

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مکانیک و مکاترونیک، مکاترونیک

رشته‌ی مهندسی مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بازسازی سه‌بعدی محیط با استفاده از سنسورهای نوری نصب

شده بر روی ربات متحرک

نگارنده:

سعید نوری

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا احمدی‌فرد

دکتر امیرحسین نایبی آستانه

دی ۱۳۹۷

تقدیم به فرشتگان مهربان که:

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن و تمام تجربه های بی همتای زندگیم،

مدیون حضور سبز آن هست.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاسگزاری

از اساتید گرامی خود جناب آقای دکتر علیرضا احمدی فرد و جناب آقای دکتر امیر حسین نایبی
آستانه بسیار سپاسگزارم، چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان تهیه این پایان‌نامه بسیار سخت و ناممکن
بود.

تعهدنامه

اینجانب سعید نوری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکترونیک دانشکده مکانیک و

مکترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع بازسازی سه بعدی محیط

با استفاده از سنسورهای نوری نصب شده بر روی ربات متحرک

تحت راهنمایی دکتر علیرضا احمدی فرد و دکتر امیرحسین ناییبی آستانه متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

نقشه‌های محیط‌های خارجی و اطلاعات ناوبری، توسط سیستم‌ها و فناوری‌های مدرن مانند گوگل‌مپ و ناوبری گارمین ارائه می‌شوند و افراد زیادی روزانه از این اطلاعات استفاده می‌کنند. هدف این پایان‌نامه، ارائه سیستم ناوبری مشابه، برای استفاده از محیط‌های داخلی توسط گروه‌های امداد و نجات، مراجعه‌کنندگان و تبلیغ‌کننده‌ها و غیره است. برای تهیه نقشه محیط، نیاز به ثبت اطلاعات مکانی همزمان با روشنایی و رنگ نقاط صحنه است. در این پایان‌نامه، از حسگر فاصله‌یاب دوبعدی لیزری، جهت برداشت عمق و از دوربین رنگی برای استخراج بافت نقاط صحنه استفاده شد. این دو سنسور بر روی بازوی یک ربات متحرک نصب شده‌اند. برای ثبت موقعیت ربات متحرک در صحنه، از دو دوربین ثابت به صورت استریو استفاده شد. ثبت سه‌بعدی نقاط اسکن‌شده توسط فاصله‌یاب همراه با بافت، نیازمند این است که وضعیت دوربین، نسبت به فاصله‌یاب مشخص باشد. کالیبراسیون انجام شده، دوران و موقعیت دوربین را نسبت به فاصله‌یاب ارائه می‌دهد. ماتریس دوران و بردار انتقال سیستم دوربین تعبیه شده بر روی ربات، نسبت به دستگاه فاصله‌یاب لیزری ثابت بوده و در فرآیند کالیبراسیون استخراج می‌شوند. همچنین به کمک سیستم استریو، موقعیت ربات در هر لحظه قابل استخراج است. در سناریو پیشنهادی، ربات در محیط مورد نظر حرکت همراه با چرخش دارد. در این فرآیند، امکان استخراج اطلاعات عمق و رنگ در تمام زاویه‌های صحنه، فراهم می‌شود. با داشتن ماتریس تبدیل دستگاه لیزر به دوربین مرئی و موقعیت ربات در صحنه، اطلاعات عمق و بافت اخذ شده در فضای مرجع سه‌بعدی، قابل ثبت و ترسیم هستند. در روش ارائه شده به دلیل وابسته نبودن موقعیت ربات به اطلاعات سنسورهای متصل به ربات، خطای تجمعی حاصل از خود مکان‌یابی ربات وجود ندارد. در این تحقیق، تفکیک‌پذیری بازسازی سه‌بعدی ایجاد شده از محیط ۰/۳۵ در ۰/۵ درجه است. این تفکیک‌پذیری، با چند بار اسکن محیط تا دو برابر نیز قابل افزایش است. نتایج بیانگر این است که بازسازی ایجاد شده از محیط، از دقت بسیار مناسب برخوردار است.

واژگان کلیدی: بازسازی سه‌بعدی، حسگر فاصله‌یاب دوبعدی لیزری، ابر نقاط، محیط‌های داخلی

فهرست مطالب

۱- فصل اول : کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسأله	۲
۳-۱- مسأله بازسازی سه‌بعدی در بینایی کامپیوتری و رباتیک	۲
۴-۱- کاربرد ربات‌های متحرک در نقشه‌برداری	۳
۵-۱- ضرورت انجام تحقیق	۴
۶-۱- چالش‌های نقشه‌برداری سه‌بعدی	۵
۷-۱- روش تحقیق	۵
۸-۱- ساختار پایان‌نامه	۶
۲- فصل دوم: سابقه بازسازی سه‌بعدی و انواع حسگرها	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- سابقه نقشه‌برداری سه‌بعدی	۸
۳-۲- مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان	۱۰
۴-۲- روش Kineckt fusion	۱۱
۵-۲- مروری بر حسگرهای مورد استفاده در مسأله بازسازی سه‌بعدی	۱۱
۱-۵-۲- حسگرهای برخوردی	۱۲
۲-۵-۲- حسگرهای مادون‌قرمز و نور مرئی	۱۲
۳-۵-۲- حسگرهای صوتی و فراصوتی	۱۳

۱۴.....	۲-۵-۳-۱- اثر داپلر در حسگر التراسونیک
۱۴.....	۲-۵-۴- دوربین‌های زمان پرواز.....
۱۶.....	۲-۵-۵- کینکت.....
۱۶.....	۲-۵-۶- حسگر فاصله‌یاب لیزری.....
۱۷.....	۲-۵-۶-۱- حسگر فاصله‌یاب لیزری دوبعدی.....
۱۷.....	۲-۵-۶-۲- حسگر فاصله‌یاب لیزری سه‌بعدی.....
۱۸.....	۲-۵-۷- سیستم بینایی چندگانه.....
۱۹.....	۲-۵-۸- مزایا و معایب حسگرهای مورد استفاده در نقشه‌برداری سه‌بعدی.....
۲۰.....	۲-۶- نتیجه‌گیری.....
۲۱.....	۳- فصل سوم: تئوری.....
۲۲.....	۳-۱- مقدمه.....
۲۲.....	۳-۲- مدل دوربین.....
۲۲.....	۳-۳- افکنش از مختصات جهانی به مختصات تصویر.....
۲۳.....	۳-۳-۱- اعوجاج لنز.....
۲۴.....	۳-۴- روش‌های کالیبراسیون دوربین.....
۲۴.....	۳-۴-۱- کالیبراسیون با استفاده از اجسام تک‌بعدی.....
۲۵.....	۳-۴-۲- روش‌های کلاسیک.....
۲۶.....	۳-۵- کالیبراسیون دوربین با استفاده از اجسام دوبعدی با ابعاد مشخص.....
۲۶.....	۳-۵-۱- یافتن نقاط متناظر در تصویر با نقاط واقعی.....

- ۳-۵-۲- محاسبه‌ی هموگرافی بین نقاط واقعی و پیکسل متناظر با این نقاط..... ۲۷
- ۳-۵-۲-۱- محدودیت پارامتر ذاتی ۲۷
- ۳-۵-۳- محاسبه پارامترهای ذاتی دوربین..... ۲۸
- ۳-۶-۶- کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب لیزری با روش پلس و ژانگ ۲۹
- ۳-۶-۱- معادلات پایه ۲۹
- ۳-۶-۲- محاسبه‌ی جهت و موقعیت دوربین به فاصله‌یاب لیزری..... ۳۲
- ۳-۶-۳- فاصله‌ی یک نقطه در فضا از صفحه..... ۳۲
- ۳-۶-۴- پیدا کردن رابطه بین حالت‌های مختلف صفحه و نقاط فاصله‌یاب..... ۳۲
- ۳-۷-۷- حل مسأله کالیبراسیون دوربین و لیزر ۳۴
- ۳-۷-۱- محاسبه‌ی پارامترهای اولیه موقعیت و جهت دوربین..... ۳۵
- ۳-۸-۸- محاسبه‌ی دوران و موقعیت دوربین به فاصله‌یاب لیزری ۳۶
- ۳-۸-۱- نزدیک‌ترین ماتریس یکامتعامد به ماتریس دوران محاسبه شده ۳۷
- ۳-۹-۹- بهینه‌سازی غیرخطی ۳۸
- ۳-۹-۱- روش بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی روش گاوس- نیوتن ۳۹
- ۳-۹-۲- روش لونبرگ مارکوارد ۴۰
- ۳-۱۰-۱۰- ردیابی سه‌بعدی اجسام صلب توسط دوربین ۴۰
- ۳-۱۰-۱- نحوه محاسبه‌ی پارامترهای وضعیت جسم صلب در فضا ۴۱
- ۳-۱۱-۱۱- نتیجه‌گیری ۴۲
- ۴- فصل چهارم: اجرای نقشه‌برداری سه‌بعدی در محیط آزمایشگاهی..... ۴۳

۴۴	۱-۴- مقدمه
۴۴	۲-۴- تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه بعدی
۴۵	۳-۴- ارتباط بین تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه بعدی
۴۵	۴-۴- ربات متحرک شرکت کوکا (YOUBOT)
۴۶	۵-۴- سیستم موقعیت یاب جهانی
۴۷	۱-۵-۴- جسم صلب هدف
۴۸	۶-۴- دوربین متصل به بازوی ربات
۴۸	۱-۶-۴- وبکم microsoft webcam lifecam cinema
۴۹	۱-۱-۶-۴- راه انداز وبکم
۴۹	۷-۴- فاصله یاب لیزری مدل URG-04LX استفاده شده در این تحقیق
۵۰	۸-۴- نرم افزار داده گیری آنلاین از دوربین متصل به ربات و فاصله یاب لیزری
۵۱	۹-۴- پردازش داده های فاصله یاب لیزری
۵۱	۱-۹-۴- کدگذاری و کدگشایی داده های فاصله
۵۱	۱-۱-۹-۴- کدگذاری داده های فاصله
۵۲	۲-۱-۹-۴- کدگشایی داده های فاصله
۵۳	۲-۹-۴- راه اندازی فاصله یاب لیزری
۵۴	۱-۲-۹-۴- داده های فاصله و زاویه در حسگر فاصله یاب لیزری
۵۴	۱۰-۴- تخمین مدل نویز حسگر فاصله یاب لیزری در بستر آزمایشگاهی
۵۵	۱۱-۴- تهیه نقشه ی دوبعدی محیط با استفاده از حسگر فاصله یاب دوبعدی

- ۱۲-۴- ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی بدون بافت از محیط و موانع آن ۵۶
- ۱۳-۴- پردازش ابر نقاط به‌دست آمده و تشخیص یک صفحه موجود در صحنه ۵۷
- ۱۴-۴- کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب لیزری ۵۹
- ۱-۱۴-۴- مشخص کردن محدوده صفحه در نقشه‌ی دوبعدی ارائه شده توسط فاصله‌یاب ۵۹
- ۲-۱۴-۴- محاسبه‌ی دوران و انتقال دوربین به فاصله‌یاب ۶۰
- ۳-۱۴-۴- نگاشت نقاط لیزر به تصویر دوربین و استخراج رنگ هر نقطه از تصویر ۶۱
- ۴-۱۴-۴- کالیبراسیون خارجی دوربین و جسم هدف نصب شده بر روی بازو ۶۲
- ۵-۱۴-۴- استخراج مرکز نقاط معلوم بستر کالیبراسیون ۶۵
- ۱-۵-۱۴-۴- استخراج اجزا متصل با روش ریخت‌شناسی ۶۵
- ۲-۵-۱۴-۴- روش کلیک و آستانه‌گذاری ۶۷
- ۱۵-۴- رسم داده در دستگاه مختصات اتاق ۶۸
- ۱۶-۴- کالیبره کردن دوربین‌های سیستم موقعیت‌یابی و وبکم متصل به بازوی ربات ۶۸
- ۱۷-۴- بازسازی سه‌بعدی ۷۱
- ۱۸-۴- بازسازی سه‌بعدی محیط‌های داخلی ۷۱
- ۱۹-۴- نتیجه‌گیری ۷۴
- ۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها: ۷۵
- ۱-۵- نتیجه‌گیری ۷۶
- ۲-۵- پیشنهادها برای کار آتی ۷۶
- ۶- منابع ۷۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نمونه‌ای از حسگر تماسی (حسگر خازنی) ۱۲
- شکل ۲-۲: نمونه‌ای از حسگر مادون قرمز ۱۳
- شکل ۳-۲: نحوه‌ی عملکرد حسگر فراصوت ۱۳
- شکل ۴-۲: برخی از انواع حسگرهای فراصوت ۱۴
- شکل ۵-۲: پدیده داپلر ۱۴
- شکل ۶-۲: عملکرد دوربین‌های زمان پرواز ۱۵
- شکل ۷-۲: الف - تصویر حاصله از دوربین زمان پرواز، ب - نمونه‌ای از دوربین زمان پرواز ۱۵
- شکل ۸-۲: دوربین کینکت ۱۶
- شکل ۹-۲: دو نمونه از فاصله‌یاب لیزری ۱۷
- شکل ۱۰-۲: اسکنر لیزری سه‌بعدی ۱۸
- شکل ۱۱-۲: سیستم بینایی استریو ۱۹
- شکل ۱-۳: هندسه تشکیل تصویر در صفحه تصویر ۲۲
- شکل ۲-۳: الگوی تک‌بعدی برای کالیبراسیون دوربین ۲۵
- شکل ۳-۳: الگوی سه‌بعدی کالیبراسیون دوربین ۲۶
- شکل ۴-۳: دوربین و فاصله‌یاب لیزری نصب شده بر روی ربات متحرک ۲۹
- شکل ۵-۳: قرارگیری صفحه کالیبراسیون و دوربین در فضا ۳۰
- شکل ۶-۳: دستگاه مختصات فاصله‌یاب لیزری ۳۰
- شکل ۷-۳: نحوه‌ی قرارگیری صفحه کالیبراسیون در مقابل سیستم ۳۱
- شکل ۸-۳: نمایش فاصله صفحه‌ی الگو تا دوربین در دستگاه مختصات دوربین ۳۲
- شکل ۱-۴: مراحل بازسازی سه‌بعدی ۴۴
- شکل ۲-۴: تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه‌بعدی ۴۵

- شکل ۳-۴: ربات متحرک کوکا (YOU BOT)..... ۴۶
- شکل ۴-۴: محل نصب دوربین‌های موقعیت‌یابی..... ۴۷
- شکل ۵-۴: جسم صلب با ۵ گوی درخشان..... ۴۸
- شکل ۶-۴: وبکم Lifecam Microsoft..... ۴۹
- شکل ۷-۴: پارامترهای اندازه‌گیری فاصله‌یاب..... ۵۰
- شکل ۸-۴: نرم افزار نمایش همزمان تصویر و داده‌های فاصله‌یاب..... ۵۱
- شکل ۹-۴: کدگذاری فاصله..... ۵۲
- شکل ۱۰-۴: کد گشایی داده‌های فاصله..... ۵۲
- شکل ۱۱-۴: تخمین نویز گاوسی فاصله‌یاب لیزری..... ۵۵
- شکل ۱۲-۴: نقشه‌ی دوبعدی ایجاد شده از محیط..... ۵۶
- شکل ۱۳-۴: تبدیل داده‌های لیدار از مختصات دکارتی به مختصات کروی..... ۵۶
- شکل ۱۴-۴: الف-تصویر صحنه‌ی اسکن شده، ب-نقشه‌ی سه‌بعدی ایجاد شده از همان صحنه..... ۵۷
- شکل ۱۵-۴: محدوده عمودی و افقی صفحه..... ۵۸
- شکل ۱۶-۴: نقاط سیاه، صفحه‌ی برازش شده با روش حداقل مربعات..... ۵۹
- شکل ۱۷-۴: الف-صفحه‌ی آشکار شده از داده‌های لیزر، ب-نحوه‌ی قرارگیری صفحه در فضا..... ۶۰
- شکل ۱۸-۴: دوربین و فاصله‌یاب لیزری بر روی مفصل ۵ بازو..... ۶۱
- شکل ۱۹-۴: نگاشت نقاط فاصله‌یاب لیزری به تصویر (نقاط آبی)..... ۶۲
- شکل ۲۰-۴: شماتیک بستر مورد استفاده جهت کالیبراسیون دوربین به بازو..... ۶۳
- شکل ۲۱-۴: بستر کالیبراسیون بازو و دوربین..... ۶۵
- شکل ۲۲-۴: حذف پس‌زمینه..... ۶۶
- شکل ۲۳-۴: برجسب گذاری المان‌ها و یافتن مراکز المان‌ها..... ۶۷
- شکل ۲۴-۴: نتایج حاصل از روش کلیک و آستانه گذاری..... ۶۸

- شکل ۴-۲۵: حالت‌های مختلف الگو جهت کالیبراسیون دوربین ۶۹
- شکل ۴-۲۶: الف- حالت‌های مختلف الگو، ب- میانگین خطای پیکسلی ۷۰
- شکل ۴-۲۷: اسکن اول ربات از محیط ۷۲
- شکل ۴-۲۸: اسکن اول و دوم ربات ۷۲
- شکل ۴-۲۹: محیط اسکن شده از دید بالا ۷۳
- شکل ۴-۳۰: اسکن کامل محیط ۷۴
- شکل ۵-۱: الف- اسکن محیط با سیستم پیشنهادی، ب- اسکن محیط با الگوریتم ICP ۷۶

فهرست جداول

- جدول ۴-۱: مختصات قرارگیری نشانگر در دستگاه متصل به جسم ۴۸
- جدول ۴-۳: فرمت دستور ارسالی از میزبان به حسگر ۵۳
- جدول ۴-۴: نمونه‌ای از دستورات فاصله‌یاب لیزری ۵۳
- جدول ۴-۵: فرمت دستور ارسالی از حسگر به میزبان ۵۴
- جدول ۴-۲: پارامترهای داخلی سیستم موقعیت‌یاب ۷۰

لیست اختصارات و علائم استفاده شده در این پایان نامه

f	فاصله‌ی کانونی دوربین
$f_x = s_x$	اسکیل فاصله‌ی کانونی در جهت افقی
$f_y = s_y f$	اسکیل فاصله‌ی کانونی در جهت عمودی
s_x	اندازه‌ی افقی پیکسل
s_y	اندازه‌ی افقی پیکسل
s_θ	اغتشاش غیر همگن دوربین
K	ماتریس پارامترهای ذاتی دوربین
R	ماتریس دوران
t	بردار انتقال
u_0, v_0	مرکز صفحه تصویر دوربین
k_c	بردار پارامترهای اعوجاج دوربین
k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}	سه پارامتر اول اعوجاج شعاعی دوربین
k_{c5}, k_{c6}	دو پارامتر اعوجاج مماسی
$\tilde{x}$	مختصات عمودی یک نقطه پس از اعمال اعوجاج شعاعی و مماسی
$\tilde{y}$	مختصات افقی یک نقطه پس از اعمال اعوجاج شعاعی و مماسی
$D(r_{dist}, k_c)$	تابع اعوجاج شعاعی
r_{dist}	شعاع اعوجاج
X_j	مختصات گوشه‌های صفحه شطرنجی در دستگاه مختصات صفحه

U_j	مختصات پیکسلی گوشه‌های صفحه کالیبراسیون
H	هموگرافی بین دستگاه مختصات جهانی و مختصات پیکسلی متناظر
H_{ij}	درایه‌ی سطر i -ام و ستون j -ام ماتریس H
h_i	ستون i -ام ماتریس H
λ	فاکتور مقیاس بزرگتر از صفر
$B = K^{-T} K^{-1}$	ماتریس محاسبه شده از ماتریس ذاتی دوربین
B_{ij}	درایه‌ی سطر i -ام و ستون j -ام ماتریس B
b	بردار تشکیل شده از عناصر غیر تکراری ماتریس B
P_w	نقاط در دستگاه مختصات صفحه کالیبراسیون
P, P_c	نقاط در دستگاه مختصات دوربین
p^f	نقاط در دستگاه مختصات فاصله‌یاب
θ	زاویه‌ی اسکن فاصله‌یاب
r	فاصله‌ی اندازه‌گیری شده توسط فاصله‌یاب
ϕ	ماتریس دوران دوربین به فاصله‌یاب
Δ	بردار انتقال دوربین به فاصله‌یاب
N_i	بردار عمود بر هر حالت صفحه کالیبراسیون
R_i	ستون i -ام ماتریس دوران
N_p	بردار نرمال عمود بر صفحه کالیبراسیون
D	فاصله‌ی یک نقطه از یک صفحه

R_i^T	ترانهاده ستون نام ماتریس دوران
η	زاویه ی بین دو بردار N و P
ϕ^{-1}	معکوس ماتریس دوران دوربین به فاصله یاب
d_1, d_2, d_3	پارامترهای بردار انتقال دوربین به فاصله یاب
$\ N\ ^2$	مربع اندازه ی بردار عمود بر صفحه (پارامتر صفحه)
M_{ij}	درایه ی سطر نام و ستون نام ماتریس M
n_1, n_2, n_3	پارامترهای بردار N
m	بردار ۹ در ۱ تشکیل شده از پارامترهای ماتریس M
ϕ_i	ستون نام ماتریس Φ
M_i	ستون نام ماتریس M
$Trace$	مجموع درایه های قطر اصلی یک ماتریس
Δ	ماتریس ضرایب لاگرانژ
min	حد/قل سازی

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

در این فصل به تعریف مسأله، ضرورت انجام تحقیق، روش‌ها و چالش‌ها در زمینه‌ی نقشه‌برداری سه‌بعدی، پرداخته می‌شود. همچنین روش پیشنهادی برای حل مسأله نقشه‌برداری سه‌بعدی، به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

۱-۲- بیان مسأله

بازسازی سه‌بعدی، فعالیتی جهت ایجاد مدلی سه‌بعدی از اشیاء یا محیط به کمک حسگرها است. ایجاد مدل سه‌بعدی از محیط را نقشه‌برداری سه‌بعدی می‌گویند. نقشه‌برداری یکی از مهم‌ترین مسائل در علم رباتیک و ناوبری است. در دسترس بودن نقشه از فضای کاری ربات، یک نیاز مهم برای اجرای وظایف ربات است. ربات‌های متحرک برای کار در یک محیط پویا، مستلزم داشتن نقشه‌ی سه‌بعدی از فضای کاری خود با استفاده از حسگرها و پردازنده‌ها هستند. ایجاد چنین بازسازی سه‌بعدی محیط، نیازمند تعیین موقعیت دقیق المان‌های محیط است. یکی از مناسب‌ترین حسگرهای مورد استفاده برای نقشه‌برداری سه‌بعدی، حسگرهای نوری است؛ از حسگرهای نوری، می‌توان به حسگرهای فاصله‌یاب و دوربین اشاره کرد. حسگرهای فاصله‌یاب معمولاً از دسته‌ی حسگرهای فعال هستند. به این معنی که با ارسال یک سیگنال و دریافت بازتاب آن و محاسبه‌ی زمان رفت و برگشت، اطلاعات عمق توسط حسگر به دست می‌آید. دوربین، نوعی حسگر نوری غیرفعال است؛ به این معنی که سیگنالی از آن ارسال نمی‌شود، بلکه نور دریافتی از محیط به کمک آن ثبت می‌شود. برخلاف حسگرهای فاصله‌یاب که مستقیماً اطلاعات عمق را در اختیار قرار می‌دهند، در تصویر به‌دست‌آمده از دوربین، اطلاعات عمق وجود ندارد. استخراج اطلاعات عمق از تصویر دوبعدی دوربین، فرآیندی پیچیده و زمان‌بر است. از طرف دیگر، دوربین اطلاعات مفیدی از بافت اشیای محیط در اختیار قرار می‌دهد که می‌تواند در تولید مدل سه‌بعدی به کار رود. استفاده هم‌زمان از دو حسگر فاصله‌یاب و دوربین روش مناسبی برای ایجاد نقشه از محیط است. تصویر گرفته‌شده برای ایجاد بافت مدل، استفاده شده و عمق نیز توسط حسگرهای فاصله‌یاب ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که دوربین و فاصله‌یاب به‌صورت ترکیبی در یک بستر استفاده شده است.

۱-۳- مسأله بازسازی سه‌بعدی در بینایی کامپیوتری و رباتیک

بازسازی سه‌بعدی صحنه، یکی از مسائل مهم در بینایی کامپیوتری و رباتیک است. این مسأله در

بینایی کامپیوتری با عنوان استخراج ساختار از حرکت (SFM)^۱ و در رباتیک به صورت زیرمجموعه‌ای از مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان (SLAM)^۲ بیان می‌شود. استخراج ساختار از حرکت، همواره شبیه مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان بوده با این تفاوت که در استخراج ساختار از حرکت، به جای استفاده از حسگرهای متنوع، از دوربین برای جمع‌آوری اطلاعات محیط استفاده می‌شود. روش استخراج ساختار از حرکت، همانند مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان، در جامعه‌ی کامپیوتری از اهمیت زیادی برخوردار است [۳]. در اکثر تحقیقات انجام‌گرفته در زمینه بازسازی سه‌بعدی از حسگرهای لیزری و سونار، در مسأله‌ی مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان و از دوربین در مسأله‌ی استخراج ساختار از حرکت، برای جمع‌آوری اطلاعات از محیط استفاده شده است. اسمیت و همکاران که از پیشگامان مسأله مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان، یک چارچوب کلی برای نقشه‌برداری محیط‌های ناشناخته یا به‌روز رسانی نقشه‌های محیط‌های شناخته‌شده، ارائه دادند [۱]. مهم‌ترین توسعه‌دهنده این مسأله دورانت وایت و جان لئونارد بودند [۲]. به صورت عمومی در بازسازی سه‌بعدی، جزئیات صحنه با استفاده از تعداد محدودی از مشاهده، قابل بازسازی است. داده‌های سه‌بعدی در هر مشاهده، باید از تمام نقاط صحنه جمع‌آوری شوند. یکی از بهترین روش‌ها برای به دست آوردن جزئیات صحنه ترکیب داده‌های تصویر و عمق برای بازسازی محیط، همراه با بافت است. بازسازی سه‌بعدی ایجاد شده از محیط، می‌تواند در اختیار واحدهای مختلف از جمله ربات‌ها و واحدهای آنالیز خطر قرار گیرد.

۴-۱- کاربرد ربات‌های متحرک در نقشه‌برداری

علم ربات‌های متحرک، زیرمجموعه‌ای از علم رباتیک است. این علم، به بررسی نحوه درک محیط، نمایش، حرکت و کاوش در محیط‌های ناشناخته و پویا می‌پردازد. امروزه علم ربات‌های متحرک به‌طور وسیعی مورد توجه پژوهشگران علوم مختلف قرار گرفته است. در حالت کلی می‌توان گفت، هدف اصلی

^۱ Structure From Motion

^۲ Simultaneous Localization And Mapping

علم ربات‌های متحرک، ایجاد ربات‌های خودمختار جهت انجام فعالیت‌هایی است که به هر دلیل می‌تواند برای انسان خطرآفرین، غیرممکن و یا خسته‌کننده باشد. مسأله تهیه نقشه، به عنوان یکی از مسائل مهم در ساخت ربات‌های متحرک خودمختار در نظر گرفته می‌شود. تهیه نقشه سه‌بعدی از محیط‌های داخلی، در مأموریت‌های جستجو و نجات می‌تواند بسیار مفید باشد. در چند سال گذشته، ربات‌های جستجو و نجات توسعه یافته و در مناطق خطرناک برای انسان مانند داخل ساختمان نزدیک به فروپاشی و یا محیط‌های دارای آلودگی رادیواکتیو استفاده شده‌اند. در دسترس بودن یک نقشه از این مناطق، می‌تواند به‌طور چشمگیری بهره‌وری و اثربخشی این عملیات را بهبود بخشد [۴]. ربات متحرک برای انجام وظیفه‌ای طراحی و برنامه‌نویسی شده و انجام این وظیفه معادل با حل یک مسأله در زمان و مکان است؛ به این معنی که ربات باید در یک زمان محدود به سمت هدف‌هایی حرکت کند و وظیفه خود را پس از رسیدن به مکان هدف موردنظر انجام دهد. اولین چالشی که ربات متحرک با آن روبرو می‌شود، این است که ربات باید در هر لحظه اطلاعات کافی از مکان نقطه هدف نسبت به مکان خود داشته باشد، تا سیگنال کنترلی مناسب برای هدایت خود به سمت نقطه هدف ایجاد کند. دانستن مکان نسبی هدف و مکان موانع موجود در مسیر ربات، نیازمند اطلاعاتی از محیط است که گاهی از آن‌ها با عنوان بازنمایی محیط یاد می‌شود. علاوه بر این باید اطلاعات کافی از خود ربات نیز در دست باشد. به مسأله به دست آوردن مکان ربات، مسأله مکان‌یابی و به مسأله به دست آوردن توصیفی از محیط، مسأله تهیه نقشه و به توصیف به‌دست‌آمده از محیط، نقشه گفته می‌شود.

۱-۵- ضرورت انجام تحقیق

امروزه داده‌های سه‌بعدی جغرافیایی، به طور گسترده‌ای در کاربردهای زیادی مانند مدل‌سازی شهر، میراث فرهنگی، مدیریت تصادفات، تجزیه و تحلیل خطر در ساختمان، رانندگی و ناوبری ربات استفاده می‌شوند. با توجه به اینکه، استفاده از ربات در محیط‌های گوناگون در حال افزایش است و تعامل انسان و ربات یک امر غیر قابل انکار است، برای اینکه ربات بتواند با امنیت قابل توجهی با انسان در تعامل باشد، نیازمند شناخت محیط اطراف خود است. یک ربات خودمختار در حالتی می‌تواند

وظایف خود را به خوبی انجام دهد که از کلیه موانع مانند موانع ثابت و متحرک اطلاع کافی داشته باشد. ربات‌های خودمختار برای طراحی مسیر بهینه، نیازمند اطلاع از محیط پیرامون و اشیاء موجود در محیط هستند. در صورتی که یک نقشه‌ی سه‌بعدی (مدل سه‌بعدی) از محیط در اختیار ربات قرار گیرد، ربات می‌تواند وظیفه‌ی خود را به‌درستی انجام دهد؛ بنابراین ایجاد یک نقشه سه‌بعدی از مسائل ضروری در حوزه علم رباتیک، عمران و شهرسازی است.

۱-۶- چالش‌های نقشه‌برداری سه‌بعدی

در سال‌های اخیر، بینایی سه‌بعدی مورد مطالعه‌ی انجمن‌های رباتیک و کامپیوتر قرار گرفته است. مطالعه‌ی بینایی سه‌بعدی همواره چالش‌هایی را به همراه داشته است. در این بخش به چالش‌های موجود در این زمینه پرداخته می‌شود.

۱. از آنجایی که اغلب از بستر رباتیکی جهت جمع‌آوری اطلاعات از محیط استفاده می‌شود، این بسترها از نظر توان محاسباتی محدود هستند؛ در حالیکه تبدیل اطلاعات دوبعدی به سه‌بعدی، نیازمند توان محاسباتی بالا است که باید ظرفیت محاسباتی کامپیوترهای روی ربات افزایش یابد.

۲. دقت نقشه‌برداری بسیار وابسته به دقت روشی است که موقعیت را ارائه می‌دهد؛ بنابراین استفاده از روشی که از خطای کمتری در موقعیت‌یابی ربات برخوردار باشد، بسیار حائز اهمیت است.

۳. شناسایی ربات در محیط‌های ناشناخته همواره چالش برانگیز است.

۱-۷- روش تحقیق

هدف این تحقیق، ارائه روشی جدید برای بازسازی سه‌بعدی محیط داخلی با استفاده از یک بستر شامل دوربین مرئی و فاصله‌یاب لیزری است. این تجهیزات بر روی بازوی ماهر ربات متحرک (ربات کوکا) نصب شده‌اند. این ربات مجهز به فاصله‌یاب و دوربین رنگی، در محیط مورد نظر قرار داده می‌شود. ربات شروع به حرکت و اسکن محیط می‌کند. با حرکت بازوی ربات از بالا به پایین، محیط

روبرو توسط دوربین و فاصله‌یاب روبش می‌شود. این عمل با چرخش بازوی ربات تا تکمیل ۳۶۰ درجه در اطراف ربات ادامه می‌یابد. اطلاعات بافت و رنگ صحنه توسط دوربین اپتیک و اطلاعات عمق توسط لیزر دریافت شده و در مرحله بعد صحنه با استفاده از اطلاعات عمق و بافت بازسازی می‌شود. با توجه به متحرک بودن ربات، موقعیت ربات در هر حالت، در دستگاه مرجع با استفاده از دو دوربین اپتیک که در صحنه ثابت هستند، تخمین زده می‌شود.

۸-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه، در ۵ فصل تنظیم شده است. در فصل اول با عنوان کلیات، به بیان مسأله نقشه‌برداری و توسعه دهندگان این مسأله پرداخته می‌شود. در فصل دوم به مرور شاخص‌ترین کارهای تحقیقاتی انجام شده در سال‌های اخیر در حوزه نقشه‌برداری سه‌بعدی پرداخته می‌شود. در این فصل همچنین حسگرهای مورد استفاده در مسأله‌ی بازسازی سه‌بعدی و عملکرد آن‌ها به صورت مختصر شرح داده شده و برخی از این حسگرها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در فصل ۳ مفاهیم اولیه و روابط تئوری تحقیق، که جهت درک بهتر این پایان‌نامه مورد نیاز بوده، بیان شده است. در فصل ۴ نحوه بازسازی سه‌بعدی با استفاده از ربات متحرک کوکا، سیستم موقعیت‌یابی و حسگرهای وصل شده بر روی بازوی ربات در محیط آزمایشگاهی تشریح شده است. در فصل ۵ نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادهایی جهت انجام پژوهش‌های جدید ارائه شده است.

فصل دوم

سابقه بازسازی سه‌بعدی و انواع

حسگرها

۲-۱- مقدمه

روش‌ها و سنسورهای مختلفی جهت بازسازی سه‌بعدی استفاده می‌شوند. در این فصل، به سابقه‌ی نقشه‌برداری سه‌بعدی و مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان پرداخته شده است. همچنین عملکرد تعدادی از سنسورهای مورد استفاده در بازسازی سه‌بعدی تشریح شده و مزایا و معایب برخی از سنسورهای رایج بررسی شده است.

۲-۲- سابقه نقشه‌برداری سه‌بعدی

نقشه‌برداری سه‌بعدی در دهه‌های اخیر مورد مطالعه بسیاری از محققان ([۵] تا [۷]) قرار گرفته است. با توسعه مدل‌های مختلف حسگرهای سه‌بعدی مانند اسکنرهای لیزری، دوربین‌های زمان پرواز و دوربین‌های استریو، نقشه‌های دوبعدی به نقشه‌های سه‌بعدی تبدیل شده‌اند. 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 نرم افزار مربوطه تشکیل شده بود. در این مطالعه، از الگوریتم تکراری نزدیکترین نقاط^۱ جهت تطبیق نقاط سه‌بعدی و به دست آوردن موقعیت ربات استفاده شده است [۸]. برخی از محققان نیز تلاش کرده‌اند تا با استفاده از حسگر فاصله‌یاب دوبعدی لیزری، اقدام به ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی نمایند [۹]. [۱۰] دیوید و همکاران با استفاده از حسگر فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و حسگرهای GSNN^۲ و IMU^۳ نصب شده بر روی پهباد، سیستمی جهت نقشه‌برداری سه‌بعدی هوایی ارائه دادند [۱۱]. در مطالعه [۱۰] 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

^۱ Iterative closest point

^۲ Global Navigation Satellite System

^۳ Inertial measurement unit

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. حسگر دیگری که در رباتیک کاربرد فراوانی دارد و در مسأله‌ی مکان‌یابی [۱۲] و نقشه‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، دوربین زمان پرواز^۱ است. این دوربین‌ها، از آنجایی که سرعت بالایی جهت جمع‌آوری داده‌های سه‌بعدی دارند، یکی از حسگرهای جذاب در مسأله نقشه‌برداری سه‌بعدی، محسوب می‌شوند. این حسگرها به ازای هر پیکسل، رنج متناظر با پیکسل را ارائه می‌دهند. در تحقیقی با عنوان نقشه‌برداری سه‌بعدی با استفاده از دوربین‌های زمان پرواز [۱۳]، کاربرد دوربین‌های زمان پرواز در ربات‌های خودمختار و مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی مانند عدم حرکت و عدم تغییر نور در هنگام کسب داده از محیط، مورد بررسی قرار گرفت. یکی دیگر از حسگرهای مورد استفاده در نقشه‌برداری سه‌بعدی، دوربین‌های دو چشمی (استریو) هستند. تومونو^۲ روشی برای مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی با استفاده از دوربین استریو ارائه داد. در این روش، از اطلاعات بافت محیط هیچگونه استفاده‌ای نشده و نقشه‌برداری سه‌بعدی با استفاده از گوشه‌های استخراج شده‌ی اجسام، صورت گرفته است [۱۴]. تحقیقات در زمینه‌ی نقشه‌برداری سه‌بعدی، با ظهور حسگرهایی مانند کینکت [۱۵] و Xtion Pro [۱۶] 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. استفاده از حسگر کینکت در مکان‌یابی و نقشه‌برداری سه‌بعدی را RGB-D SLAM گویند. هنری و همکاران، از این روش جهت مدل‌سازی محیط‌های داخلی استفاده کردند [۱۷]. این روش توسط اندرس و همکارانش نیز مورد مطالعه قرار گرفت [۱۸]. آن‌ها از اطلاعات بصری دوربین کینکت، جهت شناسایی رابط‌های حالت‌های مختلف دوربین در دو فریم استفاده کردند. اطلاعات بصری که جهت

^۱ Time-of-Flight Cameras

^۲ Masahiro Tomono

تخمین موقعیت دوربین استفاده می‌شد، اغلب دارای خطا بوده و این خطا در تخمین موقعیت‌های بعدی دوربین تاثیر 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 [۱۹]، [۲۰]. در تحقیقی با عنوان مدل‌سازی سه‌بعدی محیط داخلی به وسیله‌ی سنسور کینکت، یک سیستم بازسازی سه‌بعدی مبتنی بر داده‌های RGB-D جهت مدل‌سازی سه‌بعدی اشیا و محیط‌های داخلی ارائه شد [۲۱]. در این تحقیق ابتدا داده‌های عمق از سنسور کینکت استخراج شده و نویز داده‌ها تا حدی حذف شدند. در این روش به منظور کاهش حجم داده‌های عمق از واکسل‌ها جهت ذخیره‌سازی اطلاعات عمق و همچنین از یک الگوریتم مقاوم مبتنی بر RANSAC^۱ جهت ردیابی مسیر حرکت سنسور کینکت استفاده شد.

۲-۳- مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان

نقشه‌برداری سه‌بعدی، زیرمجموعه‌ای از مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان محسوب می‌شود. به طور کلی، مسأله مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان در محیط‌های باز توسط سامانه تعیین موقعیت سراسری (GPS) با دقت خوبی قابل حل است؛ اما در محیط‌های داخلی و یا در مکان‌هایی که داده‌های GPS در دسترس نبوده، یا به اندازه‌ی کافی قابل اعتماد نیستند، راه حل مناسب مکان‌یابی و نقشه‌برداری هم‌زمان است. مسأله SLAM در محیط‌های داخلی به ربات این امکان را می‌دهد که وظایف خود را در سطح بالاتری به انجام رساند [۲۲].

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.

^۱ Random Sample Consensus

در این روش، ربات به صورت تدریجی می‌تواند نقشه را از ویژگی‌های محیط ساخته و مکان خودش را پیدا کند. حل مسأله در SLAM را می‌توان به دو قسمت تجزیه کرد:

(۱) استخراج ویژگی‌های محیط با استفاده از داده‌های دریافتی از حسگرها

(۲) بهبود عدم قطعیت‌ها و خطاهای حسگرها

تکنیک‌های بینایی، استخراج ویژگی‌های محیط و ردیابی آن را به خوبی انجام داده و این اطلاعات را برای ایجاد نقشه سه‌بعدی آماده می‌سازند. همچنین نظریه تخمین آماری، روش‌های گوناگونی را جهت بهینه‌سازی عدم قطعیت و خطا ارائه می‌دهد [۲۳]. روش پیشنهادی در این تحقیق، جهت بازسازی سه‌بعدی محیط‌های داخلی زیر مجموعه‌ی SLAM نبوده، زیرا موقعیت و جهت ربات توسط دوربین استریو موجود در محیط، ارائه شده و ربات مکان خود را تخمین نمی‌زند.

۲-۴- روش کینکت فیوژن

بازسازی سه‌بعدی آنی با استفاده از یک دوربین عمقی متحرک توسط NewCombe و همکارانش در سال ۲۰۱۱ توسعه داده شد [۲۴]. در این روش با حرکت کینکت توسط کاربر، یک بازسازی سه‌بعدی سریع با جزئیات از محیط‌های داخلی ایجاد می‌شود. سرعت بالای این روش بخاطر استفاده از برنامه نویسی^۱ GPGPU 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.

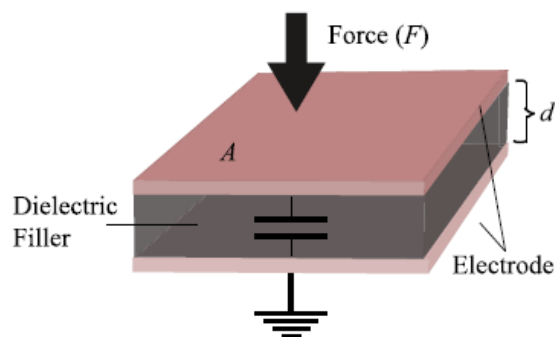
۲-۵- مروری بر حسگرهای مورد استفاده در مسأله بازسازی سه‌بعدی

در مسأله بازسازی سه‌بعدی، از حسگرهای مختلفی جهت جمع‌آوری اطلاعات از محیط استفاده می‌شود. در این بخش عملکرد رایج‌ترین حسگرهای مورد استفاده در بازسازی سه‌بعدی بررسی می‌شود.

^۱ General Purpose Graphics Processing Unit

۲-۵-۱- حسگرهای برخوردی

حسگرهای برخوردی از ساده‌ترین حسگرهای مورد استفاده جهت جمع‌آوری اطلاعات از محیط هستند. این حسگرها در صورت برخورد با اشیاء موجود در محیط، آن را تشخیص می‌دهند. در اصطلاح به این حسگرها، حسگرهای تماسی^۱ نیز گویند. از کاربردهای این حسگرها، می‌توان به کاربردهای پزشکی^۲، تعامل انسان و ربات^۳ و توان‌بخشی^۴ اشاره کرد. نمونه‌ای از این حسگرها حسگر خازنی بوده که در شکل (۱-۲) عملکرد آن نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از حسگر تماسی (حسگر خازنی) [۲۵]

۲-۵-۲- حسگرهای مادون قرمز و نور مرئی

حسگرهای مادون قرمز^۵ و نوری برای سنجش فاصله کمتر از ۲۰ سانتی‌متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع حسگرها، از نوع حسگرهای غیرتماسی^۶ بوده و اغلب برای جلوگیری از برخورد با موانع در محیط استفاده می‌شوند. عملکرد این حسگرها به این شکل است که نور توسط حسگر فرستنده ارسال شده و حسگر گیرنده انعکاس آن را دریافت می‌کند. نحوه‌ی استفاده از این حسگر در SLAM در [۲۶] ارائه شده است. در شکل (۲-۲) نمونه‌ای از این حسگر نمایش داده شده است.

^۱ Tactile Sensing

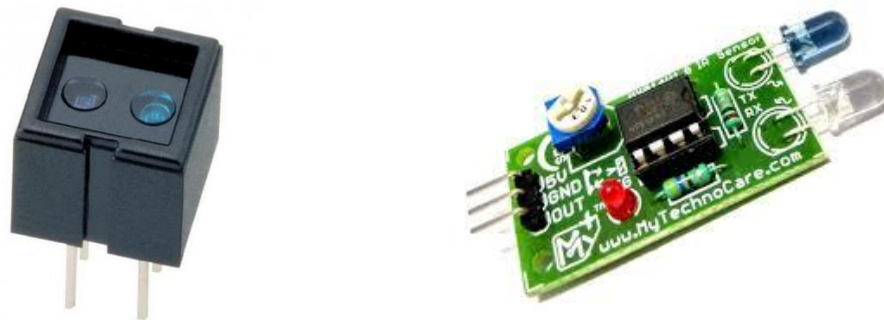
^۲ Biomedical Applications

^۳ Human-Robot Interaction

^۴ Rehabilitation

^۵ Infra_Red sensor

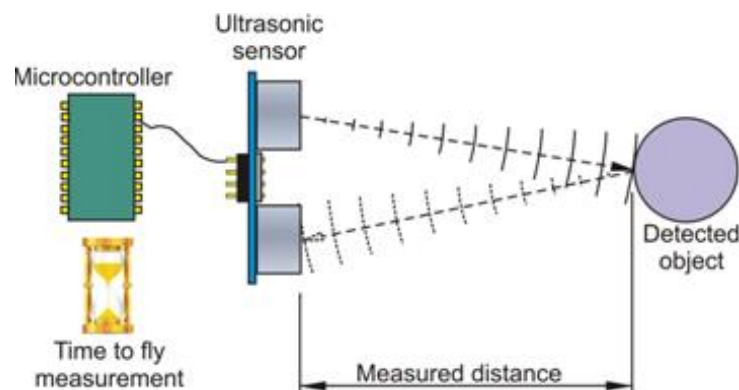
^۶ Noncontact Sensors



شکل ۲-۲: نمونه‌ای از حسگر مادون قرمز

۲-۵-۳- حسگرهای صوتی و فراصوتی

حسگرهای صوتی، یکی از مناسب‌ترین حسگرهای مورد استفاده در امر جمع‌آوری داده از محیط بوده و برای اندازه‌گیری در حد ۲۰ سانتی‌متر تا بیش از چند متر مناسب هستند. این حسگرها نیز مانند حسگرهای مادون قرمز از زمان رفت و برگشت سیگنال جهت اندازه‌گیری فاصله استفاده می‌کنند. عملکرد این حسگرها در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است. تفاوت این حسگر با سایر حسگرها، استفاده از صوت به جای سایر سیگنال‌ها است. مشکل مهم این حسگرها، زاویه دید وسیع آنهاست که موجب کاهش دقت زوایه‌ای می‌شود. یعنی اگر جسم در محدوده زاویه دید حسگر قرار گیرد، حسگر قادر به تشخیص آن خواهد بود، ولی زاویه قرارگیری جسم به حسگر قابل محاسبه نیست. نمونه‌ای از این حسگر در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است.



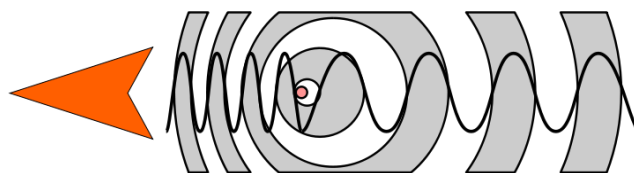
شکل ۲-۳: نحوه‌ی عملکرد حسگر فراصوت



شکل ۲-۴: برخی از انواع حسگرهای فراصوت [۲۷]

۲-۵-۳-۱ اثر داپلر در حسگر التراسونیک

یکی از مشکلات مهم استفاده از حسگرهای التراسونیک، اثر داپلر است. اثر داپلر در فیزیک موج بیان کننده این است که بسامد ظاهری یک موج در اثر حرکت گیرنده یا فرستنده آن تغییر می‌کند [۲۸]. این پدیده را کریستین یوهان داپلر در سال ۱۸۴۲ بیان کرد. همانطور که در شکل (۲-۵) نمایش داده شده است. با حرکت منبع موج به سمت چپ، بسامد موج در سمت چپ بلندتر و در سمت راست کوتاه‌تر است.

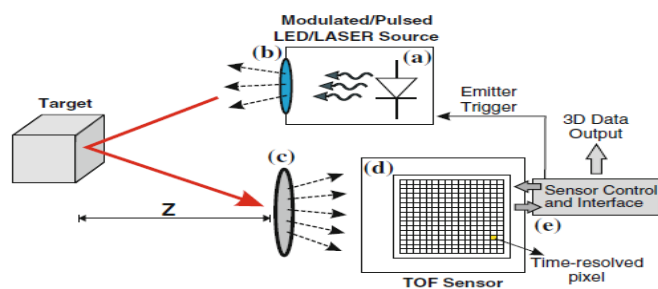


شکل ۲-۵: پدیده داپلر [۲۸]

۲-۵-۴ دوربین‌های زمان پرواز

دوربین سه‌بعدی زمان پرواز^۱ از تکنولوژی زمان پرواز جهت جمع‌آوری اطلاعات سه‌بعدی اشیاء موجود در صحنه استفاده می‌کند.

^۱ TOF Range-Imaging Cameras



شکل ۶-۲: عملکرد دوربین‌های زمان پرواز [۲۹]

عملکرد دوربین‌های زمان پرواز شبیه به عملکرد دوربین‌های معمولی است. پیکسل‌های دوربین زمان پرواز از مجموعه‌ای گیرنده‌ی لیزری یا نوری تشکیل شده و صحنه با استفاده از یک مشاهده، توسط ماتریسی از پیکسل‌ها شناسایی می‌شود. یعنی تمام پیکسل‌ها به صورت هم‌زمان، فاصله‌ی صحنه‌ی روبروی خود را اندازه‌گیری می‌کنند. تصویر ارائه شده، نقشه‌ی عمق محیط بوده و این نقشه فاصله بین آرایه‌ی حسگری و نقاط صحنه است. در شکل (۶-۲) نحوه عملکرد دوربین زمان پرواز نمایش داده شده است.

سیستم دوربین زمان پرواز از منبع نور مدوله شده در طیف فرکانسی مادون قرمز، از یک منتشر کننده‌ی نور در محیط و مجموعه‌ای از لنزها جهت ثبت نور منعکس شده از محیط تشکیل شده‌اند. نمونه‌ای از دوربین زمان پرواز ساخت شرکت پاناسونیک و تصویر خروجی آن در شکل (۷-۲) نمایش داده شده است.



ب



الف

شکل ۷-۲: الف - تصویر حاصله از دوربین زمان پرواز، ب - نمونه‌ای از دوربین زمان پرواز [۲۹]

۲-۵-۵- کینکت

در سال‌های اخیر، با فراگیر شدن استفاده از حسگر کینکت ماکروسافت، علاوه بر داده‌های دوبعدی رنگ، داده عمق که تخمینی از فاصله اشیاء موجود در تصویر است. به اطلاعات از محیط اطراف اضافه می‌شود. به عبارت دیگر، تصاویر عمق این امکان را می‌دهند که از ویژگی عمق در کنار دیگر ویژگی‌های تصویر استفاده شده و درک بهتری از محیط اطراف به دست آید. همچنین تصاویر عمق به شدت روشنایی حساس نبوده و در شرایطی که لازم است از محیط در شرایط مختلف نورپردازی مانند ساعات مختلف شبانه‌روز عکس‌برداری شود، این‌گونه تصاویر کمک بسزایی را به روش‌های موجود در این حوزه می‌کنند. دوربین کینکت در شکل (۲-۸) نمایش داده شده است.



شکل ۲-۸: دوربین کینکت^۱ [۳۰]

کینکت در سال ۲۰۱۰ در آمریکای شمالی جهت انجام بازی‌های کامپیوتری ارائه شد. طرح اولیه این دستگاه مربوط به شرکت پریم سنس^۲ بوده که در ابتدا برای پروژه‌ای با عنوان ناتال، برای استفاده در بازی‌های کامپیوتری بدون هیچ نوع کنترل کننده‌ای مطرح شد. در حال حاضر، حسگر کینکت فقط به عنوان یک ابزار بازی نبوده بلکه حسگری است که به توسعه‌دهندگان امکان ایجاد برنامه‌های کامپیوتری را می‌دهد.

۲-۵-۶- حسگر فاصله‌یاب لیزری

حسگر فاصله‌یاب لیزری به دو صورت دوبعدی و سه‌بعدی موجود است. در بخش‌های بعد به معرفی این دو نوع حسگر پرداخته می‌شود.

^۱ Kinect

^۲ Prime Sense

۲-۵-۶-۱- حسگر فاصله یاب لیزری دوبعدی

حسگر فاصله یاب لیزری دوبعدی یا اسکنر لیزری دوبعدی، یکی از حسگرهای مناسب جهت اندازه گیری فاصله است. این حسگر از جمله حسگرهای حساس به محرک خارجی بوده که به جای امواج فراصوت از نور لیزر جهت تصویرسازی محیط اطراف استفاده می کند. این حسگر از یک فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. فرستنده، نور لیزر را به هدف می تاباند و گیرنده نور را جذب کرده و هدف را تشخیص می دهد، به حسگر فاصله یاب لیزری گاهی رادار بهینه نیز گفته می شود. این حسگر با استفاده از زمان رفت و برگشت سیگنال به محاسبه ی فاصله می پردازد. سرعت انتشار سیگنال لیزر 0.3 متر در هر نانو ثانیه بوده و این بدان معناست که در حالت کلی، سرعت انتقال امواج در این حسگر یک میلیون برابر سرعت انتقال امواج در حسگر فراصوت است. این حسگر تقریباً در هر 100 میلی ثانیه یک خط از محیط اطراف را اسکن کرده که شامل اطلاعات فاصله و زاویه است. شکل (۲-۹) دو نمونه پرکاربرد از حسگر فاصله یاب دوبعدی را نمایش می دهد.



شکل ۲-۹: دو نمونه از فاصله یاب لیزری [۳۱]

۲-۵-۶-۲- حسگر فاصله یاب لیزری سه بعدی

اسکنر لیزری سه بعدی، از محیط تصویر 360 درجه با موقعیت تک تک پیکسل ها ایجاد می کند. به عبارت دیگر اسکنر لیزری، ابر نقاطی از محیط ایجاد می نماید. اساس کار این حسگر به این صورت است که اسکنر محیط را از بالا تا پایین اسکن می کند. این اسکن در دوران های مختلف تا اسکن کامل یک محیط تکرار می شود. این اسکنر برای هر نقطه از محیط موقعیت سه بعدی X, Y, Z را به صورت خودکار با توجه به فاصله و زاویه های اسکن، محاسبه می کند. از این اسکنر در ناوبری، تصویربرداری با

سرعت بالا و ردیابی و تصویربرداری زیر آب می‌توان بهره برد. نمونه‌ای از این اسکنرها در شکل (۲-۱۰) نمایش داده شده است.



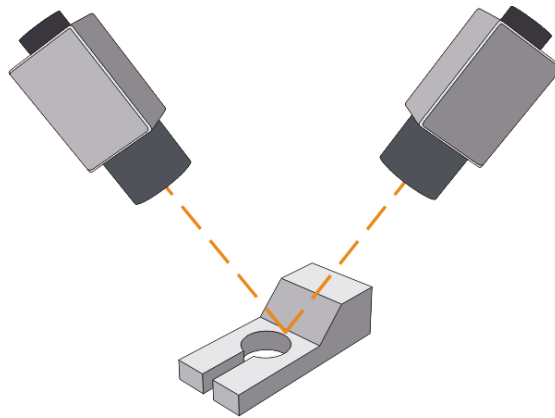
شکل ۲-۱۰: اسکنر لیزری سه‌بعدی [۳۱]

۲-۵-۷- سیستم بینایی چندگانه

بینایی استریو^۱، به معنای توانایی استخراج عمق، بر اساس تحلیل دو تصویر گرفته شده از زوایای مختلف یک صحنه است. بر اساس تحقیقات زیادی که در زمینه بینایی ماشین صورت گرفته است، بینایی استریو را عموماً بینایی دوچشمی [۳۲] نیز می‌گویند. حسگرهای بینایی استریو از دو یا چند دوربین جهت به دست آوردن اطلاعات از محیط استفاده می‌کنند. نمونه‌ای از این سیستم در شکل

^۱ Stereo Vision

(۱۱-۲) نشان داده شده است. در این سیستم هر دو دوربین تصاویر را ضبط می‌کنند. یک نقطه از فضا، در دو تصویر حاصل از دو دوربین در نظر گرفته می‌شود و در صورت کالیبره بودن دوربین‌ها (مشخص بودن انتقال و دوران دوربین‌ها نسبت به یکدیگر)، اطلاعات عمق آن نقطه به دست می‌آید.



شکل ۱۱-۲: سیستم بینایی استریو [۳۳]

۲-۵-۸- مزایا و معایب حسگرهای مورد استفاده در نقشه‌برداری سه‌بعدی

عامل مهم در نقشه‌برداری سه‌بعدی یافتن عمق است. پیدا کردن عمق برای ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی، با استفاده از حسگرهای گوناگون امکان‌پذیر است. در این بخش به مزایا و معایب هر کدام از حسگرها استفاده شده در نقشه‌برداری سه‌بعدی پرداخته می‌شود.

حسگرهای لیزری سه‌بعدی یکی از اولین حسگرهای مورد استفاده برای ایجاد ابر نقاط سه‌بعدی بوده اما این حسگرها دارای قیمت نسبتاً بالایی هستند. در اسکنرهای لیزرهای سه‌بعدی، از هم‌پوشانی نقاط در فریم‌های متوالی جهت ایجاد ابر نقاط استفاده می‌شود. مشکل اساسی تطبیق در حسگرهای لیزری، نبود اطلاعات بصری از نقاط است. عدم وجود اطلاعات بصری، تطبیق نقاط در فریم‌های متوالی را غیر قابل اعتماد می‌سازد. در این روش چون از اطلاعات فریم قبل در تخمین جهت و موقعیت حسگر استفاده می‌شود، در صورت وجود خطا، این خطا در هر مرحله جمع شده و موجب ایجاد خطای بیشتر در مراحل بعد خواهد شد.

دوربین‌های استریو نوع دیگری از حسگرها هستند که در نقشه‌برداری سه‌بعدی جهت کسب اطلاعات عمق استفاده می‌شوند. این حسگرها از اطلاعات بصری جهت ایجاد اطلاعات عمق استفاده

می‌کنند. با وجود اینکه استفاده از این حسگرها کم هزینه است، اما به دست آوردن اطلاعات عمق از دوربین استریو استاندارد در محیط‌های داخلی با مناطق تاریک یا کم بافت دشوار است. در کارهای اخیر از حسگرهای کینکت، جهت ایجاد نقشه‌های سه‌بعدی استفاده شده است. یکی از مشکلات مهم در استفاده از کینکت، حجم زیاد داده‌ها است که جهت پردازش داده‌های هر فریم به سیستمی با توان محاسباتی بالا نیاز است. از مشکلات دیگر این دستگاه می‌توان به عدم ارائه‌ی صحیح عمق در اجسامی که نور مادون قرمز را جذب می‌کنند، اشاره کرد.

۲-۶- نتیجه‌گیری

در این فصل، پس از آشنایی با مطالعات انجام گرفته در زمینه‌ی نقشه‌برداری سه‌بعدی و نقشه‌برداری سه‌بعدی و مکان‌یابی همزمان، انواع و عملکرد سنسورهای استفاده شده در بازسازی سه‌بعدی، کاربرد و محدودیت هر یک از سنسورها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص شد که سنسورهای لیزری دارای قیمت و دقت بالایی نسبت به سایر سنسورها هستند. همچنین سنسور کینکت دارای حجم اطلاعاتی بالا بوده که جهت پردازش این اطلاعات نیاز به پردازنده با توان محاسباتی بالا است.

فصل سوم

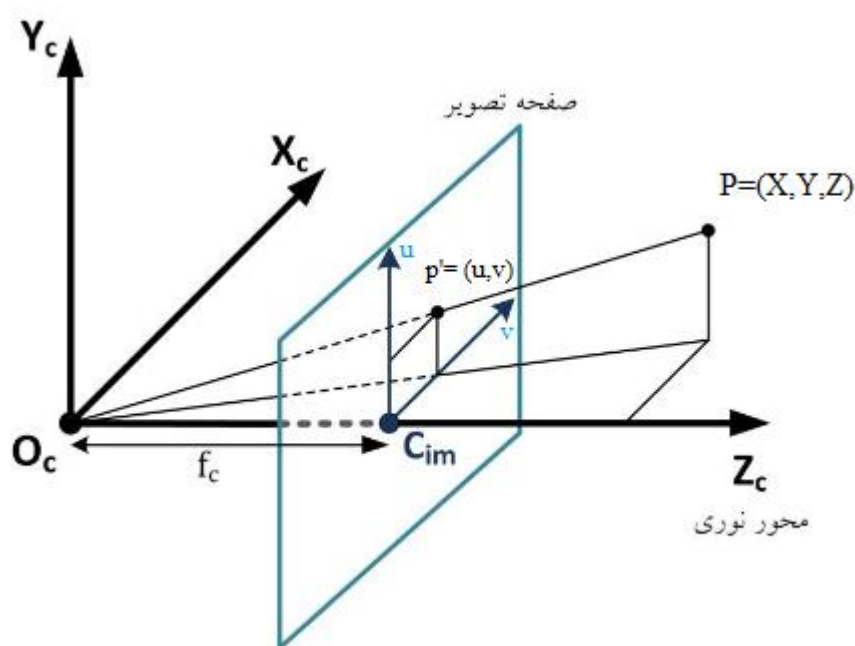
تئوری

۱-۳- مقدمه

یکی از مسائل مهم در بازسازی سه بعدی، یافتن رنگ نقاط اسکن شده توسط فاصله یاب است. در این فصل، پیدا کردن نگاشتی از دستگاه مختصات لیزر به دستگاه مختصات دوربین تشریح می شود.

۲-۳- مدل دوربین

ساده ترین مدل دوربین، مدل جعبه تاریک دوربین است. در این مدل نور منعکس شده از صحنه یا جسم پس از عبور از نقطه کانونی موجب ایجاد تصویر بر روی صفحه تصویر می شود. مدل جعبه تاریک دوربین سال ها قبل از اختراع دوربین، در سده های ۴ و ۵ توسط ارسطو و اقلیدس شرح داده شد. اساس کار مدل جعبه تاریک دوربین در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: هندسه تشکیل تصویر در صفحه تصویر [۳۳]

۳-۳- افکنش از مختصات جهانی به مختصات تصویر

با توجه به شکل (۱-۳)، برای نگاشت نقاط از مختصات جهانی $[X, Y, Z]^T$ به مختصات تصویر $[u, v]^T$ ، از رابطه (۴-۳) استفاده می شود. محور Z عمود بر صفحه دوربین و محورهای X و Y موازی با محورهای تصویر در نظر گرفته می شود. با استفاده از تشابه دو مثلث خواهیم داشت:

$$\frac{X}{Z} = \frac{u}{f} \quad (1-3)$$

$$\frac{Y}{Z} = \frac{v}{f} \quad (2-3)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

رابطه (۴-۳)، برای حالتی صدق می‌کند که مختصات جهانی بر روی مرکز دوربین قرار گیرد. یا به عبارتی، مرکز دوربین در $C = (0,0,0)$ باشد. اگر دوران و انتقال مرکز نوری دوربین نسبت به مختصات جهانی در نظر گرفته شود، مقیاس فاصله کانونی (f) یک نباشد و s_x, s_y اندازه‌ی افقی و عمودی پیکسل باشد، می‌توان رابطه (۵-۳) را نوشت. در این رابطه، s_θ اغتشاش غیر همگن^۲ است که معمولاً نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. در رابطه (۵-۳)، K ماتریس پارامترهای ذاتی دوربین، R ماتریس دوران دوربین و t بردار انتقال دوربین است [۳۱].

$$\underbrace{Z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix}}_U = \underbrace{\begin{bmatrix} f s_x & s_\theta & u_0 \\ 0 & f s_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_K \underbrace{\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix}}_{R|t} \underbrace{\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}}_Z \quad (5-3)$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-3)$$

در رابطه (۶-۳)، u_0, v_0 مرکز صفحه تصویر است.

۳-۳-۱- اعوجاج لنز

در لنز دوربین دو نوع اعوجاج وجود دارد [۳۴]:

۱- اعوجاج مماسی^۳

۲- اعوجاج شعاعی^۱

^۱ Sensor scale

^۲No diagonal distortion

^۳ Decentering errors

اعوجاج مماسی زمانی اتفاق می افتد که لنز کاملاً موازی صفحه تصویر نباشد. آن را می توان توسط دو پارامتر از ماتریس اعوجاج دوربین (رابطه (۷-۳)) مدل کرد. اعوجاج شعاعی در مرکز لنز صفحه تصویر صفر بوده و با حرکت به لبه ها افزایش می یابد. با ظهور دوربین های جدید، اعوجاج مماسی بسیار کاهش یافته است. ماتریس اعوجاج دوربین (kC)، به صورت ۵ پارامتر اعوجاج، که سه پارامتر k_{c1}, k_{c2}, k_{c3} پارامترهای اعوجاج شعاعی و k_{c4}, k_{c5} پارامترهای اعوجاج مماسی هستند، در نظر گرفته می شود. با در نظر گرفتن اعوجاج شعاعی و مماسی، افکنش از فضا به دوربین با استفاده از رابطه (۸-۳) قابل محاسبه است [۳۴]:

$$k_C = [k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}, k_{c4}, k_{c5}] \quad (7-3)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} (1 + D(r_{dist}, k)) + \begin{bmatrix} 2k_{c3}xy + k_{c4}(r_{dist}^2 + 2x^2) \\ k_{c3}(r_{dist}^2 + 2y^2) + 2k_{c4}xy \end{bmatrix} \quad (8-3)$$

$D(r_{dist}, k)$ بیانگر اعوجاج شعاعی است و با رابطه (۹-۳) تعریف می شود [۳۴]:

$$D(r_{dist}, k) = k_{c1}r_{dist}^2 + k_{c2}r_{dist}^4 + k_{c3}r_{dist}^6 \quad (9-3)$$

در رابطه (۹-۳)، شعاع اعوجاج (r_{dist}) از رابطه (۱۰-۳) به دست می آید:

$$r_{dist}^2 = x^2 + y^2 \quad (10-3)$$

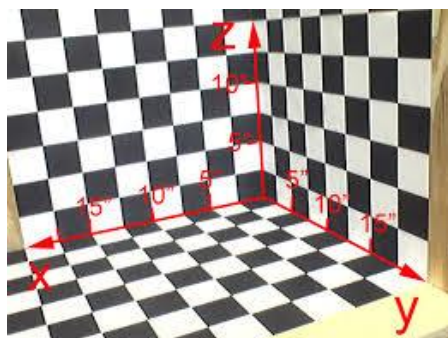
۳-۴- روش های کالیبراسیون دوربین

کالیبراسیون دوربین، یکی از بخش های مهم در بینایی سه بعدی 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 بخش های بعد روش های کالیبراسیون دوربین تشریح می شود.

۳-۴-۱- کالیبراسیون با استفاده از اجسام تک بعدی

در این روش از اشیاء تک بعدی مانند اشیاء نازک جهت کالیبره کردن استفاده می شود. در [۳۳]، از یک میله، شامل تعدادی نشانگر با فواصل معین جهت کالیبراسیون دوربین استفاده شده است.

¹ radial distortion



شکل ۳-۳: الگوی سه بعدی کالیبراسیون دوربین

۳-۵- کالیبراسیون دوربین با استفاده از اجسام دوبعدی با ابعاد مشخص

توضیحی مختصر در مورد سایر روش‌های موجود، در بخش‌های قبل ارائه شد. 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 ارائه شد [۳۵]. 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 [۳۷].

۳-۵-۱- یافتن نقاط متناظر در تصویر با نقاط واقعی

M تصویر $(I_1, I_2, \dots, I_M)$ در حالت‌های مختلف از صفحه کالیبراسیون گرفته می‌شود. برای هر تصویر N نقطه‌ای $(U_1, U_2, \dots, U_N)$ که نقاط متناظر با نقاط معلوم در دستگاه مختصات واقعی هستند، استخراج می‌شود. در هر صفحه شطرنجی مختصات گوشه‌های مربع‌های صفحه هستند، $X_j = [x_j \ y_j \ z_j]^T$ در دستگاه مختصات متصل به صفحه معلوم هستند. با استفاده از روش‌های گوشه‌یابی کنی^۱ یا هریس^۲، مختصات پیکسلی متناظر با نقاط $U_j = [u_j \ v_j \ w_j]^T$ محاسبه می‌شوند.

^۱ Canny Corner Detector

^۲ Harris Corner Detector

۳-۵-۲- محاسبه‌ی هموگرافی بین نقاط واقعی و پیکسل متناظر با این نقاط

هموگرافی (H)، نگاشتی بین نقاط واقعی و متناظر پیکسلی این نقاط در هر تصویر بوده و با استفاده از معادله (۱۱-۳) محاسبه می‌شود [۳۷]:

$$\begin{bmatrix} u_j \\ v_j \\ w_j \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11-3)$$

با نرمال‌سازی رابطه (۱۱-۳)، (منظور $\frac{v_i}{w_i}$ و $\frac{u_i}{w_i}$) ماتریس H با استفاده از حل معادله (۱۲-۳) پیدا می‌شود، H_{ij} درایه‌ی سطر i -ام و ستون j -ام ماتریس H است.

$$\begin{bmatrix} -x_j & -y_j & -1 & 0 & 0 & 0 & u_j x_j & u_j y_j & u_j \\ 0 & 0 & 0 & -x_j & -y_j & -1 & v_j x_j & v_j y_j & v_j \end{bmatrix} h = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12-3)$$

$$h = [H_{11} \ H_{12} \ H_{13} \ H_{21} \ H_{22} \ H_{23} \ H_{31} \ H_{32} \ H_{33}] \quad (13-3)$$

۳-۵-۲-۱- محدودیت پارامتر ذاتی

با توجه به ماتریس دوران صفحه کالیبراسیون به دوربین (R) و ماتریس هموگرافی (H)، محدودیت پارامتر ذاتی با رابطه‌ی (۱۴-۳) تعریف می‌شود (صفحه در $Z=0$ واقع شده است).

$$[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda K [r_1 \ r_2 \ t] \quad (14-3)$$

در رابطه (۱۴-۳)، r_i ستون‌های ماتریس دوران، t بردار انتقال، K ماتریس پارامترهای ذاتی دوربین، λ فاکتور مقیاس غیر صفر و h_i ستون‌های ماتریس هموگرافی هستند. با توجه به اینکه ماتریس دوران، ماتریسی یکامتعامد است، می‌توان دو شرط زیر را نوشت [۳۷]:

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (15-3)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \quad (16-3)$$

در روابط (۱۵-۳) و (۱۶-۳)، $K^{-T} K^{-1}$ برابر با B قرار داده می‌شود. B ماتریس متقارن است، بنابراین فقط ۶ درایه‌ی آن غیر تکراری است. با توجه به این مسئله، بردار b که از درایه‌های غیر تکراری ماتریس B تشکیل شده است، به‌صورت رابطه (۱۸-۳) تعریف می‌شود [۳۷]:

$$B = K^{-T} K^{-1} \quad (17-3)$$

$$b = [B_{11} \ B_{12} \ B_{22} \ B_{13} \ B_{23} \ B_{33}]^T \quad (18-3)$$

B_{ij} داریه‌ی سطر i -ام و ستون j -ام ماتریس B است. با توجه به قیود موجود، رابطه (۱۹-۳) تعریف می‌شود [۳۷]:

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (19-3)$$

$$v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}, h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1}, h_{i2}h_{j2}, \\ h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}, h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3}] \quad (20-3)$$

در رابطه‌ی (۲۰-۳)، با توجه به قیود (۱۵-۳) و (۱۶-۳)، هموگرافی (۱۹-۳) را می‌توان به صورت معادله (۲۱-۳) بیان کرد [۳۷]:

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (21-3)$$

۳-۵-۳- محاسبه پارامترهای ذاتی دوربین

با حل معادله (۲۱-۳)، بردار b به دست می‌آید. با استفاده از بردار b و در نظر گرفتن رابطه (۱۷-۳) عناصر ماتریس K که همان پارامترهای ذاتی دوربین است، با استفاده از روابط (۲۲-۳) تا (۲۷-۳) قابل محاسبه است [۳۷]:

$$v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \quad (22-3)$$

$$\lambda = B_{33} - \frac{[B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})]}{B_{11}} \quad (23-3)$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{B_{11}}\right)} \quad (24-3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\lambda B_{11}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}} \quad (25-3)$$

$$\gamma = -\frac{B_{12}\alpha^2\beta}{\lambda} \quad (26-3)$$

$$u_0 = \frac{\gamma v_0}{\alpha - \frac{B_{13}\alpha^2}{\lambda}} \quad (27-3)$$

۳-۶- کالیبراسیون دوربین و فاصله یاب لیزری با روش پلس و ژانگ^۱

پلس و ژانگ در سال ۲۰۰۳ روشی را جهت کالیبراسیون دوربین ارائه دادند [۳۸]. تکنیک ارائه شده، نیازمند این است که صفحه کالیبراسیون در حالت‌های مختلف، قابل مشاهده برای دوربین و فاصله یاب باشد و داده‌ها به صورت همزمان توسط دوربین و فاصله یاب لیزری از صفحه کالیبراسیون گرفته شود. با استفاده از تصویر و اسکن گرفته شده از صفحه کالیبراسیون، جهت و موقعیت دوربین و فاصله یاب 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 (۳-۴) نمایش داده شده است. در این بستر، حسگر فاصله یاب لیزری و دوربین جهت اسکن محیط بر روی ربات متحرک قرار گرفته‌اند.



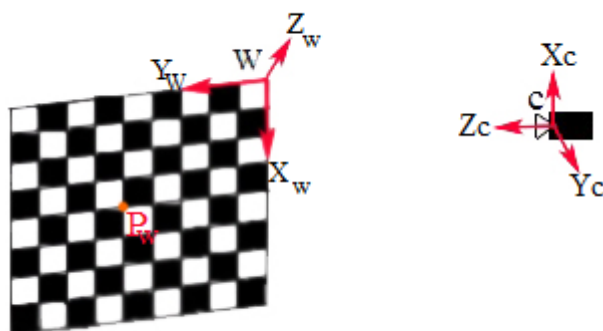
شکل ۳-۴: دوربین و فاصله یاب لیزری نصب شده بر روی ربات متحرک [۳۸]

۳-۶-۱- معادلات پایه

رابطه‌ی بین مختصات یک نقطه در دستگاه مختصات صفحه $(P_w = [X_w \ Y_w \ Z_w]^T)$ و مختصات آن در دستگاه دوربین $(P_c = [X_c \ Y_c \ Z_c]^T)$ با توجه به شکل (۳-۵) به صورت زیر

^۱ Pless and zhang

بیان می‌شود:



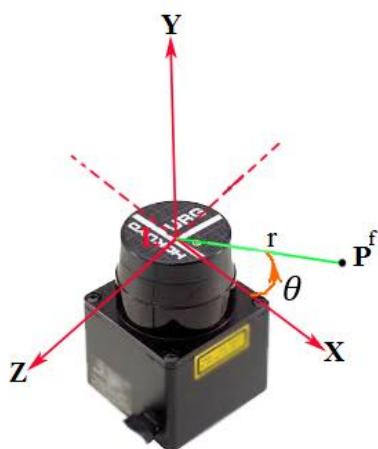
شکل ۳-۵: قرارگیری صفحه کالیبراسیون و دوربین در فضا

$$P_c = RP_w + t \quad (۲۸-۳)$$

در رابطه (۲۸-۳)، R ماتریس ۳ در ۳ دوران و t بردار انتقال دوربین است. در بخش (۳-۴)، افکنش از مختصات جهانی به مختصات تصویر به صورت کامل توضیح داده شد. 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 زیر قابل بیان است:

$$p^f = [x, 0, z]^T \quad (۲۹-۳)$$

دستگاه مختصات فاصله‌یاب، در شکل (۳-۶) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۶: دستگاه مختصات فاصله‌یاب لیزری

در شکل (۳-۶)، P^f نقطه‌ای در فضا اسکن شده توسط فاصله‌یاب، r فاصله‌ی P^f تا دستگاه فاصله‌یاب

لیزری و θ زاویه‌ی اندازه‌گیری است.

با توجه به شکل (۳-۶)، رابطه‌ی بین فاصله و زاویه‌ی هر نقطه در دستگاه متصل به فاصله‌یاب به

صورت رابطه (۳-۳۰) قابل بیان است:

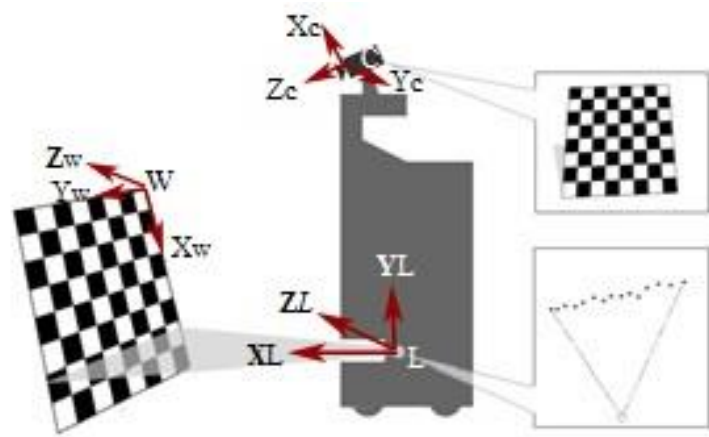
$$\begin{bmatrix} x \\ 0 \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(\theta) \\ 0 \\ -r \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (۳-۳۰)$$

هر نقطه‌ی P بر روی صفحه کالیبراسیون در مختصات دوربین را با استفاده از رابطه (۳-۳۱) در دستگاه مختصات فاصله‌یاب لیزری می‌توان بیان کرد [۳۶]:

$$P^f = \phi P_c + \Delta \quad (۳-۳۱)$$

در رابطه (۳-۳۱)، ϕ یک ماتریس ۳ در ۳ 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. در ادامه نحوه‌ی کالیبراسیون دوربین و فاصله‌یاب لیزری شرح داده می‌شود.

در این روش کالیبراسیون، صفحه کالیبراسیون باید قابل مشاهده توسط دوربین و فاصله‌یاب لیزری باشد. شکل (۳-۷) نحوه‌ی صحیح قرارگیری صفحه در مقابل سیستم را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۷: نحوه‌ی قرارگیری صفحه کالیبراسیون در مقابل سیستم [۳۸]

۳-۶-۲- محاسبه‌ی جهت و موقعیت دوربین به فاصله‌یاب لیزری

صفحه‌ی کالیبراسیون، صفحه‌ای با $Z_w = 0$ 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.

۳-۶-۳- فاصله‌ی یک نقطه در فضا از صفحه

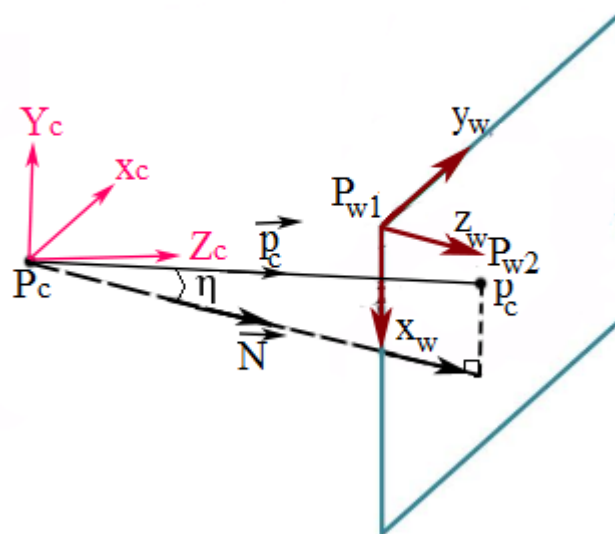
فرض کنید p یک نقطه در فضا باشد. فاصله‌ی این نقطه از صفحه‌ای با معادله‌ی (۳۲-۳) با استفاده از رابطه‌ی (۳۳-۳) بیان می‌شود.

$$ax + by + cz = d \quad p = [x_1 \quad y_1 \quad z_1]^T \quad (32-3)$$

$$D = \left| \frac{d - ax_1 - by_1 - cz_1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right| \quad (33-3)$$

۳-۶-۴- پیدا کردن رابطه بین حالت‌های مختلف صفحه و نقاط فاصله‌یاب

بردار نرمال صفحه (بردار یکه‌ی Z_w در شکل (۸-۳))، برداری در نظر گرفته می‌شود که از دو نقطه‌ی P_{w0} و P_{w1} در مختصات صفحه می‌گذرد.



شکل ۸-۳: نمایش فاصله صفحه‌ی الگو تا دوربین در دستگاه مختصات دوربین

$$P_{w1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, P_{w0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34-3)$$

دو نقطه P_{w1} و P_{w0} در دستگاه مختصات دوربین (P_c) ، با رابطه‌ی (35-3) تا (37-3) بیان می‌شوند:

$$P_c = RP_w + t \quad (35-3)$$

$$P_{c0} = [R_1 \quad R_2 \quad R_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + t \quad (36-3)$$

$$P_{c1} = [R_1 \quad R_2 \quad R_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + t$$

$$P_{c0} = t \quad (37-3)$$

$$P_{c1} = R_3 + t$$

در رابطه (36-3)، R_i ستون i -ام ماتریس دوران و t ماتریس انتقال صفحه کالیبراسیون به دوربین است.

بردار نرمال صفحه (N_p) ، در دستگاه مختصات دوربین با رابطه‌ی (38-3) بیان می‌شود.

$$N_p = P_{c1} - P_{c0} \quad (38-3)$$

$$N_p = R_3 + t - t = R_3 \quad (39-3)$$

با استفاده از بردار نرمال صفحه کالیبراسیون و یک نقطه مانند P_{c0} روی صفحه کالیبراسیون، پارامتر d صفحه‌ی کالیبراسیون در دستگاه مختصات دوربین را می‌توان با رابطه‌ی (40-3) بیان کرد. با داشتن این پارامتر معادله‌ی صفحه کالیبراسیون با استفاده از بردار نرمال صفحه و یک نقطه مانند p_{c0} معادله‌ی صفحه تعریف می‌شود.

$$R_3 \cdot t = d \quad (40-3)$$

با داشتن معادله‌ی صفحه کالیبراسیون و مختصات مرکز دوربین (P_{c0}) در دستگاه مختصات دوربین،

فاصله‌ی مرکز دوربین از صفحه کالیبراسیون با استفاده از رابطه‌ی (41-3) تعریف می‌شود [38]:

$$D = \left| \frac{R_3 \cdot t}{\|R_3\|} \right| = R_3 \cdot t = R_3^T t \quad (41-3)$$

$$P_{co} = [0 \quad 0 \quad 0]$$

یک بردار در فضا را می‌توان با داشتن اندازه و جهت آن بیان 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 (۳-۴۲) تعریف می‌شود [۳۸]:

$$N = R_3(R_3^T t) \quad (۳-۴۲)$$

هر نقطه (P^f) در دستگاه مختصات لیزر را می‌توان با استفاده از رابطه (۳-۴۳) در دستگاه مختصات دوربین نوشت [۳۸]:

$$P_c = \phi^{-1}(P^f - \Delta) \quad (۳-۴۳)$$

اندازه‌ی بردار P_c در شکل (۳-۸)، طبق معادله‌ی (۳-۴۴) بدست می‌آید و ضرب داخلی دو بردار نیز با معادله‌ی (۳-۴۵) بیان می‌شود:

$$\|N\| = \|p_c\| \cos(\eta) \quad (۳-۴۴)$$

$$N \cdot P_c = \|N\| \|p_c\| \cos(\eta) \quad (۳-۴۵)$$

در روابط بالا η ، زاویه‌ی بین دو بردار p_c, N است. با جایگذاری رابطه (۳-۴۴) در (۳-۴۵)، ارتباط بین بردار صفحه و بردار p_c به صورت رابطه‌ی (۳-۴۶) نمایش داده می‌شود [۳۸]:

$$N \cdot P_c = \|N\|^2 \quad (۳-۴۶)$$

با توجه به نگاشت هر نقطه در دستگاه مختصات لیدار به دستگاه مختصات دوربین (معادله (۳-۴۲))، رابطه بین بردار صفحه کالیبراسیون و نقاط لیزر طبق معادله‌ی (۳-۴۷) تعریف می‌شود [۳۸]:

$$N \cdot \phi^{-1}(P^f - \Delta) = \|N\|^2 \quad (۳-۴۷)$$

۳-۷- حل مسأله کالیبراسیون دوربین و لیزر

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 به دست می آیند.

۳-۷-۱- محاسبه‌ی پارامترهای اولیه موقعیت و جهت دوربین

در این بخش فرض می‌شود که پارامترهای داخلی و خارجی دوربین با استفاده از کالیبراسیون دوربین (روش ژنگ) به دست آمده و پارامتر صفحه کالیبراسیون نیز طبق رابطه‌ی (۴-۲۳) تعریف شده‌اند. تمام نقاط لیزر بر روی صفحه کالیبراسیون در سیستم مختصات لیزر را می‌توان به صورت $\hat{p}_f = [X, Z, 1]^T$ نوشت. آنگاه رابطه را با توجه به معلومات می‌توان به صورت معادله‌ی (۳-۵۰) تعریف کرد:

$$P^f = [x, 0, z]^T \quad (۳-۴۸)$$

$$\Delta = [d_1, d_2, d_3]^T \quad (۳-۴۹)$$

$$p_f - \Delta = \begin{bmatrix} x - d_1 \\ -d_2 \\ z - d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d_1 \\ 0 & 0 & -d_2 \\ 0 & 1 & -d_3 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ z \\ 1 \end{bmatrix}}_{\hat{p}_f} \quad (۳-۵۰)$$

در رابطه بالا پارامترهای بردار انتقال دوربین به فاصله‌یاب با d_1, d_2, d_3 نمایش داده می‌شود. با استفاده از رابطه (۳-۵۰)، رابطه (۳-۴۷) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۵۱) بیان کرد.

$$\underbrace{N \cdot \phi^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} x \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \|N\|^2 \quad (۳-۵۱)$$

در رابطه (۳-۵۱)، M ماتریس 3×3 در 3 ، به منظور انتقال نقاط از دستگاه مختصات متصل به فاصله‌یاب لیزری به دستگاه مختصات متصل به دوربین و N بردار بیان کننده‌ی صفحه در سیستم مختصات دوربین است.

رابطه (۳-۵۱) را می‌توان با استفاده از پارامترهای ماتریس M و N به صورت رابطه (۳-۵۲) نیز نوشت:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \|N\|^2 \quad (۳-۵۲)$$

با در نظر گرفتن یک نقطه لیدار (فاصله‌یاب لیزری) بر روی صفحه کالیبراسیون، رابطه (۳-۵۲) به

رابطه (۵۳-۳) تبدیل می‌شود [۳۸]:

$$a.h = ||N||^2 \quad (۵۳-۳)$$

$$a = [n_1x, n_1z, n_1, n_2x, n_2z, n_2, n_3x, n_3z, n_3] \quad (۵۴-۳)$$

$$m = [M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{21}, M_{22}, M_{23}, M_{31}, M_{32}, M_{33}]^T \quad (۵۵-۳)$$

در روابط بالا n_1, n_2, n_3 پارامترهای بردار صفحه (N) هستند. با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف قرار گرفتن صفحه کالیبراسیون در فضا و تمام نقاط لیدار (p_{Total}^f) بر روی هر حالت صفحه کالیبراسیون، معادله (۵۳-۳) در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$A.m = D \quad (۵۶-۳)$$

در معادله (۵۶-۳)، A یک ماتریس n در ۹ است که n تعداد نقاط روی صفحه در تعداد حالت‌های صفحه کالیبراسیون و D یک بردار ستونی n در یک است. اگر تعداد سطرهای ماتریس A بیشتر از ۹ باشد، بردار m با روش حداقل مربعات، رابطه (۵۷-۳) قابل تخمین است [۳۸]:

$$m = (AA^T)^{-1}A^TB \quad (۵۷-۳)$$

۸-۳- محاسبه‌ی دوران و موقعیت دوربین به فاصله‌یاب لیزری

ماتریس M با توجه به معادله (۵۱-۳) به صورت معادله‌ی (۵۸-۳) تعریف می‌شود:

$$M = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_3]^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \\ 0 & 0 & -\Delta \\ 0 & 1 & \end{bmatrix} \quad (۵۸-۳)$$

منظور از ϕ_i ستون i -ام ماتریس ϕ است. ϕ ماتریس دوران بوده و معکوس و ترانزپوز آن برابرند. با در نظر گرفتن این نکات و معادله‌ی (۵۸-۳) می‌توان نوشت:

$$M_1 = \phi^T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۵۹-۳)$$

$$M_2 = \phi^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۶۰-۳)$$

$$M_3 = \phi^T (-\Delta) \quad (۶۱-۳)$$

در رابطه (۵۹-۳) تا (۶۰-۳)، M_i ستون i -ماتریس M و ϕ^T ترانزپوز ماتریس ϕ است. با استفاده از دو

رابطه‌ی (۳-۵۹) و (۳-۶۰)، دوران دوربین به فاصله‌یاب لیزری قابل محاسبه خواهد بود [۳۶]:

$$\phi = [M_1, -(M_1 \times M_2), M_2]^T \quad (۳-۶۲)$$

به طریق مشابه طبق معادله (۳-۶۱)، رابطه انتقال دوربین به فاصله‌یاب (Δ) را می‌توان با رابطه (۳-۶۳) محاسبه کرد [۳۶]:

$$\Delta = -[M_1, -(M_1 \times M_2), M_2]^T M_3 \quad (۳-۶۳)$$

۳-۸-۱- نزدیک‌ترین ماتریس یکامتعامد به ماتریس دوران محاسبه شده

داده‌های دریافت شده از دوربین و فاصله‌یاب لیزری دارای نویز هستند. بنابراین این امکان وجود دارد که ماتریس دوران دوربین به فاصله‌یاب (ϕ) محاسبه شده، خاصیت ماتریس دوران یعنی یکامتعامد بودن را نداشته باشد. با در نظر گرفتن این ماتریس به عنوان شرایط اولیه، ممکن است که بهینه‌سازی غیرخطی همگرا نشود؛ بنابراین جهت ایجاد شرایط اولیه‌ی مناسب، اقدام به محاسبه‌ی نزدیک‌ترین ماتریس دوران به ماتریس دوران محاسبه شده می‌شود.

نزدیک‌ترین ماتریس یکامتعامد به ماتریس محاسبه شده، از حداقل‌سازی نرم فریب‌نیوس (رابطه‌ی (۳-۶۵)) با شرط یکامتعامد بودن محاسبه می‌شود. نرم فریب‌نیوس فاصله‌ی بین دو ماتریس را بیان می‌کند [۳۴].

$$\begin{cases} \min_{\phi, \hat{\phi}} \|\phi - \hat{\phi}\|_f^2 \\ \text{subject } \hat{\phi} \hat{\phi}^T - I = 0 \end{cases} \quad (۳-۶۴)$$

مربع نرم فریب‌نیوس ارائه شده در معادله (۳-۶۴) به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود.

$$\|\phi - \hat{\phi}\|_f^2 = \text{Trace}((\phi - \hat{\phi})^T (\phi - \hat{\phi})) \quad (۳-۶۵)$$

در رابطه (۳-۶۵)، Trace جمع تک تک المان‌های قطر اصلی ماتریس $(\phi - \hat{\phi})^T (\phi - \hat{\phi})$ است. با استفاده از ضرایب لاگرانژ مسأله بهینه‌سازی (۳-۶۵)، به صورت معادله (۳-۶۶) تغییر داده می‌شود [۳۴]:

$$\min_{\Lambda, \hat{\phi}} \text{Trace}((\phi - \hat{\phi})^T (\phi - \hat{\phi})) + \text{Trace}(\Lambda(\hat{\phi}^T \hat{\phi} - I)) \quad (۳-۶۶)$$

که Λ یک ماتریس قطری ۳ در ۳ است که عناصر قطر اصلی آن ضرایب لاگرانژ هستند. با مشتق‌گیری از معادله (۶۶-۳) بر اساس Λ و $\hat{\Phi}$ و مساوی صفر قرار دادن رابطه، خواهیم داشت:

$$2(\Phi - \hat{\Phi}) + 2\Phi\Lambda = 0 \quad (۶۷-۳)$$

با توجه به معادله‌ی (۶۷-۳)، نزدیک‌ترین ماتریس دوران به ماتریس محاسبه شده‌ی Φ با استفاده از رابطه (۷۱-۳) قابل بیان است [۳۴]:

$$\Phi = \hat{\Phi}(I + \Lambda) \quad (۶۸-۳)$$

$$(\Phi^T \Phi)^{1/2} = (I + \Lambda) \quad (۶۹-۳)$$

$$\hat{\Phi} = \Phi(I + \Lambda)^{-1} \quad (۷۰-۳)$$

$$\hat{\Phi} = \Phi(\Phi^T \Phi)^{-1/2} \quad (۷۱-۳)$$

قسمت دوم در رابطه (۷۱-۳)، به صورت رابطه (۷۲-۳) نیز قابل تعریف است [۳۶].

$$(\Phi^T \Phi)^{-1/2} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} e_1 e_1^T + \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} e_2 e_2^T + \frac{1}{\sqrt{\lambda_3}} e_3 e_3^T \quad (۷۲-۳)$$

در رابطه (۷۲-۳)، e_i بردار ویژه و λ_i مقادیر ویژه‌ی ماتریس $(\Phi^T \Phi)$ هستند.

۹-۳- بهینه‌سازی غیرخطی

پارامترهای جهت و انتقال از حداقل‌سازی فاصله‌ی جبری ایجاد شده و ارتباطی به اندازه‌گیری‌ها ندارند. این پارامترها با استفاده از حداقل‌سازی فاصله‌ی اقلیدسی نقاط لیزر به صفحه کالیبراسیون (رابطه (۴۷-۳)) اصلاح می‌شوند. با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف قرارگیری صفحه کالیبراسیون در فضا، مسأله‌ی بهینه‌سازی (۷۳-۳) ایجاد می‌شود [۳۸]:

$$[\Delta \quad \phi] = \min_{\Delta^*, \phi^*} \sum_i \sum_j \left(\frac{N_i}{||N_i||} (\phi^{*-1}(P_{ij}^f - \Delta^*)) - ||N_i|| \right)^2 \quad (۷۳-۳)$$

در رابطه (۷۳-۳)، ϕ و Δ باید به گونه‌ای تعیین شوند که رابطه، به ازای این ϕ و Δ حداقل شود. در رابطه (۷۳-۳)، N_i پارامتر صفحه کالیبراسیون، در حالت i -ام، P_{ij}^f نقطه‌ی i -ام اسکن شده از صفحه کالیبراسیون در حالت i -ام قرارگیری صفحه کالیبراسیون است.

جهت بهینه کردن رابطه (۳-۷۳)، از الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی لوببرگ مارکوارد، استفاده می‌شود. این الگوریتم به حدس اولیه از پارامترهای ϕ و Δ نیازمند است. این پارامترها با توجه به توضیحات بخش (۳-۵) محاسبه می‌شوند.

۳-۹-۱- روش بهینه‌سازی حداقل مربعات غیرخطی روش گاوس-نیوتن

اگر تابع هدف (f) دارای ساختار درجه دوم باشد^۱. از روش‌های بهینه‌سازی حداقل مربعات استفاده می‌شود [۳۹].

$$F(x) = \sum_{i=1}^n f_i^2(x) \quad (۳-۷۴)$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (۳-۷۵)$$

اگر تابع هدف (f)، تابع خطی از x باشد، آن‌گاه با حداقل مربعات خطی سرو کار داریم و اگر f تابع غیرخطی از x باشد، از روش حداقل مربعات غیرخطی استفاده می‌شود [۳۹]:

$$f = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad (۳-۷۶)$$

$$F(x) = \sum_{i=1}^n f_i^2(x) = f^T f \quad (۳-۷۷)$$

با توجه به تعریف (۳-۷۷) ژاکوبین را می‌توان به صورت رابطه (۳-۷۸) نوشت [۳۹]:

$$J = \left[\frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \right]_{N \times n} \quad (۳-۷۸)$$

هسین نیز با استفاده از رابطه‌ی (۳-۷۹) بیان می‌شود:

$$H \approx 2J^T J \quad (۳-۷۹)$$

در روش نیوتن-گاوس، با استفاده از رابطه‌ی تکرار زیر می‌توان متغیر بهینه را به دست آورد [۳۹].

^۱ quadratic

$$x_i = x_{i-1} - \alpha_i (J_{i-1}^T J_{i-1})^{-1} J_{i-1}^T f_{i-1} \quad (۸۰-۳)$$

در رابطه (۸۰-۳)، α_i از روش جستجوی خط، رابطه (۸۱-۳) محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$\alpha_i = \frac{\nabla f(x_i)^T \nabla f(x_i)}{\nabla f(x_i)^T H f(x_i) \nabla f(x_i)} \quad (۸۱-۳)$$

۳-۹-۲- روش لونبرگ مارکوارد

مشکل روش گاوس-نیوتن معکوس ناپذیربودن ماتریس $J^T J$ است. برای حل این مشکل از تکنیک تنظیم در بهینه‌سازی استفاده می‌شود. افزودن ضریبی از ماتریس همانی روش گاوس-نیوتن را به روش لونبرگ مارکوارد تبدیل می‌کند [۳۹].

$$x_i = x_{i-1} - \alpha_i (J_{i-1}^T J_{i-1} + \gamma_i I_n)^{-1} J_{i-1}^T f_{i-1} \quad (۶۹-۳)$$

$\gamma_i I_n$ مشخص کننده‌ی یک تغییر جهت با اندازه کوچک است. برای تعیین γ_i باید توجه کنیم که γ_i هر چه کوچک‌تر باشد، بهتر است. اگر A به صورت زیر تعریف شود [۳۹]:

$$A_{n \times n} = J_i^T J_i \quad (۸۳-۳)$$

با تجزیه A خواهیم داشت [۳۹]:

$$A = V D V^{-1} \quad (۷۰-۳)$$

$$A = V D V^{-1} \quad (۸۵-۳)$$

در رابطه (۸۵-۳)، D ماتریس قطری مقادیر ویژه و V ماتریس بردار ویژه متناظر A است. با استفاده از شرط قرار گرفتن γ_i بین کوچکترین و بزرگترین مقدار ویژه، γ_i به اندازه‌ای بزرگ انتخاب می‌شود که ماتریس A از وضعیت وارون‌ناپذیری بیرون آید [۳۹].

در این تحقیق، از روش تشریح شده جهت به دست آوردن پارامترهای بهینه جهت و موقعیت دوربین نسبت به فاصله‌یاب استفاده شده است.

۳-۱۰- ردیابی سه‌بعدی اجسام صلب توسط دوربین

ردیابی اپتیکی جسم عبارت است از مشخص کردن مکان و جهت جسم با استفاده از سنسورهای

نوری، زمانیکه سنسور یا جسم حرکت می‌کند. روش‌های متنوعی جهت ردیابی اجسام صلب وجود دارد. از این روش‌ها می‌توان به ردیابی دوبعدی و ردیابی سه‌بعدی جسم اشاره کرد. منظور از ردیابی دوبعدی جسم، تخمین وضعیت جسم در فضای دوبعدی و بطور مشابه منظور از ردیابی سه‌بعدی تخمین موقعیت جسم در فضای سه‌بعدی است.

هدف از ردیابی سه‌بعدی جسم، تخمین دوران و انتقال دستگاه مختصات متصل به جسم نسبت به دستگاه مختصات متصل به دوربین است.

۳-۱۰-۱- نحوه محاسبه‌ی پارامترهای وضعیت جسم صلب در فضا

یک جسم صلب با هندسه‌ی معلوم در مختصات جهانی مفروض است. مختصات کلیه نقاط این جسم نسبت به دستگاه مختصات متصل به جسم همواره ثابت است. جهت بیان مختصات یک نقطه X_0 از جسم صلب در یک دستگاه مختصات دلخواه X_G ، از رابطه (۳-۸۶) استفاده می‌شود [۴۰].

$$X_G = RX_0 + T \quad (۳-۷۱)$$

در رابطه (۳-۸۶)، R ماتریس 3×3 دوران و T بردار 3×1 انتقال در دستگاه مختصات متصل به جسم صلب نسبت به دستگاه مختصات G است. جهت تعیین وضعیت سه‌بعدی جسم صلب باید دوران و انتقال جسم محاسبه شود. ماتریس انتقال دستگاه مختصات متصل به جسم نسبت به دستگاه مختصات دلخواه، دارای سه پارامتر بوده و ماتریس دوران دستگاه جسم به دستگاه متصل به دوربین نیز دارای ۹ پارامتر است. در کل ۱۲ پارامتر مجهول در رابطه (۳-۸۶) موجود است. با موجود بودن حداقل ۶ نقطه‌ی معلوم روی جسم صلب می‌توان ماتریس دوران و بردار انتقال را محاسبه کرد. استفاده از ۹ پارامتر برای توصیف ماتریس دوران مناسب نیست. با استفاده از زوایای اولر می‌توان ماتریس دوران را با سه پارامتر (ρ_1, ρ_2, ρ_3) که به ترتیب دوران حول محور x ، y و z هستند، بیان کرد. با استفاده از زوایای اولر، پارامترهای ماتریس دوران از ۹ به ۳ پارامتر کاهش پیدا کرده و مجموع پارامترهای مجهول به ۶ پارامتر کاهش می‌یابند. حال با استفاده از سه نقطه‌ی معلوم بر روی جسم

صلب می‌توان با استفاده روش‌های حداقل مربعات (LS) یا حداقل مربعات تکراری (ILS) یا فیلتر کالمن، موقعیت و جهت دستگاه متصل به جسم را نسبت به سایر دستگاه‌ها به‌دست آورد. تخمین وضعیت جسم با استفاده از دوربین، نیازمند داشتن سه نقطه‌ی معلوم بر روی جسم صلب و مختصات پیکسلی متناظر با این نقاط در تصویر دوربین است. با استفاده از روش ارائه شده در [۳۱]، می‌توان جهت و مکان جسم را با استفاده از دوربین با معادله‌ی (۸۷-۳) بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (R_0 X_{0i} + T_0) ([0 \quad 0 \quad 1] (R_0 X_0 + T_0))^{-1} \quad (87-3)$$

در معادله (۸۷-۳)، $\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}$ مختصات نرمال [۳۱] متناظر با نقاط معلوم بر روی جسم صلب، T_0 انتقال و R دوران محور متصل به جسم صلب به دوربین است.

۳-۱۱- نتیجه‌گیری

در این فصل، جهت ایجاد بازسازی سه‌بعدی محیط، ابتدا مفاهیم پایه مانند افکنش نقاط واقعی به صفحه تصویر دوربین، مدل دوربین و انواع روش‌های کالیبره کردن دوربین مورد مطالعه قرار گرفت. یکی از مسائل مهم جهت بازسازی سه‌بعدی محیط همراه با بافت، پیدا کردن نگاشتی بین دستگاه مختصات فاصله‌یاب و دوربین است. در بخش کالیبراسیون خارجی دوربین به فاصله‌یاب، کالیبراسیون دوربین به فاصله‌یاب لیزری با استفاده از روش ارائه شده توسط پلس تحلیل و بررسی شد. با توجه به استفاده از ربات متحرک جهت بازسازی سه‌بعدی محیط، در بخش ردیابی سه‌بعدی اجسام صلب با استفاده از دوربین، راهکاری موثر و رایج جهت مکان‌یابی ربات در محیط تشریح شد.

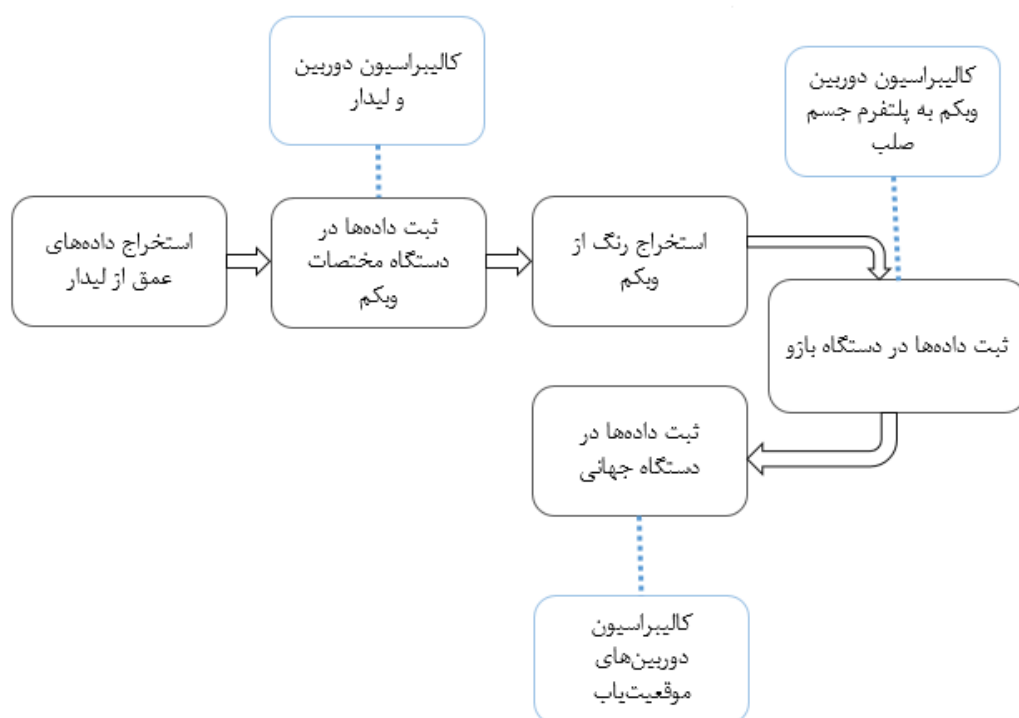
فصل چهارم

اجرای نقشه برداری سه بعدی

در محیط آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

در این فصل به نحوه کالیبراسیون دوربین نسبت به فاصله‌یاب، کالیبره کردن دوربین‌های موقعیت‌یاب، کالیبره کردن دوربین وبکم نصب شده نسبت به مختصات روی زمین اتاق و نحوه‌ی اجرای بازسازی سه‌بعدی محیط پرداخته می‌شود. مراحل بازسازی سه‌بعدی محیط با استفاده از فاصله‌یاب دوبعدی لیزری و دوربین در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: مراحل بازسازی سه‌بعدی

۴-۲- تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه‌بعدی

در این تحقیق از تجهیزات زیر جهت بازسازی سه‌بعدی محیط داخلی، همراه با بافت استفاده شد:

۱- ربات متحرک (YOUBOT) شرکت کوکا

۲- دو دوربین ثابت در اتاق و بستر نصب شده روی ربات جهت موقعیت‌یابی ربات متحرک

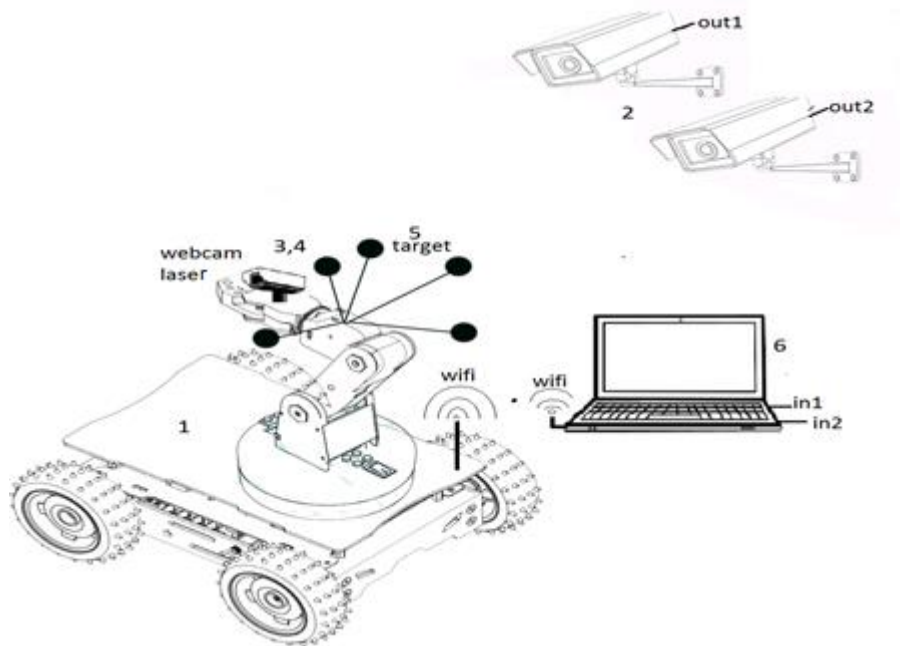
۳- دوربین وبکم نصب شده بر روی ربات، جهت تصویربرداری از صحنه

۴- فاصله‌یاب شرکت هوکیو، جهت استخراج عمق از المان‌های موجود در صحنه

۵- بستر جسم صلب با ابعاد مشخص نصب شده بر روی بازوی ربات جهت موقعیت‌یابی ربات

۶- کامپیوتر جهت ثبت موقعیت ارائه شده از دو دوربین و دریافت اطلاعات از ربات

در شکل (۲-۴) تجهیزات مورد استفاده در بازسازی سه‌بعدی نمایش داده شده است.



شکل ۲-۴: تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه‌بعدی

۴-۳- ارتباط بین تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی سه‌بعدی

از ارتباط بی‌سیم جهت کنترل بازو و حرکت ربات استفاده شده است. اطلاعات فاصله گرفته شده از فاصله‌یاب لیزری و اطلاعات بافت دریافت شده از دوربین، از طریق همین ارتباط بی‌سیم به سیستم اصلی ارسال می‌شود. دو دوربین ثابت موجود در صحنه نیز با استفاده از ارتباط شبکه، با سیم به کامپیوتر اصلی موجود در محیط متصل شده‌اند. نحوه‌ی ارتباط بین قسمت‌های مختلف در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است.

۴-۴- ربات متحرک شرکت کوکا (YOUBOT)

ربات متحرک کوکا به‌صورت یک بستر متن‌باز جهت تحقیقات علمی آموزشی توسط شرکت کوکا طراحی و ساخته شد. ربات از یک بازوی ۵ درجه آزادی و یک بستر متحرک مجهز به یک کامپیوتر کوچک تشکیل شده است. کامپیوتر ربات دارای پورت شبکه‌ی زمان حقیقی، چند پورت USB و

خروجی تصویر است. کلیه موتورهای مورد استفاده در این ربات، موتور براشلس شرکت ماکسول موتور هستند که موجب حرکت بستر متحرک ربات به صورت انتقالی و دورانی می‌شوند. شکل (۳-۴) تصویری از این ربات را نمایش می‌دهد [۳۹].



شکل ۳-۴: ربات متحرک کوکا (YOU BOT) [۴۱]

۴-۵- سیستم موقعیت‌یاب جهانی

منظور از دستگاه مختصات جهانی، دستگاه مختصاتی است، که با آن می‌توان مکان هر نقطه در اتاق را با استفاده از مکان عمودی، افقی و ارتفاع نمایش داد؛ همچنین منظور از دستگاه مختصات محلی، دستگاه مختصاتی است که بر روی هر یک از سیستم‌ها مانند دوربین، فاصله‌یاب و ربات متحرک واقع شده است. سیستم موقعیت‌یابی جهانی مورد استفاده در این تحقیق، از یک سیستم استریو تشکیل شده است. این سیستم یک جسم صلب دارای ۵ گوی درخشان را در فضای سه‌بعدی ردیابی می‌کند. این سیستم مشابه سیستم ارائه شده در [۳۸] بوده و با توجه به توضیحات بخش (۳-۸) پیاده‌سازی شده است. سیستم استریو موقعیت‌یاب، از دو دوربین صنعتی شرکت باسلر با سرعت ۵۰ فریم بر ثانیه تشکیل شده است. این دو دوربین، در اتاق به نحوی نصب شده‌اند که در تمام نقاط اتاق بتوانند حداقل ۳ گوی از ۵ گوی متصل شده بر روی ربات را مشاهده کنند. شکل (۴-۴) محل نصب دوربین‌ها در محیط آزمایشگاه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۴: محل نصب دوربین‌های موقعیت‌یابی

موقعیت ربات، همان موقعیت جسم صلب هدف است، که توسط دو دوربین موجود در صحنه ارائه می‌شود.

۴-۵-۱- جسم صلب هدف

جهت تخمین وضعیت جسم هدف با استفاده از دوربین، همانطور که در بخش (۳-۸) تشریح شد، حداقل به سه نقطه‌ی معلوم بر روی جسم صلب هدف، نیاز است. با افزایش این نقاط به ۵ نقطه دو هدف دنبال می‌شود:

۱. در صورتی که، همه‌ی ۵ نقطه قابل مشاهده با دو دوربین موجود در صحنه باشند، دقت

ردیابی افزایش می‌یابد.

۲. در تمام نقاط اتاق در صورت همپوشانی برخی از گوی‌ها یا دیده نشدن آن‌ها، حداقل ۳

گوی از ۵ گوی در هر وضعیت بازوی ربات قابل مشاهده باشد.

جدول ۴-۱: مختصات قرارگیری نشانگر در دستگاه متصل به جسم

نشانگر	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
۱	546	425. 53	1333. 13
۲	368. 33	168. 64	1074. 04
۳	805. 81	301. 37	1074. 51
۴	203. 88	662. 96	1109. 61
۵	795. 75	828. 10	1139. 18

در شکل (۴-۵)، نحوه‌ی نصب جسم هدف دارای ۵ نشانگر درخشان بر روی بازوی ربات متحرک کوچک نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵: جسم صلب با ۵ گوی درخشان

۴-۶- دوربین متصل به بازوی ربات

در این تحقیق، از وبکم HD شرکت مایکروسافت، جهت ایجاد بافت نقشه‌ی سه‌بعدی همراه با نرم‌افزار راه‌انداز ایجاد شده در محیط برنامه نویسی سی شارپ استفاده شده است.

۴-۶-۱- وبکم microsoft webcam lifecam cinema

وبکم مایکروسافت با استفاده از حسگر 1280×720 پیکسلی، تصاویر را به‌صورت HD واقعی با

سرعت ۳۰ فریم بر ثانیه ضبط می‌کند. این وبکم از فناوری تمرکز خودکار^۱ و روشن‌سازی فریم^۲ در صحنه، جهت ضبط تصاویر صاف و با جزئیات بالا حتی در مواردی که نور صحنه کم است، بهره می‌برد. همچنین این وبکم با قاب آلومینیومی و پایه‌ی انعطاف پذیر قابل استفاده برای کلیه‌ی رایانه‌های شخصی است. شکل (۴-۶) این وبکم را نمایش می‌دهد [۴۰].



شکل ۴-۶: وبکم Lifecam Microsoft [۴۰]

۴-۶-۱-۱- راه‌انداز وبکم

یکی از پروژه‌های متن‌باز یا Open Source که در بخش کدهای گوگل ایجاد شده است، پروژه‌ی Aforge. Net است، که تمام برنامه‌ها و توابع آن با سی‌شارپ نوشته شده‌اند. این توابع به صورت کتابخانه‌ای بی‌نظیر کنار هم گردآوری شده‌اند و موضوعاتی مانند الگوریتم‌های ژنتیک، شبکه‌های عصبی، پردازش تصویر، بینایی ماشین، پردازش ویدیو، منطق فازی و رباتیک را شامل می‌شوند. در این تحقیق از این کتابخانه جهت راه‌اندازی وبکم در محیط سی‌شارپ استفاده شده است [۴۲].

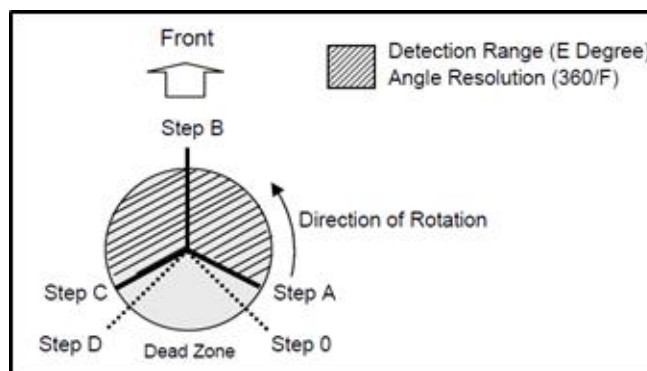
۴-۷- فاصله‌یاب لیزری مدل URG-04LX استفاده شده در این تحقیق

این مدل حسگر، دارای بسته‌بندی با ابعاد ۵۰ در ۵۰ در ۷۰ میلی‌متر بوده و منبع نوری این مدل از فاصله‌یاب، دیود نیمه‌هادی لیزری با طول موج ۷۸۵ نانومتر، توان ۲/۵ وات و کلاس ۱ امنیتی لیزر تشکیل شده است. سری URG مقادیر را در ۶۸۳ زاویه مختلف (گام) با استفاده از ارتباط USB نسخه ۲ در مد ۱۲ مگابیتی ارائه می‌دهد، که دارای تفکیک‌پذیری دورانی ۰/۳۵ درجه و محدوده‌ی اسکن

^۱ Auto Focus

^۲ Clear Frame

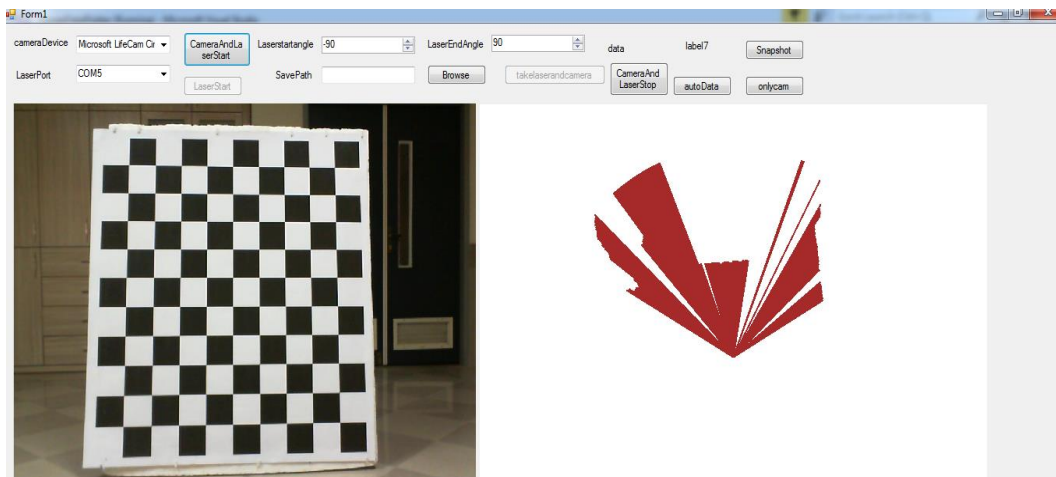
۲۴۰ درجه است. محدوده‌ی اندازه‌گیری حسگر از ۲۰ میلی‌متر تا ۴۰۹۵ میلی‌متر است. نرخ نمونه‌برداری داده‌ها ۱۰ هرتز بوده و اسکن ۲۴۰ درجه، در ۱۰۰ میلی‌ثانیه انجام می‌پذیرد. این حسگر قابلیت پشتیبانی از پروتکل‌های ارتباطی SPIP1, SPIP2 را دارا است. پروتکل SPIP یک پروتکل تبادل داده است که جهت ارتباط با حسگر در کاربردهای رباتیکی ارائه شده است. در این تحقیق، از پروتکل ارتباطی SPIP2 برای ارتباط با این حسگر استفاده شده است. شکل (۷-۴) پارامترهای اندازه‌گیری فاصله‌یاب لیزری را نشان می‌دهد. اساس اندازه‌گیری این حسگر بر پایه‌ی تغییر فاز سیگنال دریافت شده است. این روش اندازه‌گیری فاصله را به رنگ و بازتاب اشیا وابسته می‌سازد.



شکل ۷-۴: پارامترهای اندازه‌گیری فاصله‌یاب [۴۱]

۸-۴- نرم افزار داده‌گیری آنلاین از دوربین متصل به ربات و فاصله‌یاب لیزری

خط اسکن فاصله‌یاب لیزری بر روی اجسام و محیط قابل رویت نیست. جهت داده‌گیری برای کالیبراسیون فاصله‌یاب لیزری و دوربین متصل به بازوی ربات، قابل مشاهده بودن صفحه کالیبراسیون به طور همزمان برای فاصله‌یاب و دوربین متصل به بازوی ربات (وبکم) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور نرم‌افزاری جهت نمایش خط اسکن فاصله‌یاب و تصاویر دوربین جهت داشتن دیدی از محل اسکن تقریبی فاصله‌یاب لیزری و تصویر محیط ایجاد شد. با استفاده از نرم‌افزار ایجاد شده امکان قابل مشاهده بودن صفحه کالیبراسیون، برای فاصله‌یاب و وبکم وجود دارد. شکل (۸-۴) نمایش همزمان داده‌های فاصله‌یاب لیزری و وبکم را در محیط سی‌شارپ نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۸: نرم افزار نمایش همزمان تصویر و داده‌های فاصله‌یاب

۴-۹- پردازش داده‌های فاصله‌یاب لیزری

فاصله‌یاب لیزری استفاده شده در این تحقیق، از پروتکل سریال با نرخ بیت ۹۶۰۰ بیت بر ثانیه جهت ارسال و دریافت دستورها و داده‌ها استفاده می‌کند. منظور از دستور، کد ارسالی به لیدار جهت انجام وظیفه‌ای خاص، یا کد دریافتی از لیدار به منظور اعلام وضعیت است. در این بخش منظور از داده‌ها، فاصله‌ی المان‌های موجود در صحنه تا لیدار است.

۴-۹-۱- کدگذاری و کدگشایی داده‌های فاصله

جهت کدگذاری و کدگشایی دستورات ارسالی از میزبان به حسگر و بر عکس، از دو نوع کدگذاری سه کاراکتری و دو کاراکتری استفاده می‌شود. در بخش کدگذاری داده‌های فاصله، کدگذاری دو کاراکتری تشریح می‌شود [۴۳].

۴-۹-۱-۱- کدگذاری داده‌های فاصله

داده‌های اندازه‌گیری به صورت بلوک‌های ۶۴ بایتی ارسال می‌شوند. هر ۲ بایت از داده‌ها یک فاصله را ارائه می‌کند. پروتکل کدگذاری داده‌ها دارای مراحل زیر است:

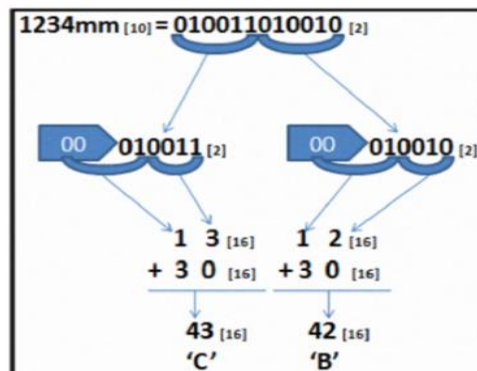
۱. خواندن مقادیر فاصله و تبدیل آن‌ها به داده‌های دودویی ۱۲ بیتی.

۲. تقسیم‌بندی داده‌های دودویی به دو گروه ۶ بیتی

۳. اضافه کردن ۲ صفر از سمت چپ به داده‌های دودویی برای اینکه داده‌ها به صورت ۸ بیتی ایجاد شوند.

۴. تبدیل داده‌ها به مبنای ۱۶ (هگزادسیمال).

۵. اضافه کردن ۳۰ هگزادسیمال به داده‌ها جهت نمایش کاراکتری آنها.



شکل ۴-۹: کدگذاری فاصله [۴۳]

۴-۹-۱-۲- کدگذاری داده‌های فاصله

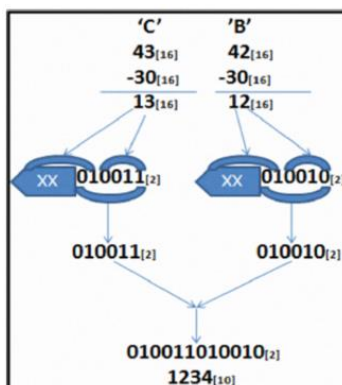
۱. دریافت داده‌ها به صورت ۲ کاراکتر اسکی از درگاه USB کامپیوتر

۲. کم کردن ۳۰ در مبنای ۱۶ از کد اسکی داده‌های کاراکتری

۳. تبدیل اعداد به اعداد دودویی ۶ بیتی

۴. ترکیب داده‌های دودویی ۶ بیتی

۵. تبدیل داده‌های دودویی به اعداد در مبنای ۱۰



شکل ۴-۱۰: کدگذاری داده‌های فاصله [۴۳]

۴-۹-۲- راه‌اندازی فاصله‌یاب لیزری

جهت راه‌اندازی حسگر، ابتدا باید دستور مربوط به راه‌اندازی توسط میزبان^۱ به حسگر فرستاده شود. در صورتی که دستور صحیح بود اکو (باز ارسال دستور فرستاده شده) همراه با وضعیت از حسگر به میزبان ارسال می‌شود [۴۳]. فرمت دستور ارسالی از میزبان به حسگر، در جدول (۴-۲) و فرمت دستور دریافتی از حسگر توسط میزبان، در جدول (۴-۴) ارائه داده شده است [۴۳].

جدول ۴-۲: فرمت دستور ارسالی از میزبان به حسگر [۴۳]

دستور ^۴	پارامتر ^۳	رشته‌ای از کاراکتر ^۲	LF OR CR
--------------------	----------------------	---------------------------------	----------

دستور: یک کد دو بایتی است که اجرای کار خاصی را از حسگر درخواست می‌نماید. لیزی از دستورات مهم، در جدول (۴-۳) نمایش داده شده است.

جدول ۴-۳: نمونه‌ای از دستورات فاصله‌یاب لیزری [۴۳]

عنوان دستور	توضیحات
BM	در صورتیکه حسگر خاموش باشد، با این دستور می‌توان آن را روشن کرد.
QT	خاموش کردن اندازه‌گیری حسگر
TM	ایجاد هماهنگی زمانی بین میزبان و حسگر
CR	کنترل سرعت موتور، که دوران برای اندازه‌گیری را فراهم می‌کند.
MS	دستوری جهت دریافت داده‌های فاصله از حسگر
RS	بازنشانی کلیه تنظیمات حسگر
HS	تعیین حساسیت حسگر

پارامتر: اطلاعاتی جهت تغییر تنظیمات حسگر یا دریافت اطلاعات اضافی از حسگر

^۱ HOST

^۲ String characters

^۳ Parameter

^۴ Command symbol

رشته‌ای از کاراکتر: کاراکترهایی مانند +, -, جهت جداسازی پارامترها

LF OR CR: جهت ایجاد یک خط جدید و شروع خط از اول سطر در برنامه‌نویسی (حسگر به میزبان)

جدول ۴-۴: فرمت دستور ارسالی از حسگر به میزبان [۴۳]

LF	LF	جمع	داده	LF	جمع	وضعیت	اکو دستور
----	----	-----	------	----	-----	-------	-----------

اکو دستور: ارسال مجدد دستورات ارسالی شامل سمبل دستور، پارامتر و غیره است.

وضعیت: یک کد دو بیتی که نشانگر وضعیت دستور ارسالی است و خطاهای دستور ارسالی را نمایش می‌دهد.

جمع: جهت جمع داده‌های بین دو LF استفاده می‌شود.

داده‌ها: شامل اندازه‌گیری‌های حسگر است، که به صورت بلوک‌های ۶۴ بیتی هستند.

۴-۹-۲-۱- داده‌های فاصله و زاویه در حسگر فاصله‌یاب لیزری

حسگر استفاده شده در این تحقیق، داده‌های فاصله را در ۶۸۱ گام با وضوح زاویه‌ای ۰/۳۵ تولید می‌نماید. این داده‌ها، فاصله از موانع اطراف را نمایش می‌دهند. زاویه‌ی اسکن در این حسگر از ۱۲۰- تا ۱۲۰ درجه است. با داشتن وضوح زاویه‌ای، می‌توان زاویه و فاصله‌ی هر اسکن را بدست آورد [۴۳].

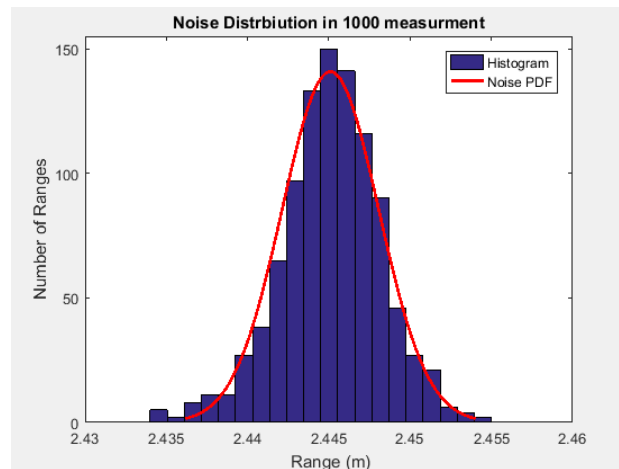
۴-۱۰- تخمین مدل نویز حسگر فاصله‌یاب لیزری در بستر آزمایشگاهی

نویز در داده‌های حسگر فاصله‌یاب لیزری به صورت نویز گاوسی در نظر گرفته می‌شود. برای تقریب نویز حسگر با نویز گاوسی تنها کافی است، انحراف معیار (σ) و میانگین (μ) تابع توزیع نویز ($f(x)$) به دست آید. تابع توزیع احتمال نویز گاوسی به صورت رابطه (۴-۱) است:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (۴-۱)$$

در این مطالعه برای تقریب نویز گاوسی و به دست آوردن انحراف معیار نویز گاوسی، یک جسم در فاصله‌ی مشخص قرار داده شد و چندین بار اقدام به اسکن و اندازه‌گیری فاصله آن شد. انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده ۲/۹ میلی‌متر به دست آمد، که نشان می‌دهد دقت حسگر فاصله‌یاب ۳ در

۲/۹ میلی متر است. تقریبی از نویز گاوسی در ۱۰۰۰ اندازه گیری را در شکل (۱۱-۴) می توان دید.



شکل ۱۱-۴: تخمین نویز گاوسی فاصله یاب لیزری

۱۱-۴- تهیه ی نقشه ی دوبعدی محیط با استفاده از حسگر فاصله یاب دوبعدی

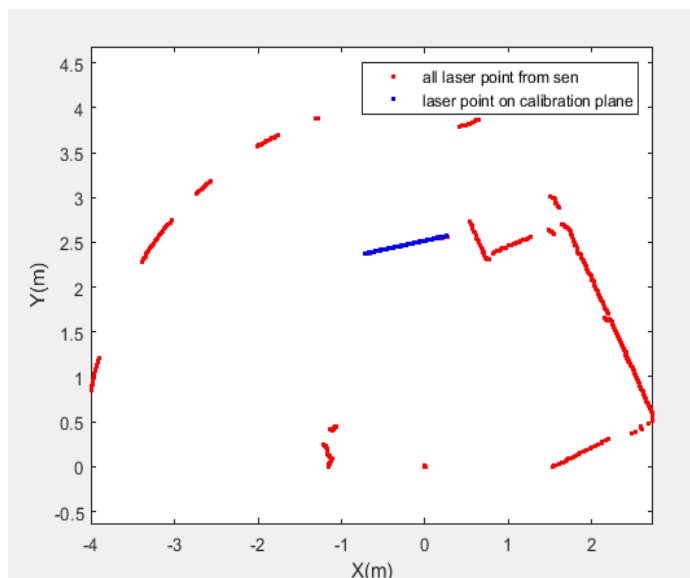
برای ایجاد نقشه ی دوبعدی با استفاده از داده های فاصله یاب لیزری، تنها کافی است، داده ها با توجه به رابطه (۲-۴) از مختصات قطبی به مختصات دکارتی تبدیل و رسم شوند.

$$P_i = [r_i \cos \theta_i \quad r_i \sin \theta_i] \quad (۲-۴)$$

در رابطه (۲-۴)، P_i نقطه ی i -ام فاصله یاب لیزری در مختصات دکارتی به متر، r_i فاصله اندازه گیری شده i -ام توسط حسگر به متر و θ_i زاویه ی پرتو برای فاصله r_i به درجه بوده که از رابطه (۳-۴) قابل محاسبه است.

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \theta_q \quad (۳-۴)$$

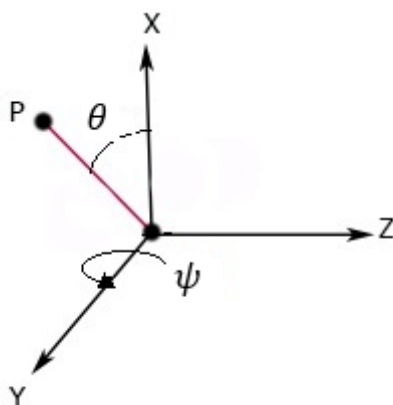
در رابطه (۳-۴)، θ_{i-1} زاویه ی اسکن مرحله ی قبل و θ_q تفکیک پذیری دورانی اسکن است، که می توان آن را برای حسگر مقداردهی کرد. پس از نگاشت فواصل اندازه گیری شده توسط حسگر فاصله یاب لیزری به نقاط دوبعدی، می توان این نقاط را به یک نقشه دوبعدی تبدیل کرد. در شکل (۱۲-۴)، نقشه ی دوبعدی ایجاد شده همراه با موانع و محیط در مختصات حسگر فاصله یاب لیزری رسم شده است.



شکل ۴-۱۲: نقشه‌ی دوبعدی ایجاد شده از محیط

۴-۱۲- ایجاد نقشه‌ی سه‌بعدی بدون بافت از محیط و موانع آن

برای ایجاد نقشه سه‌بعدی محیط، از یک بستر ربات کوکا 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 $[r_i \ \theta_i \ \psi_i]$ ذخیره شده و با توجه شکل (۴-۱۳) با استفاده از رابطه‌های (۴-۴) تا (۴-۶) به مختصات دکارتی تبدیل و اطلاعات در مختصات دکارتی رسم شده است (ψ_i زاویه دوران بازوی ربات است).



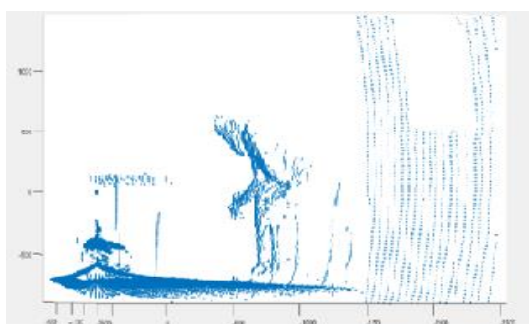
شکل ۴-۱۳: تبدیل داده‌های لیدار از مختصات دکارتی به مختصات کروی

$$X_i = r_i \cos \theta_i \cos \psi_i \quad (4-4)$$

$$Y_i = -r_i \cos \theta_i \sin \psi_i \quad (5-4)$$

$$Z_i = -r_i \sin \psi_i \quad (6-4)$$

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 (۴-۱۴) نمونه‌ای از نقشه‌ی ایجاد شده با استفاده از این روش که با صحنه‌ی واقعی مقایسه شده است، را نمایش می‌دهد.



ب



الف

شکل ۴-۱۴: الف- تصویر صحنه‌ی اسکن شده، ب- نقشه‌ی سه‌بعدی ایجاد شده از همان صحنه

۴-۱۳- پردازش ابر نقاط به‌دست آمده و تشخیص یک صفحه موجود در صحنه

شناسایی صفحات موجود در ابر نقاط از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شناسایی صفحات مختلف در محیط موجب ایجاد مقدمه‌ای جهت تشخیص دیوارهای بنا از سایر موانع و اشیاء موجود در محیط است. در کاربردهای رباتیکی شناسایی موانع و دیوارها موجب سهولت طراحی مسیر ربات می‌شود. در این بخش روشی جهت شناسایی صفحه در محیط ارائه می‌شود. باید در نظر داشت n نقطه از فضا توسط فاصله‌یاب لیزری در محدوده‌ی صفحه‌ی مورد جستجو، استخراج شده است و مطابق توضیحات داده شده در بخش (۴-۱۲)، مختصات این نقاط به‌صورت $[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ است. معادله صفحه در فضای سه‌بعدی به‌صورت معادله (۴-۷) در نظر گرفته شده است.

$$X = uY + vZ + w \quad (7-4)$$

در رابطه‌ی (۴-۱۲)، بردار $[1 \ u \ v]$ بردار عمود به صفحه است. برای به دست آوردن محدوده

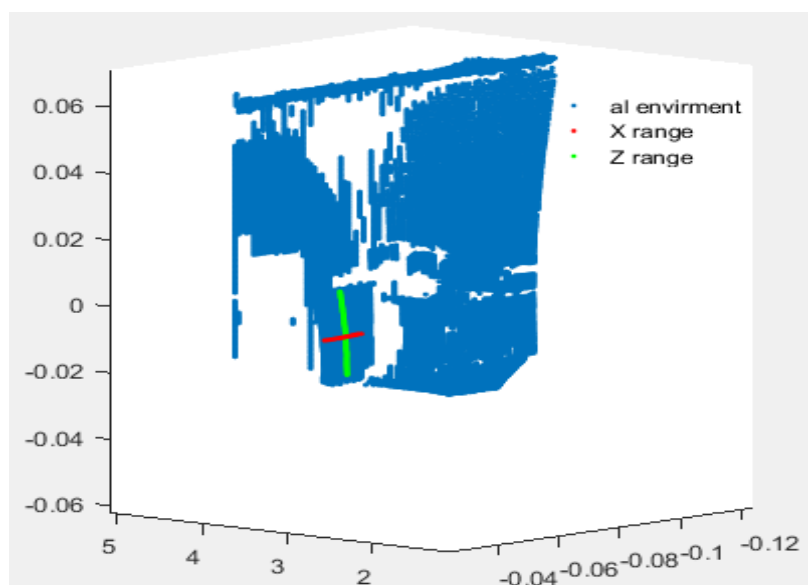
صفحه‌ی مورد جستجو، یک نقطه از صفحه مورد نیاز است. از این نقطه در راستاهای عمودی و افقی تفاضل‌گیری می‌شود، تا لبه‌های صفحه‌ی مورد جستجو به دست آید. سپس تمام نقاط در محدوده به دست آمده، برای پیدا کردن معادله صفحه استخراج می‌شوند (شکل (۴-۱۶)). با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۴-۷) برای تمام n نقطه روی صفحه، طبق رابطه‌ی (۴-۸) می‌توان رابطه‌ی پارامترهای صفحه (u, v, w) را با مختصات نقاط روی صفحه بیان کرد.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix}}_{\Gamma} = \underbrace{\begin{pmatrix} Y_1 & Z_1 & 1 \\ Y_2 & Z_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_n & Z_n & 1 \end{pmatrix}}_H \underbrace{\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}}_{\chi} \quad (۴-۸)$$

در رابطه (۴-۸)، $[X_i \ Y_i \ Z_i]^T$ مختصات نقاط روی صفحه و $[u \ v \ w]^T$ پارامترهای صفحه هستند که با χ نمایش داده می‌شوند. برای تخمین پارامترهای صفحه (χ) ، روش حداقل مربعات طبق رابطه‌ی (۴-۹) استفاده شده است.

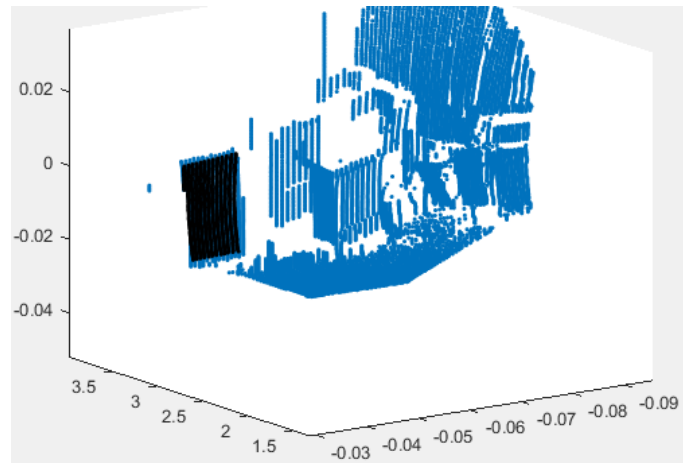
$$\chi = (H^T H)^{-1} H^T \Gamma \quad (۴-۹)$$

شکل (۴-۱۵)، محدوده‌ی عمودی و افقی محاسبه شده برای صفحه‌ی موجود در صحنه را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: محدوده عمودی و افقی صفحه

شکل (۴-۱۶) برازش صفحه با استفاده از پارامتر X به دست آمده از روش حداقل مربعات را نمایش می‌دهد. با در نظر گرفتن فاصله نقاط به دست آمده از حسگر نسبت به صفحه استخراج شده به عنوان خطا، میانگین خطا $3/1$ میلی‌متر و بیشینه خطا $4/8$ میلی‌متر به دست آمد. با توجه به انحراف معیار به دست آمده برای حسگر فاصله‌یاب، خطای میانگین کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۶: نقاط سیاه، صفحه‌ی برازش شده با روش حداقل مربعات

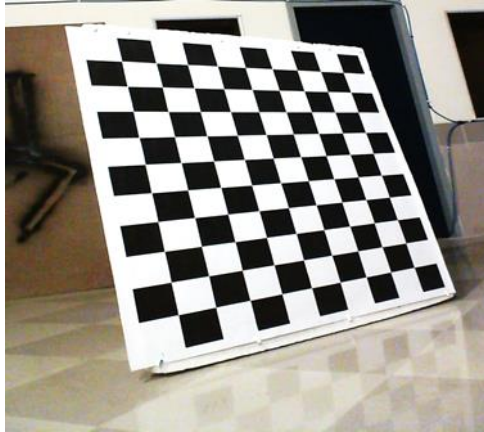
۴-۱۴- کالیبراسیون خارجی دوربین و فاصله‌یاب لیزری

جهت کالیبراسیون دوربین و لیزر، از روش ارائه شده توسط ژنگ و پلس استفاده می‌شود. این روش در ادامه شرح داده شده است.

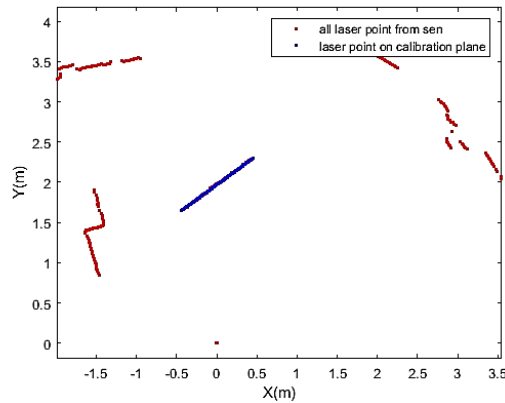
۴-۱۴-۱- مشخص کردن محدوده صفحه در نقشه‌ی دوبعدی ارائه شده توسط فاصله‌یاب

با توجه به بخش (۴-۹)، فاصله از فاصله‌یاب و تصویر از دوربین توسط نرم‌افزار ایجاد شده استخراج می‌شود. داده‌های هر اسکن فاصله‌یاب لیزری از محیط، به صورت دو آرایه زاویه و فاصله ارائه می‌شوند. برای مشخص کردن صفحه کالیبراسیون در خط اسکن فاصله‌یاب، تنها کافی است یک نقطه اسکن بر روی صفحه کالیبراسیون موجود باشد. یافتن چنین نقطه‌ای نیازمند این است که اسکنر لیزری به گونه‌ای روبروی صفحه کالیبراسیون قرار داده شود، که امتداد محور x دستگاه متصل به فاصله‌یاب (شکل (۳-۵))، یک نقطه‌ی اسکن شده از صفحه کالیبراسیون باشد. پس از یافتن یک نقطه بر روی صفحه کالیبراسیون، با تفاضل‌گیری از فاصله‌ی متناظر این نقطه با درایه‌های قبل و بعد و مقایسه‌ی

اختلاف فاصله‌ی دو درایه با آستانه‌ی انتخاب شده، محدوده‌ی نقاط روی صفحه کالیبراسیون (P^f)، استخراج می‌شود. در شکل (۴-۱۷-ب) نحوه‌ی قرارگیری صفحه در فضا مشاهده می‌شود. صفحه‌ی استخراج شده از نقشه‌ی دوبعدی فاصله‌یاب، در شکل (۴-۱۷-الف) با رنگ آبی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۷: الف- صفحه‌ی آشکار شده از داده‌های لیزر، ب- نحوه‌ی قرارگیری صفحه در فضا

۴-۱۴-۲- محاسبه‌ی دوران و انتقال دوربین به فاصله‌یاب

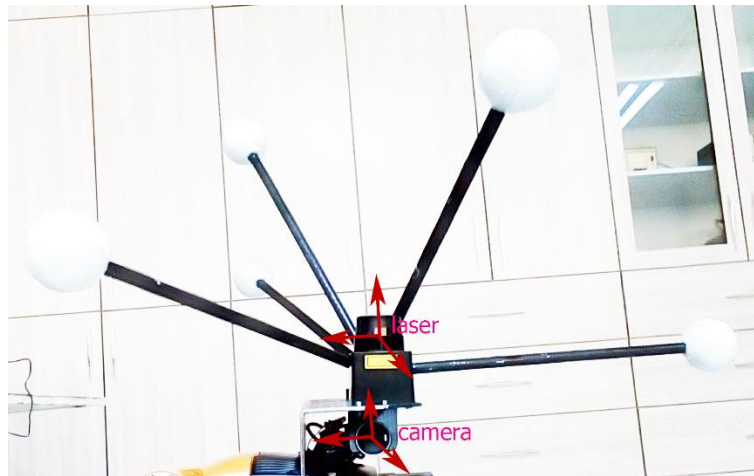
با استفاده از جعبه ابزار کالیبراسیون متلب، برای هر حالت قرارگیری صفحه شطرنجی، دوران (R) و انتقال (t) صفحه شطرنجی (صفحه کالیبراسیون) نسبت به دوربین محاسبه شد. با استفاده از پارامترهای دوران و انتقال محاسبه شده از رابطه (۳-۲۲)، پارامتر صفحه برای هر حالت صفحه کالیبراسیون محاسبه شده است. سپس با استفاده از حل خطی پارامترهای اولیه‌ی دوران (ϕ) و انتقال (Δ) دوربین به فاصله‌یاب، محاسبه می‌شود. این پارامترها به عنوان مقادیر اولیه‌ی روش بهینه‌سازی لوببرگ مارکوارد در نظر گرفته شدند و مقادیر دوران (ϕ) و انتقال (Δ) دوربین به فاصله‌یاب لیزری، پس از بهینه‌سازی به صورت روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) به دست آمدند.

$$\phi = \begin{bmatrix} -0.0532 & 0.0105 & 0.9985 \\ 0.998 & 0.0034 & 0.0532 \\ -0.002 & 0.9994 & -0.0106 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

$$\Delta = [47.675 \quad -88.47 \quad -2.313] \quad (4-11)$$

در رابطه‌ی بالا Δ بر حسب میلی‌متر است. در شکل (۴-۱۸) نحوه‌ی قرارگیری دوربین و فاصله‌یاب

لیزری نشان داده شده است.



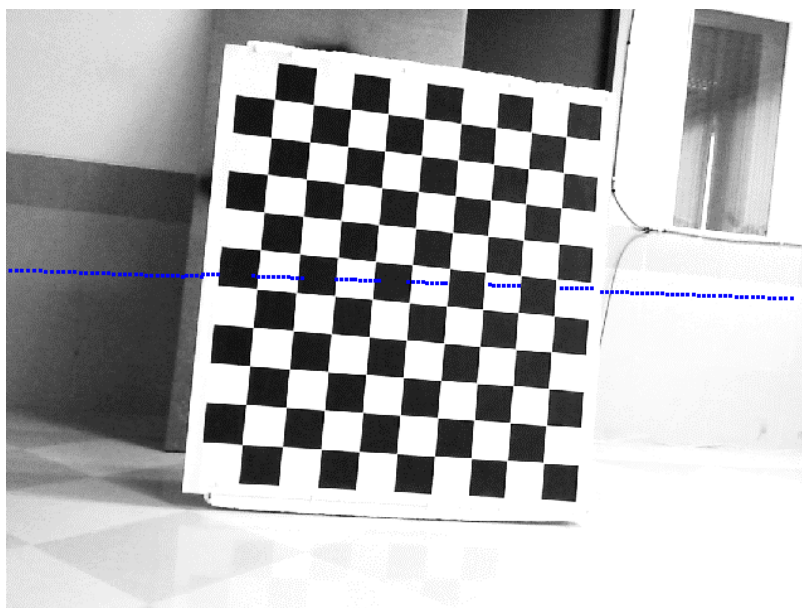
شکل ۴-۱۸: دوربین و فاصله یاب لیزری بر روی مفصل ۵ بازو

۴-۱۴-۳- نگاشت نقاط لیزر به تصویر دوربین و استخراج رنگ هر نقطه از تصویر

با استفاده از رابطه (۴-۱۲) می توان نقاط لیزر را به پیکسل های متناظر در تصویر دوربین نگاشت داد.

$$P_c = K\phi^{-1}(P^f - \Delta) \quad (4-12)$$

در رابطه (۴-۱۲)، P^f نقاط اسکن شده از محیط در دستگاه مختصات فاصله یاب، P_c نقاط اسکن شده توسط فاصله یاب در دستگاه مختصات دوربین، K ماتریس پارامترهای ذاتی دوربین، ϕ دوران و Δ انتقال دوربین به فاصله یاب است. پس از نگاشت نقاط فاصله یاب با استفاده از رابطه (۴-۱۲)، این نقاط در دستگاه مختصات دوربین نرمالیزه شده و به پیکسل متناظر در تصویر نگاشت داده می شوند. نتیجه ی حاصل از نگاشت نقاط لیزر به تصویر در شکل (۴-۱۹) نمایش داده شده است.

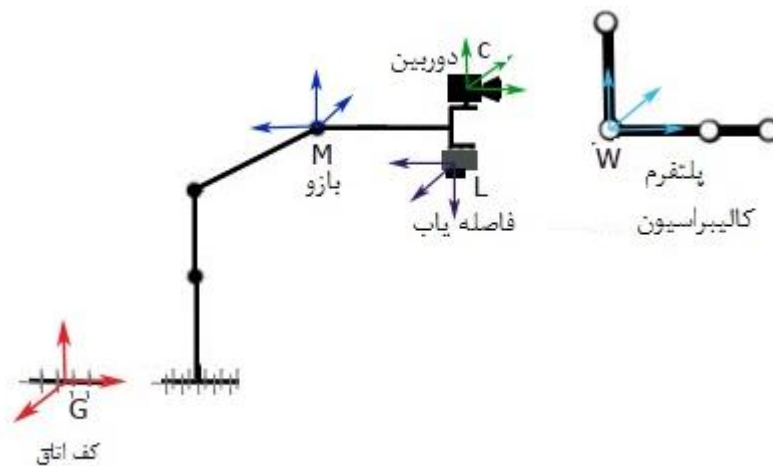


شکل ۴-۱۹: نگاشت نقاط فاصله‌یاب لیزری به تصویر (نقاط آبی)

جهت به چالش کشیدن دقت روش کالیبراسیون خارجی دوربین و لیزر استفاده شده در این تحقیق، از امکان کاهش حساسیت فاصله‌یاب لیزری استفاده شد. فاصله‌یاب لیزری این امکان را دارد، که در دو مد حساسیت کار کند. در صورتی که دستگاه در حالت حساسیت کم تنظیم شود. فاصله بهینه‌ی اندازه‌گیری تا ۲ متر است. در این هنگام، به دلیل کاهش توان دستگاه، پرتو لیزر منتشرشده از فاصله‌یاب، در نقاط سیاه جذب شده و هیچ‌گونه بازتابی ندارد. این حالت کاری از فاصله‌یاب روشی مناسب جهت آزمایش دقت کالیبراسیون است. همچنین در صورتی که دستگاه در حالت حساسیت بالا قرار گیرد، مشکل بازتاب نقاط سیاه برطرف شده و بیشترین فاصله‌ی اندازه‌گیری به ۴ متر افزایش می‌یابد. پس از نگاشت نقاط لیزر به پیکسل متناظر در تصویر گرفته‌شده از دوربین، رنگ برای هر نقطه‌ی اسکن‌شده از محیط، توسط فاصله‌یاب لیزری استخراج می‌شود.

۴-۱۴-۴- کالیبراسیون خارجی دوربین و جسم هدف نصب شده بر روی بازو

هدف از این بخش، محاسبه‌ی دوران و انتقال دستگاه مختصات دوربین به دستگاه مختصات جسم صلب نصب شده روی بازو است. شکل (۴-۲۰) طرح شماتیک کالیبراسیون را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰: شماتیک بستر مورد استفاده جهت کالیبراسیون دوربین به بازو

در شکل (۴-۲۰) دستگاه مختصات کف اتاق (G) به عنوان دستگاه مختصات مرجع در نظر گرفته می شود. با استفاده از سیستم ردیابی می توان هر نقطه‌ی سه بعدی (P_M)، در دستگاه مختصات بازو (M) و یا هر نقطه‌ی سه بعدی (P_W) در دستگاه مختصات هدف (W) را در دستگاه مختصات مرجع بیان کرد. همچنین با استفاده از دستور Solve pnp در کتابخانه‌ی متن باز opencv یا با استفاده از متد POSIT در کتابخانه‌ی متن باز Aforge، می توان 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 و ژنگ که در بخش (۳-۶) تشریح شد، دوران و انتقال دوربین نسبت به فاصله یاب 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 می توان نوشت.

$$P_G = R_W^G P_W + T_W^G \quad (۴-۱۳)$$

$$P_C = R_W^C P_W + T_W^C \quad (۴-۱۴)$$

$$P_M = R_W^M P_W + T_W^M \quad (۴-۱۵)$$

$$P_G = R_M^G P_M + T_M^G \quad (۴-۱۶)$$

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 ۵ 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. نقاط در دستگاه مختصات دوربین را با استفاده از دوران و انتقال دوربین به جسم صلب هدف، می‌توان با رابطه (۱۷-۴) بیان کرد.

$$P_W = R_W^C{}^T (P_C - T_W^C) \quad (17-4)$$

با جایگذاری رابطه (۱۶-۴) در رابطه (۱۳-۴)، می‌توان نقطه‌ای سه‌بعدی در مختصات دوربین را به مختصات مرجع با شرط وجود هدف (جسمی با ابعاد مشخص در محیط) تبدیل کرد:

$$P_G = R_W^G (R_W^C{}^T (P_C - T_W^C)) + T_W^G \quad (18-4)$$

با استفاده از رابطه (۱۶-۴) می‌توان نقاط در مختصات مرجع را در مختصات بازو به صورت رابطه (۱۹-۴) نوشت:

$$P_M = R_M^G{}^T (P_G - T_W^C) \quad (19-4)$$

با استفاده از رابطه (۲۰-۴) هر نقطه‌ی P_C در دستگاه مختصات دوربین را می‌توان در دستگاه مختصات بازوی ربات به صورت P_M بیان کرد:

$$P_M = R_M^G{}^T R_W^G R_W^C{}^T P_C + R_M^G{}^T (T_W^G - T_M^G - R_W^G R_W^C{}^T T_W^C) \quad (20-4)$$

از رابطه (۲۰-۴)، دوران و انتقال دوربین به بازو را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R_C^M = R_M^G{}^T R_W^G R_W^C{}^T \quad (21-4)$$

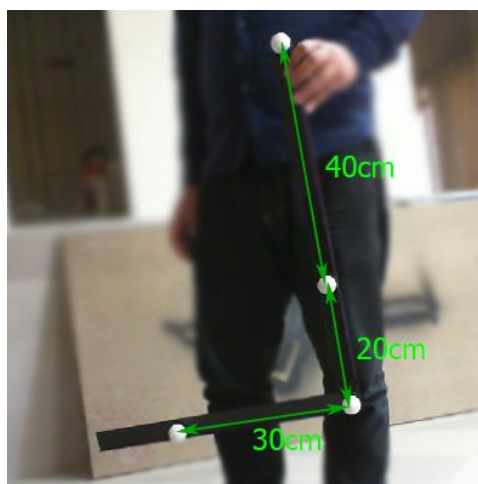
$$T_C^M = R_M^G{}^T (T_W^G - T_M^G - R_W^G R_W^C{}^T T_W^C) \quad (22-4)$$

از آنجایی که 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، بنابراین با داشتن روابط (۲۱-۴) و (۲۲-۴) حتی در صورت

حرکت ربات می‌توان نقاط فاصله‌یاب لیزری و هر نقطه در مختصات دوربین را در مختصات کف اتاق بیان کرد.

۴-۱۴-۵- استخراج مرکز نقاط معلوم بستر کالیبراسیون

دستور SOLVEPNP جهت به دست آوردن دوران و انتقال یک جسم با ابعاد مشخص نسبت به دوربین استفاده می‌شود. این دستور حداقل چهار نقطه‌ی با وضعیت مشخص در مختصات جهانی و همچنین متناظر این نقاط در تصویر را جهت تخمین دوران و انتقال جسم نیاز دارد. در این تحقیق جسم با ابعاد مشخص، یک جسم L شکل است که چهار نشانگر درخشان با فاصله‌های نمایش داده شده در شکل (۴-۲۱)، بر روی آن قرار گرفته است. مختصات این نقاط در دستگاه جهانی به عنوان چهار نقطه‌ی فضایی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۴-۲۱: بستر کالیبراسیون بازو و دوربین

جهت یافتن نقاط متناظر با این نقاط در تصویر به دو صورت عمل می‌کنیم:

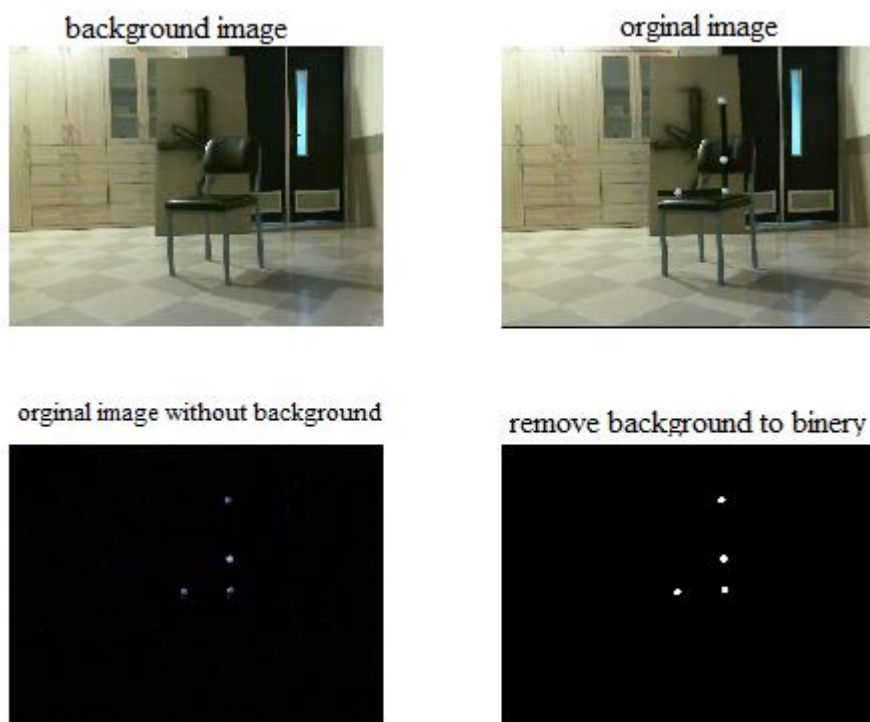
۱. استفاده از استخراج اجزا متصل با استفاده از روش ریخت‌شناسی

۲. روش کلیک و آستانه‌گذاری (روش پیشنهادی)

۴-۱۴-۵-۱- استخراج اجزا متصل با روش ریخت‌شناسی

یکی از عوامل مزاحم جهت استخراج اجزا متصل، پس‌زمینه‌ی تصویر بستر است. برای حذف

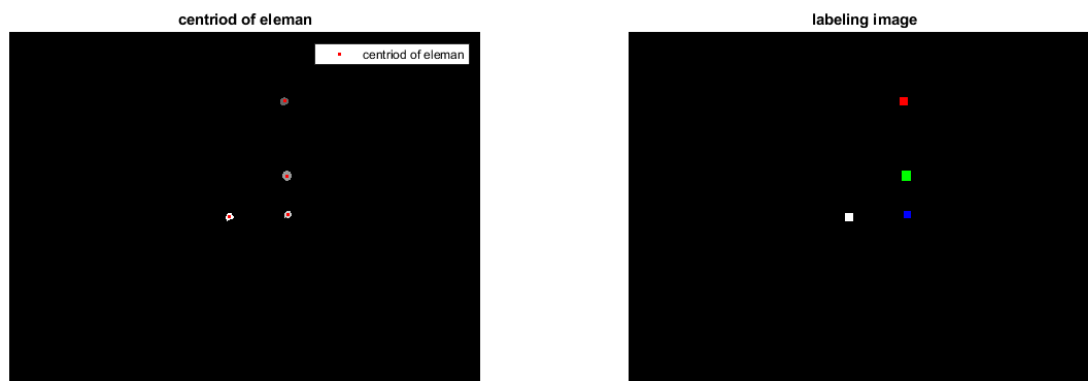
پس‌زمینه‌ی تصویر، ابتدا بدون قرار دادن بستر کالیبراسیون، از محیط تصویر گرفته شده است. سپس تصویر پس‌زمینه از تصویری که بستر کالیبراسیون در آن موجود است، تفاضل‌گیری شده و در تصویر خروجی تنها نقاطی که بستر وجود دارد، دارای مقدار است. این نقاط مقادیر شدت روشنایی تصویر ورودی را به خود می‌گیرند، درنهایت با آستانه‌گذاری و اعمال روش مبتنی بر ریخت‌شناسی المان‌های مورد نظر استخراج می‌شوند. شکل (۴-۲۲) نتایج حاصل از حذف پس‌زمینه و تبدیل تصویر به تصویر دودویی جهت استخراج اجزا متصل را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۲: حذف پس‌زمینه

جهت استخراج اجزا متصل موجود در شکل (۴-۲۲) می‌توان از روش ریخت‌شناسی استفاده کرد. در این روش تنها یک نقطه از جسم نیاز است. از این نقطه به‌عنوان نقطه‌ی شروع جهت گشودن ریخت‌شناسی استفاده می‌شود. در هر مرحله از تصویر حاصل از گشودن و تصویر باینری اصلی اشتراک‌گیری می‌شود. اگر تصویر بعد از اشتراک‌گیری در دو مرحله تغییری نیافت، کامپوننت مورد نظر استخراج شده است. برای استخراج المان‌ها در این مرحله، از یک المان ساختاری با ابعاد سه در سه با

مقدار یک استفاده شد [۴۲]. شکل (۴-۲۳) نتایج برچسب‌گذاری المان‌ها و پیدا کردن مرکز ثقل المان‌ها جهت اعمال به متد یافتن موقعیت جسم با ابعاد مشخص را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۳: برچسب‌گذاری المان‌ها و یافتن مراکز المان‌ها

۴-۱۴-۵-۲- روش کلیک و آستانه‌گذاری

در این روش یک المان مربعی با ابعاد بزرگتر از نشانه‌های درخشان در نظر گرفته می‌شود. سپس بر روی تک تک المان‌ها کلیک و در محدوده‌ی ماسک انتخابی پیکسل‌هایی که دارای شدت روشنایی بیشتری از آستانه انتخابی هستند، یک در نظر گرفته می‌شود و مختصات افقی تک تک این پیکسل‌ها با هم جمع شده و تقسیم بر تعداد پیکسل‌های دارای روشنایی یک می‌شود. به این ترتیب مختصات افقی مرکز المان‌ها پیدا می‌شود. این عمل جهت یافتن مختصات عمودی المان نیز تکرار می‌شود. این روش به شدت تحت تأثیر دقت کلیک اپراتور و سطح آستانه‌گذاری است. کلیک هر چه نزدیک‌تر به مرکز و آستانه‌گذاری مناسب‌تر باشد، نتایج حاصله بهتر خواهد بود. نتایج حاصل از این روش و مرکز یکی از المان‌ها در شکل (۴-۲۴) نمایش داده شده است. جهت کاهش محاسبات و تعیین نقاط متناظر به خواست کاربر، در این تحقیق از روش کلیک و آستانه‌گذاری جهت پیدا کردن مراکز ثقل المان‌ها استفاده شد.



شکل ۴-۲۴: نتایج حاصل از روش کلیک و آستانه گذاری

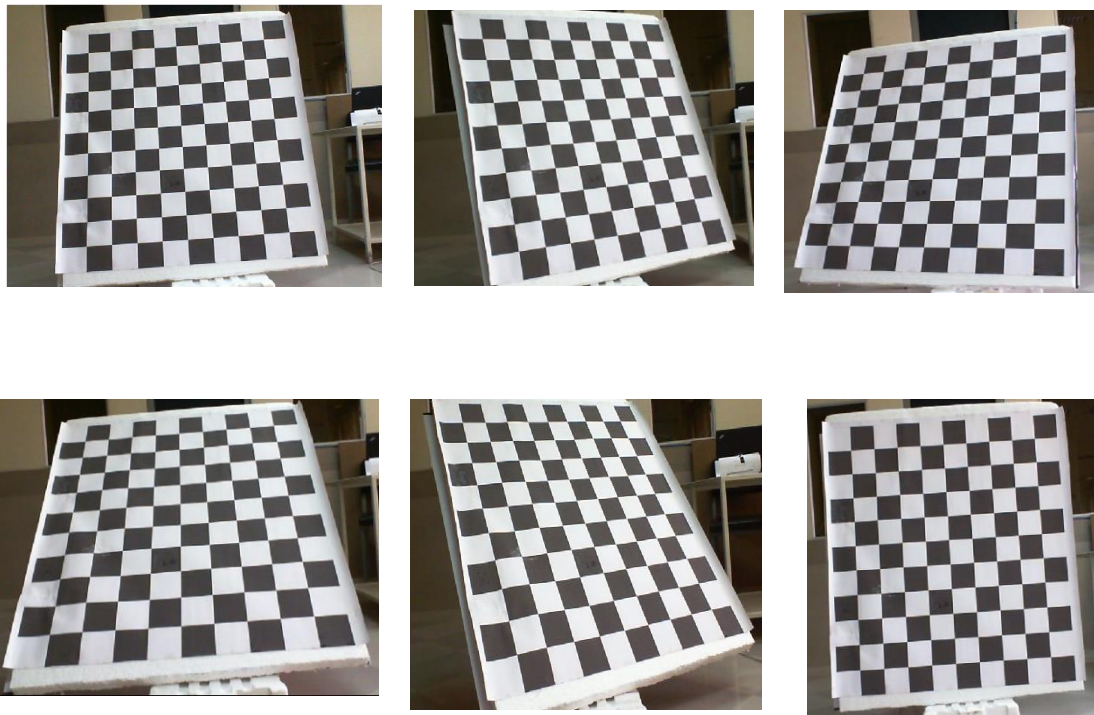
۴-۱۵- رسم داده در دستگاه مختصات اتاق

در بخش (۴-۱۲) نحوه‌ی ایجاد یک نقشه‌ی سه‌بعدی بدون بافت در دستگاه مختصات حسگر فاصله‌یاب لیزری ارائه شد. 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.

۴-۱۶- کالیبره کردن دوربین‌های سیستم موقعیت‌یابی و وبکم متصل به بازوی ربات

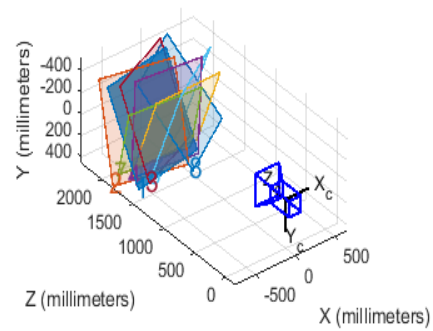
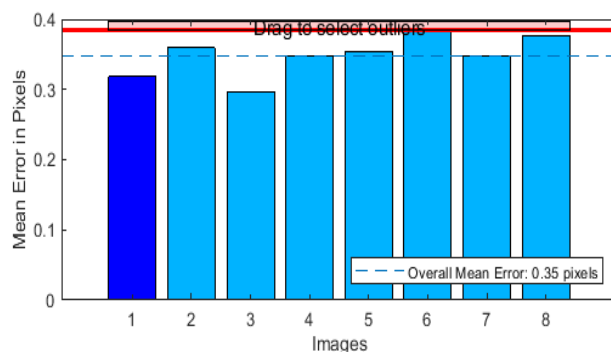
کالیبراسیون دوربین، جهت به دست آوردن پارامترهای داخلی و خارجی دوربین انجام می‌پذیرد. روش‌های مختلف کالیبراسیون دوربین در فصل ۳ بخش ۴ توضیح داده شد. در این تحقیق، از

کالیبراسیون دوربین با استفاده از اجسام دوبعدی استفاده شد. الگوی مورد استفاده برای کالیبراسیون صفحه شطرنجی با ابعاد مشخص است که از ۱۰ مربع به صورت افقی و ۱۰ مربع به صورت عمودی تشکیل شده است. هر مربع روی این صفحه دارای ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در ۱۰ سانتی‌متر است. شکل (۴-۲۵) حالت‌های مختلف الگو، جهت کالیبراسیون را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۵: حالت‌های مختلف الگو جهت کالیبراسیون دوربین

جهت کالیبراسیون دوربین با استفاده از این روش، حداقل به سه تصویر در حالت‌های متفاوت نیاز است. در این تحقیق از ۱۹ تصویر در حالت‌های مختلف که تعدادی از آن‌ها در شکل (۴-۲۶) مشاهده می‌شود، جهت کالیبره کردن وبکم متصل به بازوی ربات با استفاده از جعبه ابزار متلب استفاده شده است. نحوه‌ی انجام کار به این صورت است که در حالت‌های مختلف از صفحه شطرنجی عکس تهیه شده و این تصاویر به عنوان ورودی به جعبه ابزار کالیبراسیون اعمال می‌شود. شکل (۴-۲۶) حالت‌های مختلف صفحه شطرنجی آشکار شده با استفاده از جعبه ابزار متلب و همچنین میانگین خطای پیکسلی برای وبکم متصل به ربات را نمایش می‌دهد.



ب

الف

شکل ۴-۲۶: الف - حالت‌های مختلف الگو، ب - میانگین خطای پیکسلی

مقادیر پارامترهای داخلی دوربین متصل به بازو (K) و پارامترهای اعوجاج در زیر آمده است.

$$K = \begin{bmatrix} 989.94 & 0 & 664.4805 \\ 0 & 990.75 & 369.977 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۸-۴)$$

$$\text{Radial distortion} = [0.00102 \quad 0.1629 \quad -0.4093] \quad (۱۹-۴)$$

$$\text{Tangential distortion} = [0.00205 \quad -0.00169] \quad (۲۰-۴)$$

به طور مشابه جهت کالیبراسیون دو دوربین ثابت موقعیتیابی، از جعبه ابزار کالیبراسیون دو دوربین، در نرم‌افزار متلب استفاده شد. در این روش نتایج علاوه بر پارامترهای داخلی دوربین شامل دوران دستگاه مختصات متصل به یکی از دو دوربین به دستگاه متصل به دوربین دیگر نیز است. پارامترهای

داخلی و خارجی دو دوربین در جدول (۴-۵) و (۴-۶) ارائه شده است:

جدول ۴-۵: پارامترهای داخلی سیستم موقعیتیاب

پارامترها	دوربین ۱	دوربین ۲
α	۵۲۵/۵۳۱	۹۹۱/۵۳۰
β	۲۷۳/۵۳۱	۹۳۰/۵۳۰
u_0	۹۷۷/۴۸۹	۴۵۱/۴۹۰
v_0	۹۵۲/۳۱۰	۵۴۹/۳۱۴

$$R = [2.248 \quad 0.299 \quad -0.144] \quad (21-4)$$

$$T = [-167.756 \quad 497.570 \quad 3754.13] \quad (22-4)$$

در رابطه (۲۷-۴)، R دوران و T انتقال دوربین دوم نسبت به دوربین مرجع بر حسب میلی متر است.

۴-۱۷- بازسازی سه بعدی

مهم ترین بخش در بازسازی سه بعدی، این است که در تصویر تهیه شده از محیط، عمق تک تک پیکسل ها را داشته باشیم. با کالیبراسیون دوربین و لیزر می توان تک تک نقاط لیزر (نقاط اندازه گیری شده در مختصات فاصله یاب لیزری) را به مختصات دوربین با رابطه (۳-۵) تبدیل کرد.

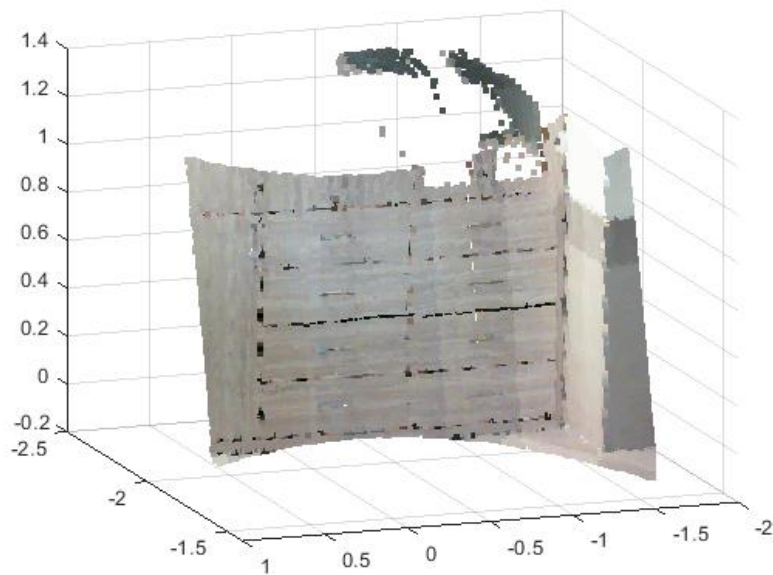
$$P_c = \phi^{-1}(P^f - \Delta) \quad (23-4)$$

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 سه بعدی در نظر بگیریم و نقاط در دستگاه مختصات دوربین را به دستگاه مختصات جهانی تبدیل کرده و داده های سه بعدی همراه با بافت را رسم کنیم.

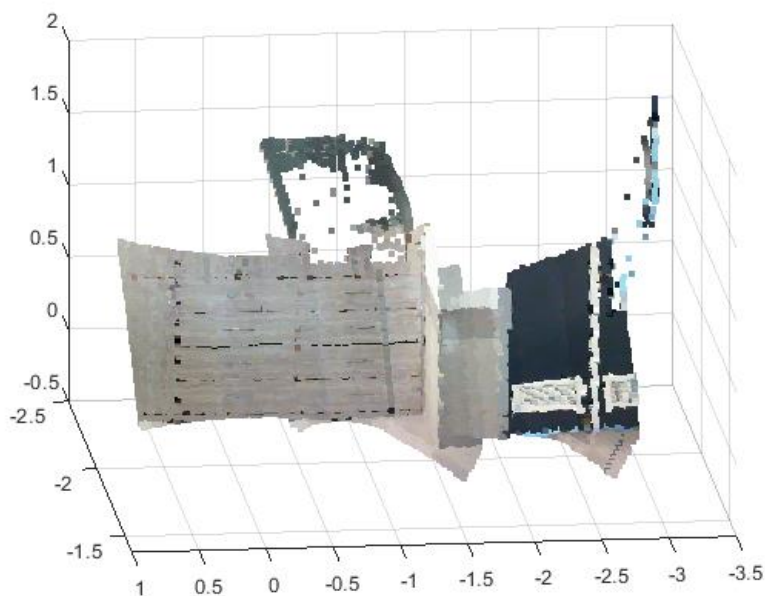
۴-۱۸- بازسازی سه بعدی محیط های داخلی

در این تحقیق، محیط مورد نظر جهت بازسازی سه بعدی آزمایشگاه رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود است. موقعیت یابی ربات در محیط با استفاده از دو دوربین ثابت متصل شده در اتاق انجام می پذیرد. ربات جهت اسکن کامل محیط، در محیط شروع به حرکت کرده و پس از ثابت شدن ربات، مفصل ۱ بازوی ربات شروع به اسکن به صورت دورانی در زاویه ای ۸۰ درجه با تفکیک پذیری ۰/۵ درجه می کند. اتمام اسکن تقریباً ۲ دقیقه طول می کشد. در این مدت زمان فاصله یاب لیزری ۱۶۰ خط اسکن که هر خط حاوی ۴۲۳ نقطه در دو بعد است را تولید می کند. همچنین متناظر با هر خط اسکن، یک تصویر توسط دوربین متصل به ربات از صحنه ی قابل مشاهده ی دوربین و فاصله یاب لیزری گرفته می شود. نقاط هر خط اسکن فاصله یاب لیزری با استفاده از رابطه ی (۳-۵۵) به مختصات پیکسلی تصویر گرفته شده تبدیل و از پیکسل های متناظر با نقاط فاصله یاب لیزری اطلاعات بافت (رنگ پیکسل) استخراج می شود. نقاط لیزر که در دستگاه مختصات دوربین بیان شده اند، با استفاده از

توضیحات بخش (۴-۱۶) به مختصات جهانی تبدیل و همراه با بافت در مختصات جهانی رسم می‌شوند. حرکت ربات در محیط برای انجام اسکن بعد به گونه‌ای انجام می‌پذیرد که هر پویش کمترین همپوشانی را با پویش قبلی داشته باشد. در شکل (۴-۲۷) و (۴-۲۸)، دو اسکن پشت سر هم از محیط با موقعیت‌های متفاوت ربات مشاهده می‌شود.

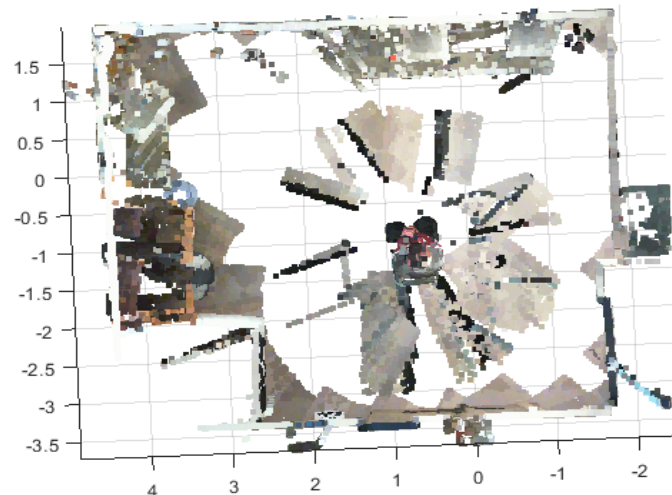


شکل ۴-۲۷: اسکن اول ربات از محیط



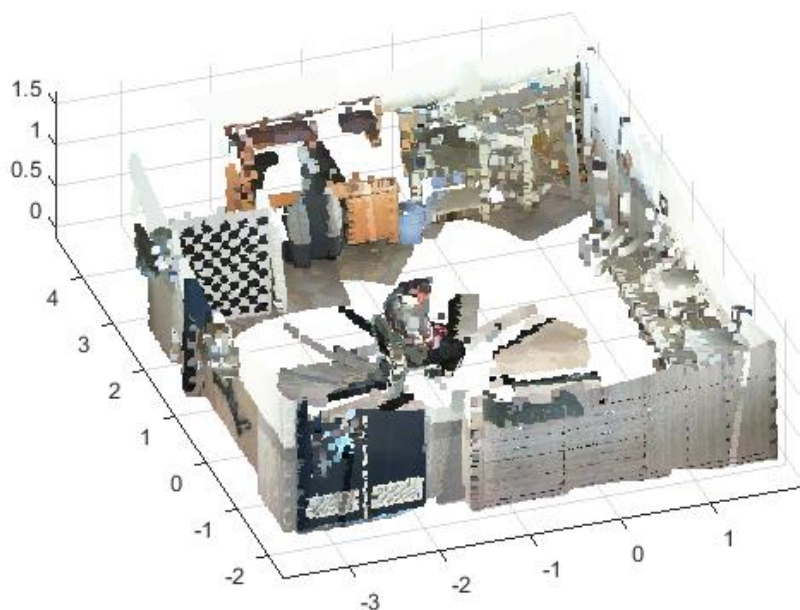
شکل ۴-۲۸: اسکن اول و دوم ربات

همان‌طور که در دو شکل (۲۷-۴) و (۲۸-۴) مشاهده شد، هر اسکن جدید اسکن قبلی را تکمیل می‌کند. این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که یک اسکن کامل از محیط ایجاد شود. در شکل (۲۹-۴) اسکن سه‌بعدی کامل از یک اتاق با استفاده از فاصله‌یاب دوبعدی لیزری و دوربین وبکم نصب شده بر روی بازوی ربات کوکا، از نمای بالا نمایش داده شده است.



شکل ۴-۲۹: محیط اسکن شده از دید بالا

در شکل (۳۰-۴)، تصویری از محیط اسکن شده از نمای دیگر نمایش داده شده است. در این تحقیق، از وبکم شرکت ماکروسافت که قابلیت تنظیم شدت نور در محیط‌های کم نور را دارا است، استفاده شد. استفاده از این وبکم موجب ایجاد روشی مقاوم به تغییرات شدت نور صحنه می‌شود.



شکل ۴-۳۰: اسکن کامل محیط

۴-۱۹- نتیجه‌گیری

در ابتدای این فصل، تجهیزات مورد استفاده جهت بازسازی محیط و نحوه‌ی راه‌اندازی هر یک از تجهیزات توضیح داده شد. همچنین نحوه‌ی تنظیم تجهیزات به یکدیگر و نحوه‌ی تولید نقشه تشریح شد. نتایج بازسازی سه‌بعدی ایجاد شده از محیط در شکل‌هایی نمایش داده شد. در این تحقیق به خاطر استفاده از دوربین و فاصله‌یاب مقاوم به تغییرات کم شدت نور، نقشه‌برداری از محیط در نور کم نیز قابل اجرا است. نتایج کلی در فصل ۵ آمده است.

فصل پنجم

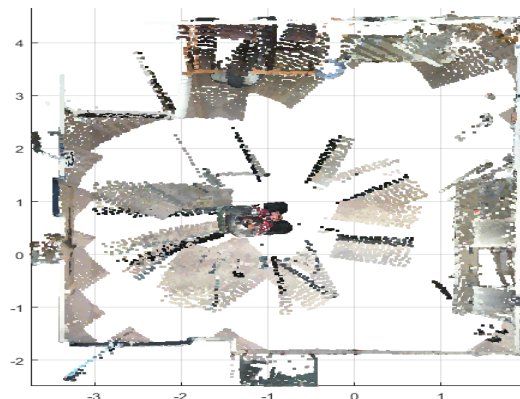
نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۵- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، روشی جدید جهت بازسازی محیط‌های داخلی با استفاده از فاصله‌یاب لیزری دوبعدی و دوربین نصب شده بر روی بازوی ربات متحرک کوکا ارائه شد. 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 نقشه‌برداری از محیط می‌شود. در سیستم پیشنهادی به دلیل استفاده از سیستم موقعیت‌یابی استریو مستقل از ربات، نقشه‌برداری فاقد خطای تجمعی ناشی از خودمکان‌یابی است. این مسأله در مقایسه‌ی دو تصویر الف و ب شکل (۱-۵) قابل مشاهده است.



ب



الف

شکل ۱-۵: الف- اسکن محیط با سیستم پیشنهادی، ب- اسکن محیط با الگوریتم ICP [۴۳]

همچنین با انجام آزمایش‌هایی مشخص شد که در سیستم پیشنهادی با چند بار اسکن یک صحنه، گپ‌های بین ابر نقاط دارای رنگ، پر شده و تفکیک‌پذیری نقشه‌ی ایجادشده افزایش یافته و المان‌های موجود در صحنه را با وضوح بهتری می‌توان نمایش داد.

۲-۵- پیشنهادها برای کار آتی

در این پایان‌نامه از سیستم موقعیت‌یابی با استفاده از دو دوربین جهت موقعیت‌یابی ربات متحرک در صحنه استفاده شد. پیشنهاد می‌شود از سایر حسگرهای موقعیت‌یابی، جهت تخمین موقعیت ربات

استفاده شود تا قابلیت سیستم جهت اسکن محیط‌های گوناگون افزایش یابد. حسگر فاصله‌یاب لیزری استفاده شده در این تحقیق، در محیط‌های داخلی یا مکان‌های با نور کم کاربرد دارد. استفاده از این سنسور در مکان‌های دارای تابش نور شدید احتمال بروز خطا را بسیار افزایش می‌دهد. همچنین به علت وجود اشیاء شفاف یا بسیار تیره در محیط واقعی، بهتر است این سنسور به صورت ترکیبی با سایر سنسورها استفاده شود. با در دسترس بودن نقشه‌ی سه‌بعدی، استفاده از سیستم‌های واقعیت مجازی برای نمایش نقشه‌ی سه‌بعدی و استفاده از سنسورهای موقعیت‌یابی موجود در این تجهیز، جهت ارسال سیگنال‌های کنترلی به ربات موجود در محیط جهت انجام وظیفه‌ای خاص از طریق اینترنت یا امواج رادیویی پیشنهاد می‌شود. تشخیص اشیاء موجود در محیط و جداسازی بافت بنا مانند دیوارها، کف و سقف محیط‌های داخلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در کاربردهای متعدد رباتیکی می‌تواند استفاده شود. دقت اسکن محیط با استفاده از رادار لیزری و دوربین نصب شده بر روی ربات، وابسته به دقت زاویه‌ای موتور مفصل مورد استفاده جهت اسکن است. موتورهای استفاده شده در ربات کوکا دارای دقت زاویه‌ای حداقل ۰/۵ درجه هستند. پیشنهاد می‌شود با استفاده از سایر موتورها که دارای دقت زاویه‌ای بیشتری نسبت به این بستر است، استفاده شود.

- [1] R. Smith, M. Self, and P. Cheeseman, "Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics," in *Autonomous Robot Vehicles*, New York, NY: Springer New York, 1990, pp. 167–193.
- [2] J. Leonard, F.H. Durrant-Whyte, "Mobile robot localization by tracking geometric beacons," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 3, pp. 376–382, 1991.
- [3] B. Williams, G. Klein and I. Reid., "Real-time SLAM relocalisation," in *IEEE 11th International Conference on 2007 Oct 14, 2007*, pp. 1–8.
- [4] P. Vieira, R. Ventura, "Interactive mapping in 3D using RGB-D data," in *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2012, pp. 1–6.
- [5] E. Olson, J. Hauck, N.A. Patronik, "Intuitive user interface control for remote catheter navigation and 3D mapping and visualization systems," *U.S. Patent 9,888,973*, issued February 13, 2018.
- [6] J. Jeong, T. Yoon and J. Park , "Multimodal sensor-based semantic 3D mapping for a large-scale environment," *Expert Syst. Appl.*, vol. 105, pp. 1–10, 2018.
- [7] E. Kaufman, K. Takami, Z. Ai, "Autonomous Quadrotor 3D Mapping and Exploration Using Exact Occupancy Probabilities," *2018 Second IEEE Int. Conf. Robot. Comput.*, pp. 49–55, 2018.
- [8] H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, "An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 45, no. 3–4, pp. 181–198, 2003.
- [9] M. Bosse, R. Zlot, "Continuous 3D scan-matching with a spinning 2D laser," in *Robotics and Automation, 2009*, pp. 4312–4319, 2009.
- [10] 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, 2001.
- [11] D. Roca, J. Martínez-Sánchez and S. Lagüela, "Novel Aerial 3D Mapping System Based on UAV Platforms and 2D Laser Scanners," *J. Sensors*, vol. 2016.
- [12] K. Ohno, T. Nomura, and S. Tadokoro, "Real-Time Robot Trajectory Estimation

- and 3D Map Construction using 3D Camera,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5279–5285, 2006.
- [13] S. May *et al.*, “Three-dimensional mapping with time-of-flight cameras,” *Journal of Field Robotics.*, vol. 26, no. 11–12, pp. 934–965, Nov. 2009.
- [14] Masahiro Tomono, “Robust 3D SLAM with a stereo camera based on an edge-point ICP algorithm,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 306–311, 2009.
- [15] M. Ylimäki, J. Kannala and J. Kannala, “Accurate 3-D Reconstruction with RGB-D Cameras using Depth Map Fusion and Pose Refinement,” in *IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2018, pp. 1988–1982.
- [16] D. Maier, A. Hornung, and M. Bennewitz, “Real-time navigation in 3D environments based on depth camera data,” in *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 692–697, 2012.
- [17] P. Henry, M. Krainin and E. Herbst, X. Ren, D. F.-E, “RGB-D mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments,” in *Experimental Robotics*, Springer, pp. 477–491, 2010.
- [18] F. Endres and et al “An evaluation of the RGB-D SLAM system,” in *Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference* , pp. 1691–1696, 2012.
- [19] 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*, 2012, pp. 5291–5297.
- [20] C. Guo, S. Roumeliotis, “IMU-RGBD camera extrinsic calibration: Observability analysis and consistency improvement,” in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany*, pp. 2920–2927, 2013.
- [۲۱] محمدجواد، طهماسبی، "مدل سازی سه بعدی محیط داخلی به وسیله ی سنسور کینکت." کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۷.
- [22] B. Hiebert-Treuer, "An Introduction to robot slam (simultaneous localization and mapping)." *Bachelor's Theses, Middlebury College, Middlebury, VT, USA* , 2007.
- [23] Z. Chen, J. Samarabandu and R. Rodrigo, “Recent advances in simultaneous localization and map-building using computer vision,” *Advanced Robotics* , vol. 21, no. 304, pp. 233–265, 2007.

- [24] S. Izadi and 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.
- [25] R. Dahiya and M. Valle, “*Robotic tactile sensing: technologies and system.*”, Springer Science, 2012.
- [26] F. Abrate, B. Bona and M. Indri , “Experimental EKF-based SLAM for Mini-rovers with IR Sensors Only.,” in *Electrochemical methods corrosion Research*, 2007.
- [27] “Online Shop Ultrasonic Module HC-SR04 Distance Measuring Transducer Sensor HC SR04 HCSR04 ultrasonic transducer ultrasonic sensor | Aliexpress Mobile.” [Online]. Available: <https://m.aliexpress.com/item/32717533683.html>. [Accessed: 09-Jan-2019].
- [28] A. Karbowski, “The use of Doppler effect in science education,” 1842.
- [29] G. M. Zanuttigh, Pietro and Marin, Giulio and Dal Mutto, Carlo and Dominio, Fabio and Minto, Ludovico and Cortelazzo, *Time-of-flight and structured light depth cameras*. Heidelberg: Springer, 2016.
- [30] Z. Zhang, “Microsoft kinect sensor and its effect,” *IEEE Multimed.*, vol. 19, no. 2, pp. 4–10, 2012.
- [31] L. Atmakuri, “3D Reconstruction of a Geographic Scene by Laser Scanning using a Micro UAV.” *Master's Thesis, Lulea University of Technology*, 2015.
- [32] Robert B, K. Konolige. "Range sensors." In *Springer Handbook of Robotics*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 521-542, 2008.
- [33] R. Hartley, A. Zisserman, “Multiple view geometry in computer vision”, 2nd Edition, Cambridge University, 2004.
- [34] R. Jain, R. Kasturi, B. G. Schunck , “Machine vision”, New York: McGraw-Hill, 1995.
- [35] Zhengyou Zhang, “Camera calibration with one-dimensional objects,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 26, no. 7, pp. 892–899, Jul. 2004.
- [36] B. K. Horn, H. Hilden, and S. Negahdaripour, “Closed-Form Solution of Absolute Orientation using Orthonormal Matrices Suppressing traffic flow instabilities using bilateral control View project Underwater Computer Vision using Opto-Acoustic Imagery View project,” *Artic. J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 5, no. 7, pp. 1127–1135, 1988.

- [37] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 22, pp. 1330–1334, 2000.
- [38] Q. Zhang and R. Pless, "Extrinsic calibration of a camera and laser range finder," in *IROS*, 2004, vol. 3, pp. 2301–2306.
- [39] D. G. Luenberger, *Introduction to linear and nonlinear programming*. Addison-Wesley publishing company, 1973
- [۴۰] نایبی آستانه، امیر حسین، "رادیایی سه بعدی/جسام صلب با چند دوربین." کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶.
- [41] "YUBOT." www.yubot-store.com/ .
- [42] "Microsoft Lifecam." <https://www.microsoft.com/accessories/en-us/products/webcams/lifecam-cinema/h5d-00013>. .
- [43] "scanin laser range finder URG-04LX Specifications" www.Roboshop.com.
- [44] R. Gonzalez, R. Woods , "Digital image processing", 2nd Edition, Prentice Hall, 1989.
- [45] J. DU, "3D Vision for Mobile Robots: Mapping, Exploration and Telepresence." Master's Thesis, Zhejiang University, 2007.

Abstract

Outdoor maps and navigation information delivered by modern services and technologies like Google Maps and Garmin navigators have revolutionized the lifestyle of many people. Motivated by the desire for similar navigation systems for indoor usage from consumers, advertisers, emergency rescuers/responders, etc. In order to provide environment map, it is necessary to measuring depth simultaneously with the intensity and color of scene points.

In this thesis, the depth is measured by a scan-line laser and the texture of scene points by RGB-camera is driven. These sensors fixed on a mobile robot's manipulator. In order to find the localizing of a mobile robot in the scene, the stereo vision mechanism is used .

Registration of 3D points scanned by laser scanner with the texture, the pose of camera relative to laser scanner should be determined.and color of that point is needed. Rotation matrix and translation vector of camera system fixed on the robot relative laser scanner is constant and is extracted in the calibration process. To find the robot position in 3D word coordinate system is used as a stereo vision system including two fixed cameras in the scanned environment. In a scenario mobile robot in the room to capture depth and texture information from different angles of the scene. The depth and texture information using by translation matrix of laser coordinate system to camera coordinate system and pose of the robot can be registered and plotted in 3D reference coordinate system. In the proposed method, due to the fact that the robot's position is not dependent on the information of the robot connected sensors, there is no accumulation error due to the robot locating itself. The resolution of the 3D reconstruction created from the environment in this study is 0.35 in 0.5 degrees. The results indicate that the reconstruction of the environment has very good accuracy.

Keywords: 3D rendering, 2D laser depth sensor, producing point cloud, indoor environments.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanic, & Mechatronic Engineering

**3D Environment reconstruction Using Optical Sensors Installed on
Mobile Robot**

By: Saeed Nouri

Supervisors:

Dr. Alireza Ahmadyfard

Dr. Amir hosein Nayebi astane

January 2019