

⁸ Xtion Pro

⁹ Henry

¹⁰ Endres

4. مفاهیم پایه

در این بخش به نحوه ادغام داده‌های فاصله استخراج شده از فاصله‌یاب لیزری و بافت نقاط استخراج شده از دوربین و بیان داده‌ها در دستگاه مختصات جهانی پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا دوربین‌های موقعیت‌یابی و دوربین وبکم متصل به مجری نهایی ربات کالیبره می‌شوند. پس از کالیبره کردن دوربین‌ها از پارامترهای خارجی و داخلی دوربین وبکم جهت کالیبراسیون دوربین به فاصله‌یاب استفاده می‌شود. با کالیبراسیون دوربین به فاصله‌یاب می‌توان تک تک نقاط اسکن شده از محیط توسط فاصله‌یاب را در دستگاه مختصات دوربین بیان کرده و رنگ متناسب با آن نقطه استخراج شود. در ادامه با استفاده از دوربین‌های موقعیت‌یاب موجود در صحنه و کالیبراسیون دوربین وبکم به پلتفرم جسم صلب متصل به بازو داده‌های بافت‌دار استخراج شده از محیط در مختصات جهانی ثبت و رسم می‌شوند.

1-4- کالیبراسیون دوربین‌ها

بخش کالیبراسیون دوربین، یکی از بخش‌های مهم در بینایی سه‌بعدی کامپیوتری جهت به دست آوردن اطلاعات متریک از تصاویر دوبعدی است. منظور از کالیبراسیون دوربین، به دست آوردن پارامترهای داخلی و خارجی دوربین است. در این تحقیق، از روش کالیبراسیون با اجسام دوبعدی جهت کالیبره کردن دوربین استفاده شده است. کالیبراسیون با استفاده از اجسام دوبعدی با ابعاد مشخص، توسط ژانگ ۱۱ ارائه شد [18]. در این روش لازم است که از الگوی کالیبراسیون، حداقل در سه حالت مختلف عکس گرفته شود و سپس کالیبراسیون به کمک تصاویر گرفته شده، انجام شود. منظور از الگوی کالیبراسیون، جسم با ابعاد مشخص مانند صفحه شطرنجی است. الگوی مورد استفاده برای کالیبراسیون، صفحه شطرنجی با ابعاد مشخص است که از 10 مربع به صورت افقی و 10 مربع به صورت عمودی تشکیل شده است. هر مربع روی این صفحه دارای ابعاد 10 سانتی‌متر در 10 سانتی‌متر است.

در این تحقیق از 19 تصویر در حالت‌های مختلف جهت کالیبره کردن وبکم متصل به بازوی ربات استفاده شده است. این عمل جهت کالیبره کردن دوربین‌های موقعیت‌یاب نیز تکرار شد و در نهایت ماتریس پارامتر ذاتی هر دوربین (K)، پارامترهای اعوجاج دوربین‌ها، موقعیت دوربین‌های استریو به یکدیگر و موقعیت و دوران صفحه کالیبراسیون به وبکم استخراج شد.

2-4. کالیبراسیون خارجی دوربین به فاصله‌یاب لیزری

لازمه‌ی نگاشت نقاط اسکن شده از محیط به دستگاه مختصات دوربین متصل به بازو کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب لیزری دوبعدی است. در فرآیند کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب ماتریس دوران و بردار انتقال دوربین به فاصله‌یاب لیزری استخراج می‌شود. با استفاده از این پارامترها هر نقطه‌ی اسکن شده از محیط توسط فاصله‌یاب در مختصات دوربین بیان شده و رنگ متناظر با نقطه‌ی اسکن شده از تصویر گرفته شده توسط دوربین، استخراج می‌شود.

1-2-4. کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب لیزری با روش پلس و ژانگ

پلس و ژانگ در سال 2003 روشی را جهت کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب لیزری ارائه دادند [19]. تکنیک ارائه شده، نیازمند این است که صفحه کالیبراسیون در حالت‌های مختلف، قابل مشاهده برای دوربین و فاصله‌یاب باشد و داده‌ها به صورت همزمان توسط دوربین و فاصله‌یاب لیزری از صفحه کالیبراسیون گرفته شود. با استفاده از تصویر و اسکن گرفته شده از صفحه کالیبراسیون، جهت و موقعیت دوربین و فاصله‌یاب نسبت به هم با استفاده از یک روش خطی محاسبه شده است. این موقعیت و جهت به دست آمده، به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای اضافی برای دوران دقیق نیست؛ بنابراین با بهینه‌سازی غیرخطی، موقعیت و جهت دقیق محاسبه می‌شود. بستر مورد استفاده توسط پلس در شکل (2) نمایش داده شده است. در این بستر، حسگر فاصله‌یاب لیزری و دوربین جهت اسکن محیط بر روی ربات متحرک قرار گرفته‌اند.

¹¹ Zhang



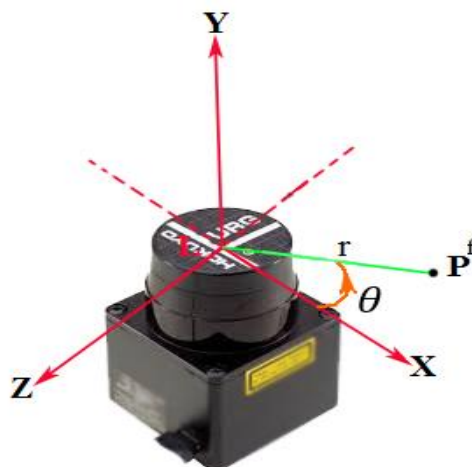
شکل 2: دوربین و فاصله‌یاب لیزری نصب شده بر روی ربات متحرک [19]

2-2-4. معادلات پایه جهت کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب

رابطه‌ی بین مختصات یک نقطه در دستگاه مختصات صفحه $(P_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T)$ و مختصات آن در دستگاه دوربین $(P = [X \ Y \ Z]^T)$ با توجه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = RP_w + t \quad (1)$$

در در رابطه (1)، R ماتریس 3 در 3 دوران و t بردار انتقال دوربین است. اندازه‌گیری‌های فاصله‌یاب لیزری، در صفحه‌ی XZ دستگاه مختصات متصل به آن قرار دارند. مختصات هر نقطه‌ی اندازه‌گیری شده در دستگاه متصل به فاصله‌یاب به صورت $p^f = [x, 0, z]^T$ قابل بیان است. دستگاه مختصات فاصله‌یاب، در شکل (3-6) نمایش داده شده است.

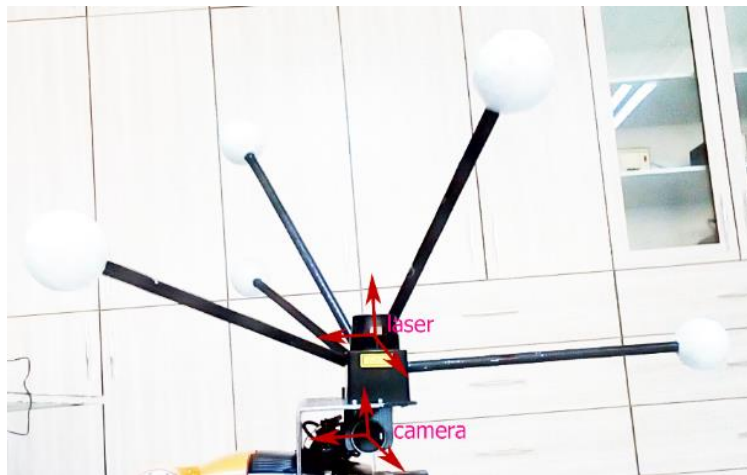


شکل 3: دستگاه مختصات فاصله‌یاب لیزری

در شکل (3)، P^f نقطه‌ای در فضا، اسکن شده توسط فاصله‌یاب، r فاصله‌ی P^f تا دستگاه فاصله‌یاب لیزری و θ زاویه‌ی اندازه‌گیری است. هر نقطه‌ی P بر روی صفحه کالیبراسیون در مختصات دوربین را با استفاده از رابطه (2) در دستگاه مختصات فاصله‌یاب لیزری می‌توان بیان کرد [19]:

$$P^f = \phi P + \Delta \quad (2)$$

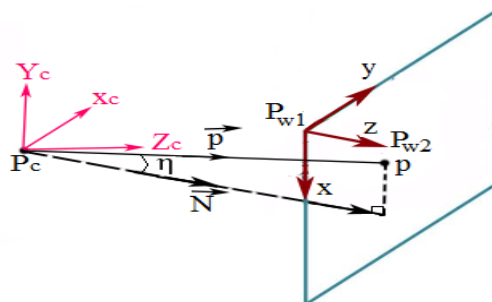
در رابطه (2)، ϕ یک ماتریس 3 در 3 نشان دهنده‌ی جهت و Δ بردار موقعیت دوربین نسبت به فاصله‌یاب لیزری است. با کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب لیزری، پارامترهای موقعیت و جهت دوربین، نسبت به فاصله‌یاب قابل محاسبه است. شکل (4) قرار گیری دوربین نسبت به فاصله‌یاب بر روی بازوی ربات کوکا نمایش داده شده است.



شکل 4: دوربین و فاصله‌یاب لیزری بر روی مفصل 5 بازو

3-2-4. پیدا کردن رابطه بین حالت‌های مختلف صفحه و نقاط فاصله‌یاب

صفحه‌ی کالیبراسیون، صفحه‌ای با $z=0$ در نظر گرفته می‌شود. این صفحه در مختصات دوربین با استفاده از بردار N قابل بیان است. این بردار موازی با نرمال صفحه بوده و اندازه‌ی آن $\|N\|$ با فاصله‌ی دوربین از صفحه کالیبراسیون برابر است. بردار نرمال صفحه (بردار Z در شکل (5))، برداری در نظر گرفته می‌شود که از دو نقطه‌ی $Pw1$ و $Pw2$ در مختصات صفحه می‌گذرد.



شکل 5: نمایش فاصله صفحه‌ی الگو تا دوربین در دستگاه مختصات دوربین

با توجه به بردار نرمال صفحه جهت بردار صفحه (N) بیان می‌شود. همچنین با پیدا کردن معادله صفحه کالیبراسیون در دستگاه مختصات دوربین می‌توان فاصله‌ی دوربین تا هر حالت صفحه کالیبراسیون را پیدا کرد با توجه به اینکه بردار صفحه کالیبراسیون موازی با بردار نرمال صفحه بوده و اندازه‌ی آن نیز با فاصله‌ی دوربین تا صفحه برابر است، این بردار به صورت رابطه‌ی (3) تعریف می‌شود [19]:

$$N = R_3 (R_3^T t) \quad (3)$$

هر نقطه (P^f) در دستگاه مختصات لیزر را می‌توان با استفاده از رابطه (4) در دستگاه مختصات دوربین نوشت [19]:

$$P_c = \phi^{-1} (P^f - \Delta) \quad (4)$$

با توجه به نگاشت هر نقطه در دستگاه مختصات لیدار به دستگاه مختصات دوربین (معادله (4))، رابطه بین بردار صفحه کالیبراسیون و نقاط لیزر طبق معادله‌ی (5) تعریف می‌شود [19]:

$$N \cdot \phi^{-1} (P^f - \Delta) = N^2 \quad (5)$$

4-2-4. بهینه‌سازی پارامترهای موقعیت و جهت فاصله‌یاب به دوربین

پس از به دست آوردن پارامتر صفحه، با استفاده از یک حل خطی، پارامترهای دوران (ϕ) و انتقال (Δ) محاسبه می‌شوند. پارامترهای به دست آمده به عنوان شرایط اولیه جهت بهینه‌سازی غیرخطی در نظر گرفته شده و در نهایت پارامترهای بهینه‌ی موقعیت و جهت دوربین نسبت به حسگر فاصله‌یاب لیزری با حل مسأله بهینه‌سازی (6) به دست می‌آیند.

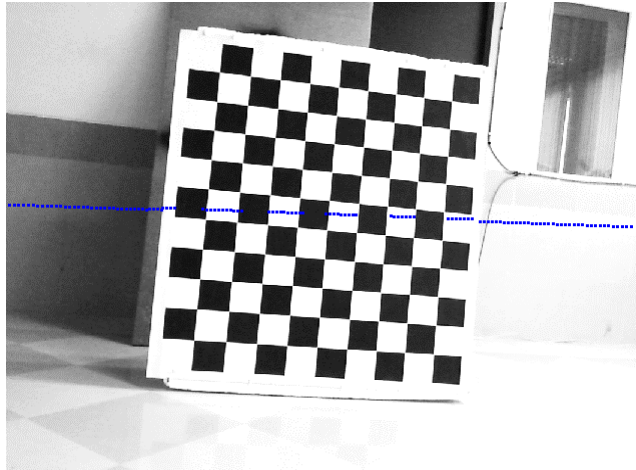
$$[\Delta \quad \phi] = \min_{\Delta^*, \phi^*} \sum_i \sum_j \left(\frac{N_i}{\|N_i\|} (\phi^{*-1} (P_{ij}^f - \Delta^*)) - \|N_i\| \right)^2 \quad (6)$$

در رابطه (6)، N_i پارامتر صفحه کالیبراسیون، در حالت i -ام، P_{ij}^f نقطه‌ی j -ام اسکن شده از صفحه کالیبراسیون در حالت i -ام قرارگیری صفحه کالیبراسیون است.

جهت بهینه کردن رابطه (6)، از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی لوبنبرگ مارکوارد، استفاده می‌شود. با داشتن جهت و موقعیت دوربین به فاصله‌یاب، بافت متناظر با هر نقطه اسکن شده در دستگاه مختصات فاصله‌یاب را می‌توان در تصویر متناظر گرفته شده از محیط توسط دوربین وبکم با استفاده از رابطه‌ی (7) استخراج کرد.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

با نرمال‌سازی رابطه (7)، یعنی تقسیم کردن تمامی روابط را بر سطر سوم معادله $(\frac{v}{w}, \frac{u}{w})$ ، مختصات پیکسلی بافت نقطه اسکن شده توسط فاصله‌یاب در تصویر محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از نگاشت نقاط اسکن شده از محیط به تصویر با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون دوربین و پارامترهای کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب در شکل (4) نمایش داده شده است. در رابطه‌ی (7)، K ماتریس پارامترهای داخلی دوربین و X_c, Y_c, Z_c نقاط در مختصات دوربین هستند.



شکل 6: نگاشت نقاط فاصله یاب لیزری به تصویر

جهت به چالش کشیدن دقت روش کالیبراسیون خارجی دوربین و لیزر استفاده شده در این تحقیق، از امکان کاهش حساسیت فاصله یاب لیزری استفاده شد. فاصله یاب لیزری این امکان را دارد، که در دو مد حساسیت بالا و پایین کار کند.

5. سیستم موقعیت یابی مجری نهایی ربات

از آنجایی که ربات در محیط حرکت می کند و فاصله یاب لیزری و وبکم بر روی مجری نهایی ربات نصب شده اند، بنابراین موقعیت یابی مجری نهایی ربات از اهمیت ویژه ای برخوردار است. جهت موقعیت یابی مجری نهایی ربات در محیط از موقعیت یابی یک جسم با ابعاد مشخص با استفاده از سیستم استریو استفاده شده است. جسم با ابعاد مشخص متصل به بازوی ربات دارای 5 گوی درخشان با موقعیت معلوم هر گوی نسبت به دستگاه متصل به جسم است. به بستر استفاده شده جهت موقعیت یابی مجری نهایی ربات را در ادامه بستر موقعیت یابی گفته می شود. بستر موقعیت یابی به همراه فاصله یاب لیزری و وبکم در شکل (7) نمایش داده شده است.



شکل 7: بستر موقعیت یابی با 5 گوی درخشان

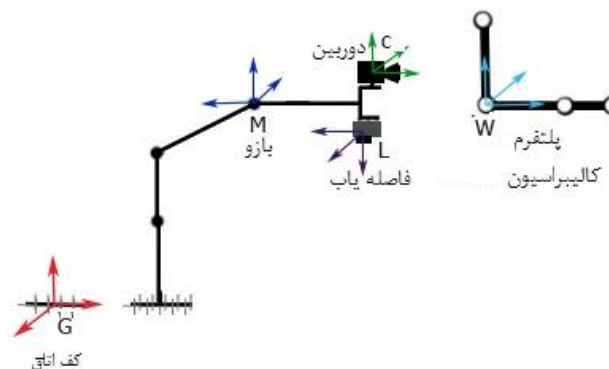
موقعیت سه‌بعدی 5 نقطه بر روی بستر موقعیت‌یابی، نسبت به دستگاه مختصات متصل به آن مشخص است. با استفاده از موقعیت‌یابی یک نقطه در فضای سه‌بعدی با استفاده از سیستم استریو موقعیت این نقاط در دستگاه مختصات مرجع مشخص است. با استفاده از معلوم بودن موقعیت نقاط در دو دستگاه، دوران و انتقال دستگاه مختصات بستر موقعیت‌یابی به دستگاه مختصات مرجع محاسبه می‌شود. روش استفاده شده در این تحقیق شبیه روش ارائه شده در [20] است. سیستم استریو موقعیت‌یابی، از دو دوربین صنعتی شرکت باسلر با سرعت 50 فریم بر ثانیه تشکیل شده است. این دو دوربین، در اتاق به نحوی نصب شده‌اند که در تمام نقاط اتاق بتوانند حداقل 3 گوی از 5 گوی متصل شده بر روی ربات را مشاهده کنند. شکل (8) محل نصب دوربین‌ها در محیط آزمایشگاه را نمایش می‌دهد.



شکل 8: محل نصب دوربین‌های موقعیت‌یابی

6. کالیبره کردن دوربین و بکم به بستر موقعیت‌یابی

هدف از این بخش، محاسبه‌ی دوران و انتقال دستگاه مختصات دوربین به دستگاه مختصات جسم صلب نصب شده روی بازو است. شکل (9) طرح شماتیک کالیبراسیون را نشان می‌دهد.



شکل 9: شماتیک بستر مورد استفاده جهت کالیبراسیون دوربین به بازو

در شکل (9)، دستگاه مختصات کف اتاق (G) به‌عنوان دستگاه مختصات مرجع در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از سیستم ردیابی می‌توان هر نقطه‌ی سه‌بعدی (P_M)، در دستگاه مختصات بازو (M) و یا هر نقطه‌ی سه‌بعدی (P_W) در دستگاه مختصات

هدف (W) را در دستگاه مختصات مرجع بیان کرد. همچنین با استفاده از دستور Solve pnp در کتابخانه‌ی متن‌باز opencv یا با استفاده از متد POSIT در کتابخانه‌ی متن‌باز Aforge، می‌توان هر نقطه (P_W) در دستگاه مختصات هدف (W) را در دستگاه مختصات دوربین (C) بیان کرد. با استفاده از روش کالیبراسیون ارائه شده توسط پلس، دوران و انتقال دوربین نسبت به فاصله‌یاب لیزری محاسبه شده است. بنابراین با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی موجود در محیط و موقعیت‌یابی جسم با ابعاد مشخص با استفاده از یک دوربین در opencv می‌توان نوشت:

$$P_G = R_W^G P_W + T_W^G \quad (8)$$

$$P_C = R_W^C P_W + T_W^C \quad (9)$$

$$P_M = R_W^M P_W + T_W^M \quad (10)$$

$$P_G = R_M^G P_M + T_M^G \quad (11)$$

در روابط بالا منظور از R_W^G دوران هدف نسبت به کف اتاق، R_W^C دوران هدف به دوربین، R_W^M دوران هدف به مفصل 5 بازو و R_M^G دوران بازو به کف اتاق است. این نام‌گذاری برای بردار انتقال T از یک دستگاه مختصات به دستگاه مختصات دیگر نیز صادق است. همچنین منظور از P_G یک نقطه‌ی سه‌بعدی در مختصات جهانی، P_C نقطه‌ای در فضای سه‌بعدی در مختصات دوربین، P_M نقطه‌ای در مختصات بازو و P_L یا P^f نقطه‌ای در مختصات لیزر است. با ترکیب معادلات (8) تا (10) هر نقطه‌ی P_C در دستگاه مختصات دوربین را می‌توان در دستگاه مختصات بازو ربات به صورت P_M بیان کرد

$$P_M = R_M^{GT} R_W^G R_W^{CT} P_C + \quad (12)$$

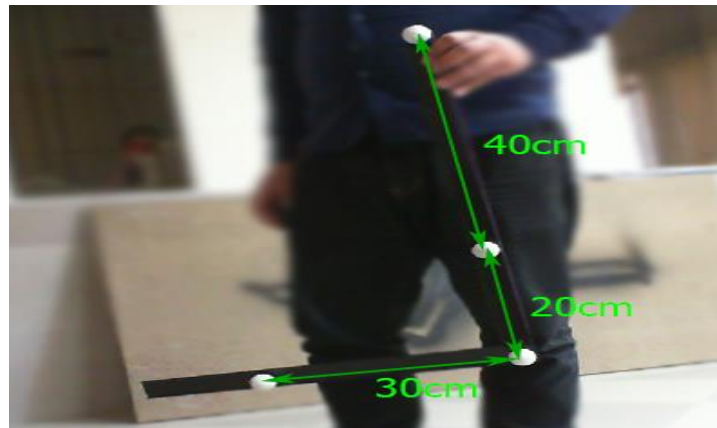
$$R_M^{GT} (T_W^G - T_M^G - R_W^G R_W^{CT} T_W^C)$$

از رابطه (12)، دوران و انتقال دوربین به بازو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R_C^M = R_M^{GT} R_W^G R_W^{CT} \quad (13)$$

$$T_C^M = R_M^{GT} (T_W^G - T_M^G - R_W^G R_W^{CT} T_W^C) \quad (14)$$

با توجه به اینکه دوربین و فاصله‌یاب لیزری بر روی بازو نصب شده و دستگاه مختصات دوربین و بازو نسبت به هم ثابت است، بنابراین دوران و انتقال دوربین به بازو ثابت بوده و با استفاده از کالیبراسیون تشریح شده در بخش‌های گذشته محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه می‌توان هر نقطه در مختصات بازو را در مختصات مرجع بیان کرد. در این تحقیق، از یک جسم L شکل که چهار نشانگر درخشان با فاصله‌های نمایش داده شده در شکل (10)، بر روی آن قرار گرفته است جهت کالیبراسیون دوربین و یکم به پلتفرم موقعیت‌یابی استفاده می‌شود. در این روش کالیبراسیون با توجه به توضیحات یک‌بار در حضور جسم کالیبراسیون صورت پذیرفته و از نتایج آن در نقشه‌برداری سه‌بعدی استفاده می‌شود.



شکل 10: جسم کالیبراسیون و یکم به بستر موقعیت‌یابی

7. رسم داده در دستگاه مختصات اتاق

وابسته بودن داده‌های سه‌بعدی به دستگاه مختصات ربات، نقشه‌ی سه‌بعدی ارائه شده را به حرکت ربات وابسته می‌سازد. جهت رفع این مشکل، یک نقطه از اتاق به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود و داده‌های سه‌بعدی ربات در مختصات مرجع بیان شده و رسم می‌شوند. جهت انتخاب یک نقطه مرجع در اتاق در هنگام کالیبره کردن دو دوربین ثابت موقعیت‌یابی، یک بار صفحه‌ی کالیبراسیون را در کف اتاق قرار داده و با استفاده از پارامترهای داخلی معلوم دوربین، دوران و انتقال دستگاه متصل به صفحه را به دوربین مرجع به دست آورده و هر بار بعد از محاسبه‌ی وضعیت ربات، این وضعیت با استفاده از دوران و انتقال یافته شده در مختصات صفحه شطرنجی بیان می‌شود. به دست آوردن دوران و انتقال دوربین به فاصله‌یاب یک بار با استفاده از صفحه انجام شده و صفحه از محیط برداشته می‌شود. از این بعد منظور از نقشه‌ی سه‌بعدی، نقشه سه‌بعدی همراه با بافت (بازسازی سه‌بعدی محیط) در مختصات اتاق خواهد بود.

8. بازسازی سه‌بعدی

نقشه‌برداری سه‌بعدی از محیط یا در اصطلاح بازسازی سه‌بعدی محیط به دو گروه بازسازی بدون بافت و بازسازی همراه با بافت تقسیم می‌شود. در این تحقیق نحوه انجام هر دو روش تشریح می‌شود. در بازسازی بدون بافت از اطلاعات دوربین هیچ استفاده‌ای نشده بلکه بازسازی تنها با استفاده از فاصله‌یاب لیزری انجام گرفته است.

8-1. بازسازی سه‌بعدی بدون بافت

برای ایجاد نقشه سه‌بعدی محیط، از یک بستر ربات کوچک برای ایجاد دوران لیزر و از یک لیزر دوبعدی برای اسکن دوبعدی محیط استفاده شده است. نقاط اسکن شده با دوران‌های مختلف ربات و زاویه‌های اسکن، در یک ماتریس به صورت

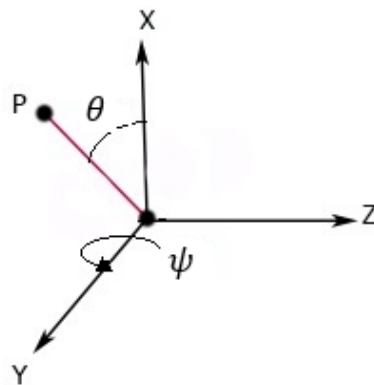
$[r_i \quad \theta_i \quad \psi_i]$ ذخیره شده و با توجه به شکل (11) با استفاده از رابطه‌های (15) تا (17) به مختصات دکارتی تبدیل و

اطلاعات در مختصات دکارتی رسم شده است (ψ_i زاویه دوران بازوی ربات است).

$$X_i = r_i \cos \theta_i \cos \psi_i \quad (15)$$

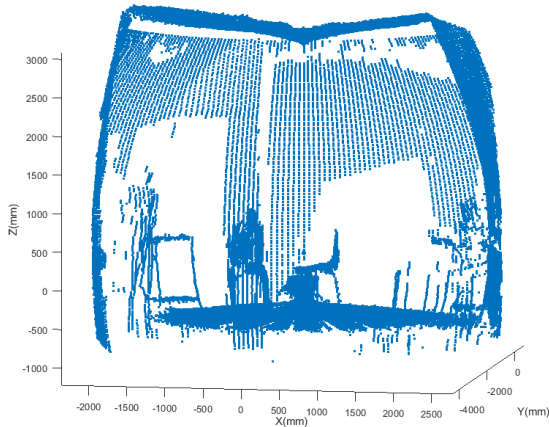
$$Y_i = -r_i \cos \theta_i \sin \psi_i \quad (16)$$

$$Z_i = -r_i \sin \theta_i \quad (17)$$



شکل 11: تبدیل داده‌های لیدار از مختصات کروی به مختصات دکارتی

در روابط بالا $[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ مختصات دکارتی نقاط اسکن شده توسط فاصله‌یاب، θ_i زاویه‌ی i -ام اسکن فاصله‌یاب و r_i فاصله‌ی اندازه‌گیری شده در اسکن i -ام فاصله‌یاب است. شکل (12) نمونه‌ای از نقشه‌ی ایجاد شده با استفاده از این روش که با صحنه‌ی واقعی مقایسه شده است، را نمایش می‌دهد.



ب



الف

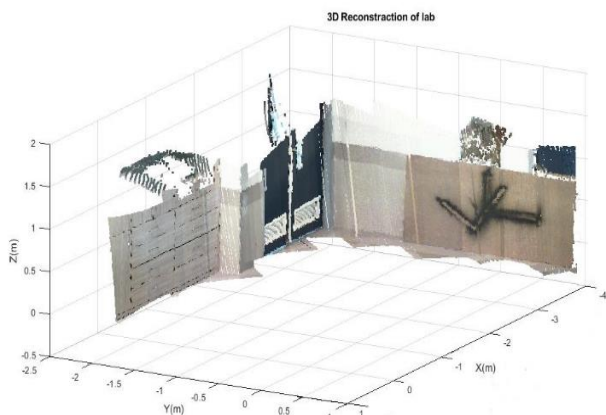
شکل 12: الف- تصویر صحنه‌ی اسکن شده، ب- نقشه‌ی سه‌بعدی ایجاد شده از همان صحنه [21]

2-8. بازسازی سه‌بعدی محیط همراه با بافت

مهم‌ترین بخش در بازسازی سه‌بعدی همراه با بافت، این است که در تصویر تهیه شده از محیط، عمق تک تک پیکسل‌ها را داشته باشیم. با کالیبراسیون دوربین و لیزر می‌توان تک تک نقاط لیزر (نقاط اندازه‌گیری شده در مختصات فاصله‌یاب لیزری) را به مختصات دوربین با رابطه (4) تبدیل کرد.

سپس تنها کافی است که نقاط در مختصات دوربین را به مختصات تصویر تبدیل کرده و مقادیر رنگی پیکسل متناظر را به عنوان بافت نقطه سه‌بعدی در نظر بگیریم و نقاط در دستگاه مختصات دوربین را به دستگاه مختصات جهانی تبدیل کرده و داده‌های سه‌بعدی همراه با بافت را رسم کنیم.

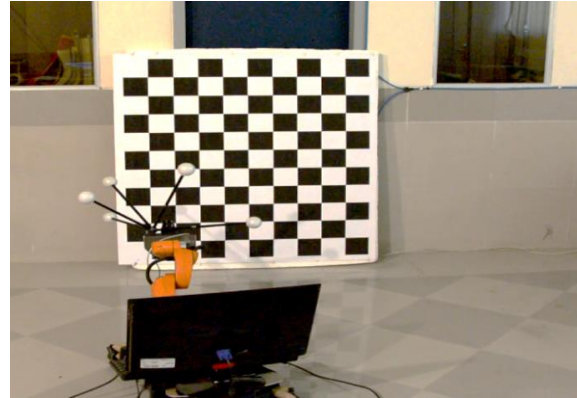
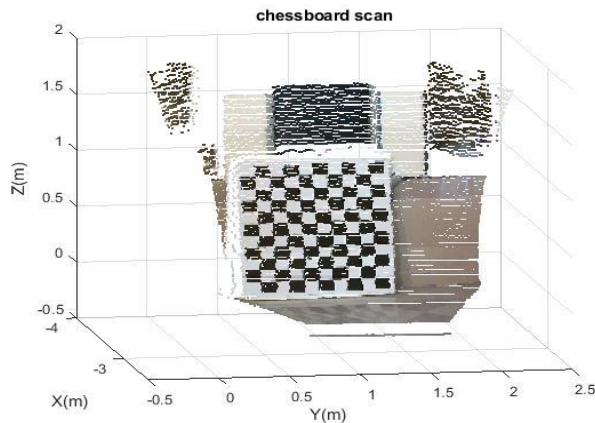
در این تحقیق، محیط مورد نظر جهت بازسازی سه‌بعدی آزمایشگاه رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود است. موقعیت‌یابی ربات در محیط با استفاده از دو دوربین ثابت متصل شده در اتاق انجام می‌پذیرد.



ب



الف



پ

ت

شکل 13: الف و پ- محیط واقعی و موقعیت قرار گیری ربات، ب و ت: اسکن سه بعدی ایجاد شده از محیط

9. مقایسه روش‌ها

در روش پیشنهادی از ترکیب اطلاعات دو بعدی و سه بعدی جهت ایجاد بازسازی سه بعدی استفاده شده است، به همین منظور برای نمایش جایگاه تحقیق صورت گرفته در جدول (1) انواع روش‌های بازسازی سه بعدی مقایسه شده است.

جدول 1: مقایسه روش‌های بازسازی سه بعدی

ردیف	الگوریتم / پلتفرم	شرح مختصر	مزایا	معایب
1	<i>SLAM & SFM[6]</i>	تخمین موقعیت دوربین همزمان با ایجاد نقشه	قیمت پایین، آنی بودن ردیابی دوربین و نقشه برداری	تولید نقشه‌های پراکنده، بار محاسباتی بالا، چالش پیدا کردن نقاط متناظر و وجود خطای تجمعی ردیابی دوربین و مسئله یافتن نقاط ویژه گی مناسب
2	<i>Kinect fusion</i>	استفاده از تصویر عمق کینکت جهت ایجاد نقشه و موقعیت یابی دوربین	قیمت پایین، آنی بودن، استفاده از واکسل‌ها، نقشه مترکم	بار محاسباتی بالا به دلیل استفاده از تصویر عمق، وجود خطای تجمعی ردیابی دوربین
3	<i>RGBD SLAM[14]</i>	استفاده از داده ای عمق و تصاویر دوربین عمقی	افزایش دقت ردیابی دوربین در محیط و ایجاد یک نقشه مترکم از محیط	بار محاسباتی بالا، حذف برخی فریم‌های دوربین، وجود خطای تجمعی در ردیابی دوربین، مسئله تناظر یابی
4	<i>2D image and 3d lidar data fusion</i>	ترکیب داده های سه بعدی لیدار و تصاویر دو بعدی	دقت بالا، وجود بافت، سادگی دیافت اطلاعات	پراکندگی نقشه، رزولیشن پایین، تک صحنه بودن، نویز پذیری
5	<i>Automatic 2D/3DToF Image Fusion</i>	ترکیب داده‌های دوبعدی دوربین زمان پرواز و تصاویر دوربین دیجیتال	هزینه راه اندازی پایین، عملکردی کاملا منطقی	نویز مربوط به اندازه‌گیری، تک صحنه بودن
6	روش مقاله	استفاده از سیستم موقعیت یابی مبتنی بر استریو ویژن و ترکیب داده های لیدار و وبکم	بالاترین دقت ردیابی دوربین، ایجاد نقشه مترکم، عدم وجود خطای تجمعی ردیابی دوربین، ایجاد نقشه دقیق با بهره گیری از فاصله یاب دقیق، استفاده از ربات در محیط برای انجام فعالیت‌های خاص	نیاز به کالیبراسیون در محیط جدید، نیاز به مطالعه بیشتر در محیط‌های خارجی

در جدول (1) مزایا و معایب انواع مختلف روش‌های بازسازی سه بعدی نمایش داده شده است، در روش‌های مبتنی بر فتوگرافی نقشه‌های تولیدی پراکنده، بار محاسباتی بسیار بالا و خطای تجمعی ردیابی دوربین از معایب این روش‌ها هستند، برای رفع این

معایب محققین از دوربین های زمان پرواز و لیدار استفاده کردند، دوربین های زمان پرواز و لیدارهای سه بعدی از قیمت بسیار بالایی برخوردار بودند، همچنان مشکل خطای تجمعی ناشی از خود مکانیابی و عدم وجود بافت را در بر داشتند نیاز به وجود بافت موجب ایجاد سیستم هایی شد که علاوه بر ابرنقاط از تصاویر جهت ایجاد بافت مناسب بهره می بردند. استفاده از تصاویر کمک بسیار زیادی در خود مکانیابی دوربین ایفا کردند و خطای تجمعی خود مکانیابی بسیار کاهش یافت، ولی همچنان در فریم های آخر اسکن این خطا به وضوح قابل مشاهده بود، در روش ارائه شده در این مقاله با استفاده از سیستم مکانیابی استریو خطای تجمعی مکانیابی سیستم از بین رفته و وجود ربات کوکا در محیط می تواند عاملی باشد که پس اسکن محیط توسط ربات و مشخص شدن موقعیت تک تک المان ها در صحنه از ربات جهت وظایفی خاص استفاده کرد. قیمت سیستم ارائه شده نسبت به لیدارهای اسکن سه بعدی محیط بسیار پایین بوده و محرک بودن سیستم یک مزیت مهم نسبت به سایر سیستم ها است.

10. آنالیز و تحلیل خطای سیستم

ارزیابی خطای سیستم از اسکن یک صفحه با ابعاد مشخص و مقایسه آن با معادله تخمین زده شده از صفحه در فضا صورت گرفت.

باید در نظر داشت n نقطه از فضا توسط فاصله یاب لیزری در محدوده ی صفحه ی مورد جستجو استخراج شده است و مطابق توضیحات داده شده مختصات این نقاط به صورت $[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ نگاشت یافته است. معادله صفحه در فضای سه بعدی به صورت معادله (18) در نظر گرفته شده است.

$$X = uY + vZ + w \quad (18)$$

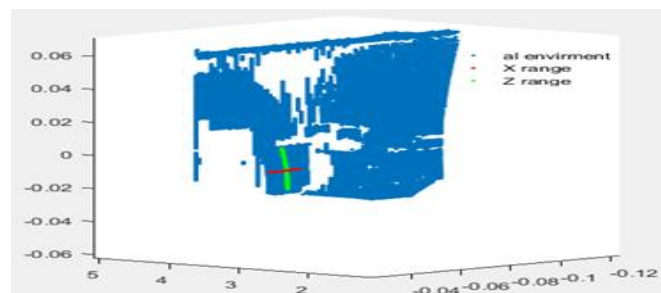
برای به دست آوردن محدوده صفحه مورد جستجو، یک نقطه از صفحه مورد نیاز است. از این نقطه در راستاهای عمودی و افقی تفاضل گیری می شود تا لبه های صفحه مورد جستجو به دست آید؛ سپس تمام نقاط در محدوده به دست آمده برای پیدا کردن معادله صفحه استخراج می شود (شکل 14). با در نظر گرفتن رابطه ی (18) برای تمام n نقطه روی صفحه طبق رابطه ی (19) می توان رابطه ی پارامترهای صفحه (u, v, w) را با مختصات نقاط روی صفحه به صورت زیر بیان کرد.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}}_{\Gamma} = \underbrace{\begin{pmatrix} Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & Z_n & 1 \end{pmatrix}}_H \underbrace{\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}}_{\eta} \quad (19)$$

برای تخمین پارامترهای صفحه (η) از روش حداقل مربعات طبق رابطه ی (20) استفاده شده است.

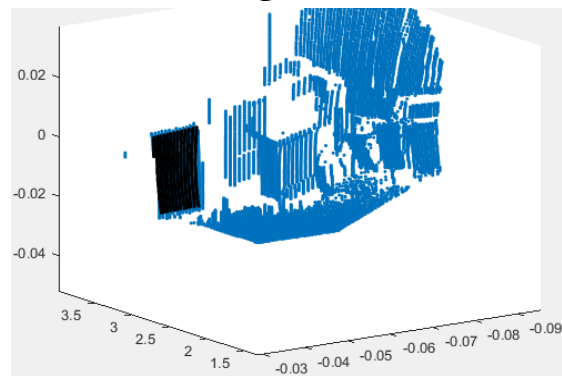
$$\eta = (H^T H)^{-1} H^T \Gamma \quad (20)$$

شکل (14) محدوده ی عمودی و افقی محاسبه شده برای صفحه ی موجود در صحنه را نشان می دهد.



شکل 14: محدوده عمودی و افقی صفحه

شکل (14) نتایج حاصل از تشخیص محدوده و شکل (15) برازش صفحه با استفاده از پارامتر η به دست آمده از روش حداقل مربعات را نمایش می‌دهد. این روش دارای میانگین خطای 1.3 میلی‌متر و بیشینه خطای 8.4 میلی‌متر است.



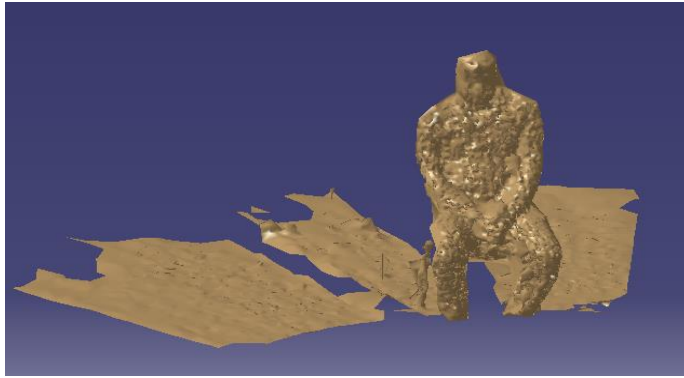
شکل 15: نقاط سیاه، صفحه‌ی برازش شده با روش حداقل مربعات

11. نتیجه گیری

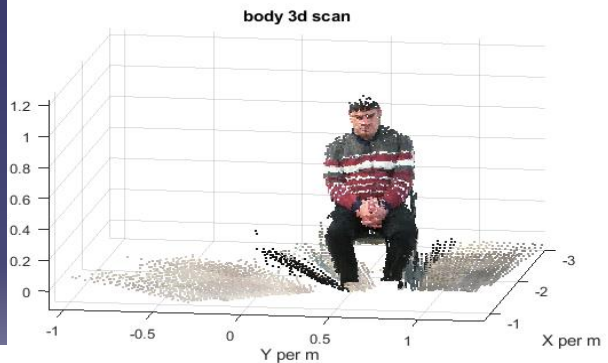
در این تحقیق نحوه کالیبراسیون تجهیزات مختلف نسبت به یکدیگر از طریق تکنیک‌های بینایی ماشین و ایجاد نقشه سه‌بعدی بدون بافت و بافت دار از محیط تشریح شد.

روش پیشنهادی، روشی جدید جهت بازسازی محیط‌های داخلی و اشیاء دارای ابعاد بزرگ با استفاده از فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و دوربین نصب شده بر روی بازوی ربات متحرک کوکا است. در الگوریتم‌های مانند ICP از هم‌پوشانی دو فریم پشت سر هم جهت تخمین موقعیت ربات استفاده می‌شود. در صورت وجود خطا در تخمین موقعیت اولیه ربات، این خطا در هر مرحله با خطای مراحل قبل جمع شده و موجب ایجاد خطا در نقشه برداری از محیط می‌شود. در سیستم پیشنهادی به دلیل استفاده از سیستم موقعیت‌یابی استریو مستقل از ربات، نقشه برداری فاقد خطای تجمعی ناشی از خودمکان‌یابی است. بنابراین نقشه‌ی ایجاد شده دارای دقت بسیار مناسب نسبت به سایر روش‌ها است. همچنین با انجام آزمایش‌هایی مشخص شد که در سیستم پیشنهادی با چند بار اسکن یک صحنه در موقعیت‌های مختلف ربات، گپ‌های بین ابر نقاط دارای رنگ، پر شده و تفکیک‌پذیری نقشه‌ی ایجاد شده افزایش یافته و المان‌های موجود در صحنه را با وضوح بهتری می‌توان نمایش داد. دقت این روش وابسته به دقت فاصله‌یاب لیزری دوبعدی بوده و با انتخاب یک فاصله‌یاب با دقت بالا می‌توان اسکن سه‌بعدی با دقت بسیار بالا از محیط و اشیاء بزرگ ارائه داد. سیستم ارائه شده می‌تواند کاربرد بسیار ویژه‌ای در پایش محیط‌های پر خطر مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، با توجه به ایستاد بودن محیط پایش ربات با نصب سیستم بینایی چندگانه داشته باشد. همچنین در صورت استفاده از یک اسکنر با دقت بالا با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق و مش بندی مدل با استفاده از نرم افزارهای Cad اقدام به ساخت مدل ایجاد شده کرد.

در شکل (15) مدل سه‌بعدی بافت دار و مدل سه‌بعدی مش بندی شده جهت ساخت با پرینتر سه‌بعدی ارائه شده است.



ب



الف

شکل 15: الف-مدل سه بعدی بافت دار از فرد، ب-مدل سه بعدی مش بندی شده از فرد

12. قدردانی

از سرکار خانم عاطفه فضلی که در تمامی مراحل ویرایش این مقاله همراهی کردند نهایت سپاس و قدر دانی را به عمل می آورم.

13. منابع و مراجع

- [1] Olson, Eric S., et al. "Intuitive user interface control for remote catheter navigation and 3D mapping and visualization systems." *U.S. Patent No. 9,888,973*. 13 Feb. 2018.
- [2] J. Jeong, et al. "Multimodal sensor-based semantic 3D mapping for a large-scale environment," *Expert Systems with Applications*, vol. 105, pp. 1–10, 2018.
- [3] E. Kaufman, K. Takami, Z. Ai, "Autonomous Quadrotor 3D Mapping and Exploration Using Exact Occupancy Probabilities," *In 2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing*, pp. 49–55, IEEE, 2018.
- [4] F. Greco, L. Coox, F. Maurin, et al, "Reverse engineering of deep drawn components with an isogeometric framework," *Computers & Structures.*, vol. 201, pp. 15–25, Elsevier, 2018.
- [5] A. W. L. Yao, "Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.26, no.11-12, pp. 1284–1288, 2005.
- [6] K. KHALILI and M. ZERAATKAR, "A Fast and Low-Cost Human Body 3D Scanner Using 100 Cameras," *In journal of imaging*, 2020
- [7] S. M. Emam, S. Khatibi, and K. Khalili, "Improving the Accuracy of Laser Scanning for 3D Model Reconstruction Using Dithering Technique," *Procedia Technol.*, vol. 12, no. March 2015, pp. 353–358, 2014.
- [8] Hiebert-Treuer, Bradley, *An introduction to robot slam (simultaneous localization and mapping)*. Bachelor's Theses, Middlebury College, Middlebury, VT, USA. 2007.
- [9] H. Surmann, & etal, "An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments," *Robotics and Autonomous Systems.*, vol. 45, no. 3–4, pp. 181–198, 2003.
- [10] M. Bosse, R. Zlot, "Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser," *In 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4312–4319, IEEE, 2009.
- [11] C. Fruh, A. Z. P. Recognition, "3D model generation for cities using aerial photographs and ground level laser scans," *in Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, vol. 2, pp. II-II. IEEE, 2001.
- [12] D. Roca, J. Martínez-Sánchez, et al, "Novel Aerial 3D Mapping System Based on UAV Platforms and 2D Laser Scanners," *Journal of Sensors*, vol. 2016, Hindawi, 2016.
- [13] Ylimäki, M., Heikkilä, J., & Kannala. "Accurate 3-D Reconstruction with RGB-D Cameras using Depth Map Fusion and Pose Refinement." *In IEE 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, pp. 1977-1982, IEEE, 2018.
- [14] May, Stefan, et al. "Three-dimensional mapping with time-of-flight cameras." *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. 11-12, pp. 934-965, Wiley Online Library, 2009.
- [15] S. Izadi & et al, "KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera," *in Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 559–568, 2011.
- [16] Henry, Peter & et al, "RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments," *in Experimental Robotics*, pp. 477–491, Springer, 2010.
- [17] F.Endres and et al "An evaluation of the RGB-D SLAM system," *in Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference*, pp. 1691–1696, IEEE, 2012.

- [18] T. Hervier, S. Bonnabel, "Accurate 3D maps from depth images and motion sensors via nonlinear Kalman filtering," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference*, pp. 5291–5297, IEEE, 2012.
- [19] C. Guo, S. Roumeliotis, "IMU-RGBD camera extrinsic calibration: Observability analysis and consistency improvement," In *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Karlsruhe, Germany, pp. 2920–2927, IEEE, 2013.
- [20] Zhengyou 正, "Camera calibration with one-dimensional objects," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 892–899, IEEE, 2004.
- [21] Q. Zhang and R. Pless, "Extrinsic calibration of a camera and laser range finder," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 2301–2306, IEEE, 2004.
- [22] نایبی آستانه، امیر حسین، "رادیابی سه‌بعدی اجسام صلب با چند دوربین." کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۱۳۸۶.
- [23] نوری، سعید. علیرضا، احمدی فرد. امیر حسین، نایبی آستانه. "ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی محیط‌های داخلی و پردازش ابر نقاط به دست آمده از فاصله‌یاب لیزری دوبعدی نصب شده روی ربات کوکا"، بیست و هفتمین کنفرانس برق ایران، یزد، ۱۳۹۸.

3D Environment reconstruction Using Optical Sensors Installed on Mobile Robot

Saeed Nouri, Mahdi alimohammadi, Alireza Ahmadifard, Amirhosein Nayeli Astaneh
Shahrood University of Technology, Faculty of Mechanical and Mechatronics
Engineering, Department of Mechatronics, saeednouri73@mihanmail.ir
Transmission and Broadcasting Engineer, Zanjan Broadcasting Center,
mahdielec44@gmail.com
Associate Professor, Shahrood University of Technology, Faculty of Electrical
Engineering, Alireza.ahmadyfard@gmail.com
Associate Professor, Shahrood University of Technology, Faculty of Electrical
Engineering, Am_nayebi@yahoo.com

Abstract— This paper describes three-dimensional geometric and visual modeling of environments and objects on the original scale. The created model can be useful to remote inspection, geometric measurement processes, and reverse engineering. The combination of depth data provided by a two-dimensional laser rangefinder and texture data from a color webcam attached to the Kuka mobile robot arm is a convenient data set for geometric and visual modeling of real environments or objects. Here we propose a method for 3d modeling, in which, a laser range finder data is used to create 3D points, and finally, the texture data (color of scanned points) provided by the camera were mapped on these points. To create such a map, the external calibration of the camera was performed by a laser rangefinder. The 3D depth and texture data extracted from the environment were expressed in a reference coordinate system using a robot 3D model tracker and a textured 3D model was created in the reference coordinate system.

Keywords: 3D mapping, sensor fusing, Kuka mobile robot, 2d laser range finder