

تعیین موقعیت عملگر نهایی یک ربات موازی چهار درجه آزادی با استفاده از روش بینایی ماشین

الناز قنبری^۱، کارشناسی ارشد، مهران محبوب‌خواه^۲، دانشیار، قادر کریمیان^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - el-ghanbary92@ms.tabrizu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - karimian@tabrizu.ac.ir

چکیده: مکانیسم‌های موازی به دلیل دقت و سفتی بالاتر نسبت به ربات‌های سری، کاربردهای زیادی دارند. تضمین دقت حرکتی آن‌ها، نیازمند اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری عملگر نهایی ربات و انجام کالیبراسیون سینماتیکی ربات است. از میان انواع ابزارهای دقیق اندازه‌گیری، روش بینایی ماشین، دارای مزایایی نظیر هزینه کم، کاربرد آسان و دقت نسبتاً مناسب است. در این پژوهش، یک سامانه اندازه‌گیری بر پایه علم بینایی ماشین برای اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری سکوی متحرک یک ربات موازی چهار درجه آزادی، در محیط نرم‌افزاری متلب، طراحی شده است. ابزار اندازه‌گیری، یک دوربین استریو می‌باشد. کالیبراسیون دوربین با جعبه‌ابزار متلب انجام شده است. یک هدف مثلثی به‌عنوان ویژگی تصویر در اندازه‌گیری استفاده می‌شود. با تصویربرداری از موقعیت‌های سکو و پردازش تصاویر در سامانه طراحی شده در نرم‌افزار متلب، ماتریس دوران و بردار جابجایی موقعیت‌ها به دست آمده و موقعیت دقیق عملگر نهایی ربات مشخص می‌شود. برای بررسی صحت و دقت سامانه اندازه‌گیری پیشنهادی، از روش دقیق متداول دیگری که در آن، سنج و ساعت اندازه‌گیری به کار می‌رود نیز استفاده شده است. با توجه به ماهیت روش بینایی ماشین، نتایج حاصل از آن در این پژوهش از دقت قابل‌قبولی برخوردار بوده و در صورت تقویت سخت‌افزارهای مورد استفاده، می‌توان به دقت‌های بالا نیز دست یافت.

واژه‌های کلیدی: مکانیسم موازی، بینایی ماشین، استریو، استخراج ویژگی، ماتریس چرخش، بردار جابجایی

Pose determination of a 4DOF parallel robot end effector using machine vision

E. Ghanbary¹, Master of science, M.Mahboobkhah², Associate professor, G.Karimian³, Associate professor

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: el-ghanbary92@ms.tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: mahboobkhah@tabrizu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: karimian@tabrizu.ac.ir

Abstract: Parallel mechanisms are more utilized, because of their extra precision and stiffness in comparison with serial mechanisms. Measuring position and orientation (pose) of parallel robot end effector and performing kinematic calibration, is a guaranty for, moving precision of these robots. Through different measurement devices, machine vision has advantages such as low cost, simplicity in use and rather appropriate precision. In this research, in order to measure pose of end effector of a 4-DOF (degree of freedom) parallel robot, a vision-based measurement system, is designed and implemented in Matlab software. The laboratory device is a stereo camera. Camera calibration is carried out in Matlab. A triangular shape is used as feature on the robot end effector. By processing the images acquired from pose of end effector, in designed measurement system, rotation matrix and translation vector are obtained and the exact position of the end effector is revealed. For investigating precision and accuracy of proposed measurement system, a conventional measurement method with the help of gauge block and indicator, is used. According to the nature of machine vision, the results achieved in this examination, are acceptable; although better precision can be attained by improving devices used in this research.

Keywords: Parallel Mechanism, machine vision, stereo, feature extraction, rotation matrix, translation vector.

تاریخ ارسال مقاله: ۹۴/۹/۱۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۹۴/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۲۰

نام نویسنده مسئول: مهران محبوب‌خواه

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی مکانیک

۱- مقدمه

مکانیسم‌های موازی محبوبیت فراوانی در صنعت و علوم مهندسی نظیر ماشین‌کاری، علم اندازه‌گیری، تجهیزات پزشکی پیدا کرده‌اند. این مکانیسم‌ها ساختار سینماتیکی حلقه بسته‌ای هستند که دقت و سفتی بالا و توانایی تحمل بارهای زیادی را دارند [۱]. تعداد زیاد اتصالات و مفاصل غیرفعال، عملکرد این مکانیسم‌ها را تحت الشعاع قرار می‌دهند. این مشکل توسط کالیبراسیون سینماتیکی ساختار، قابل جبران است که مرحله مهم این پروسه، تعیین مکان (موقعیت^۱ و جهت‌گیری^۲) سکوی متحرک ربات به کمک ابزار اندازه‌گیری خارجی است [۲]. لیزر، زاویه‌سنج مهندسی، شیب‌سنج، ماشین‌اندازه‌گیری مختصات، سیستم دو توپ و میله [۳-۷]، ابزارهای اندازه‌گیری متداولی در این زمینه هستند که در این میان، روش اندازه‌گیری مبتنی بر بینایی^۳ که روشی غیرتماسی با هزینه پایین و در عین حال با تنظیمات و کاربرد آسان است، در ده سال اخیر به‌عنوان یک ابزار استاندارد در علم اندازه‌گیری تثبیت شده است و روش ساده‌تر و البته با دقت نسبتاً مناسبی می‌باشد [۸، ۹].

استفاده از بینایی استریو حوزه کاری گسترده‌ای دارد، برای مثال در مرجع [۱۰] برای کاربرد جراحی از یک سامانه واقعیت‌افزوده و از بینایی استریو استفاده شده است که در آن اطلاعات حاصل از تعیین موقعیت سه‌بعدی سه نشانه دایروی که روی عضو مورد آزمایش قرار دارند، به تصاویر ام‌آر‌آی آن عضو افزوده می‌شود و در نهایت تصاویر حاصل از انطباق مدل سه‌بعدی با تصاویر حقیقی، در جراحی به کار می‌رود. برای استخراج اطلاعات سه‌بعدی و ساخت مدل سه‌بعدی، از یک دوربین استریو با تفکیک‌پذیری 1024×768 پیکسل استفاده شده و با استفاده از روابط مربوط به استریو موقعیت سه‌بعدی نشانه‌ها تعیین شده و مدل سه‌بعدی ساخته می‌شود. در مرجع [۱۱]، تخمین مکان بازیکنان فوتبال در زمین با دوربین‌های کالیبره‌نشده، بررسی شده است. برای کالیبراسیون، استخراج نقاط مناسبی از زمین فوتبال که از تقاطع بهترین دسته خطوط که از تبدیل هاف به دست می‌آیند، مدنظر است؛ رابطه‌ای بین مختصات دویبعی دو تصویر فرضی از زمین فوتبال به دست می‌آید. در مرحله بعد با عمود فرض کردن یکی از دوربین‌ها نسبت به زمین، رابطه‌ای نیز برای مختصات تصویر دوربین مذکور، برحسب اندازه‌های استاندارد زمین فوتبال به دست می‌آید که با جایگذاری آن در رابطه اولیه، رابطه نهایی بین مختصات دویبعی تصویر دوربین (با هر زاویه دلخواه) و مختصات سه‌بعدی نقاط در زمین فوتبال، به دست می‌آید؛ با محاسبه خطای بین، خطوط تبدیل‌یافته با این رابطه و خطوطی که از تصویر استخراج شده‌اند، دسته خطوط با کم‌ترین خطا به‌عنوان بهترین دسته برای کالیبراسیون انتخاب می‌شوند. از نظر متحرک یا ثابت بودن دوربین، دو نوع تنظیمات وجود دارد؛ در نوع متحرک، یک یا دو دوربین (با مشخصات اسمی نوری یکسان) روی سکوی متحرک ربات قرار می‌گیرند، که به اصطلاح به سیستم چشم-روی-دست^۴ مشهور است. این روش، تخمین دقیقی از موقعیت سکو می‌دهد، اما به دلیل حرکت دوربین با سکوی ربات، تنها

اندازه‌گیری به‌صورت محلی امکان‌پذیر است و باید یک قید کالیبراسیون دقیق در محیط ربات، به‌عنوان مبنای سکوی ربات، قرار داشته باشد. در مقابل، روش دوربین ثابت، می‌تواند در ربات‌های موازی به کار رود که در آن، دوربین طوری در فضای حرکتی ربات قرار داده می‌شود که بتواند دید مناسبی از ویژگی‌های موردنظر روی عملگر نهایی ربات داشته باشد. تنها محدودیت این روش، مصالحه‌ای است که باید بین دقت و میدان دید دوربین داشت (به‌طوری که دقت با کاهش فاصله کانونی دوربین افزایش می‌یابد اما از طرفی میدان دید نیز کاهش می‌یابد). اگر از یک دوربین استفاده شود، پردازش تصویر سریع‌تر انجام می‌شود، اما این روش در تخمین عمق عملگر نهایی نسبت به دوربین، محدودیت دارد. در استفاده از دو دوربین، عمق به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

در مراحل اندازه‌گیری، می‌توان از شکل هندسی بازو و یا مفاصل ربات به‌عنوان یک ویژگی از تصویر که قابل شناسایی و تعقیب باشد استفاده کرد، اما از آنجایی که در ربات‌های موازی امکان سد شدن مسیر دید دوربین وجود دارد، بهترین راه، استفاده از نشانه‌گذاری روی عملگر نهایی ربات می‌باشد. هرچند استفاده از سه نقطه روی عملگر نهایی ربات برای تشخیص موقعیت و جهت‌گیری عملگر کافی می‌باشد، اما استفاده از سه نقطه به دلیل به وجود آمدن نویز و خطای اندازه‌گیری اشکال دارد. از این‌رو بهتر است چهار نقطه یا بیش‌تر به کار برده شوند؛ تعداد نقاط بیش‌تر خطا را کاهش می‌دهد، اما افزایش زمان محاسبات را به همراه خواهد داشت [۲]. در مرجع [۱۲] از بینایی استریو (دو دوربین) در تعیین محل بازوی مکانیکی یک ربات سری استفاده شده است. دو دوربین با اجزاء حساس به نور از نوع سی‌موس^۵ و تفکیک‌پذیری 640×480 پیکسل، به‌عنوان یک دوربین استریو، استفاده شده‌اند. موقعیت سه نقطه روی بازوی ربات به کمک روش مثلث‌بندی، اندازه‌گیری شده است. با روش مثلث‌بندی، محاسبه عمق یا بعد سوم یک نقطه در فضای سه‌بعدی، با یافتن نقاط متناظر در دو تصویر استریو و سپس محاسبه اختلاف مکان^۶ (متناسب با عکس عمق)، امکان‌پذیر است. در این مقاله برای تخمین جهت‌گیری نیز از موقعیت‌های اندازه‌گیری‌شده برای سه نقطه و روابط برداری استفاده شده است. برای ربات سری در فاصله ۴۰۰ میلی‌متر از دوربین، دقت اندازه‌گیری یک میلی‌متر و در آزمایش روی یک ربات چرخ‌دار، دقت ۷ میلی‌متر گزارش شده است. جانز و همکارانش [۱۳] مکان سکوی متحرک یک ربات با فضای کاری ۱۰ میلی‌متر مکعب را با اندازه‌گیری بر پایه بینایی دونا تعیین کردند. دو دوربین تک‌رنگ با تفکیک‌پذیری 1024×1024 پیکسل، به‌صورت عمود نسبت به هم، رو به یک هدف مشکی رنگ با سه توپ سفید روی آن، تنظیم شده است. ابتدا کل تصویر پردازش شده و با تعریف یک آستانه‌گیر درجه خاکستری، پیکسل‌های تصویر به دو بخش سیاه و سفید تقسیم می‌شوند و سپس عمل یافتن توپ‌ها از بین نواحی سفیدرنگ، با محاسبه ضریب گردی بر اساس محیط و مساحت، صورت می‌پذیرد؛ اگر این ضریب، بالاتر از $0/85$ باشد با آن جزء به‌صورت هدف سفید برخورد شده و سایر مراحل

سی‌سی‌دی^۱ و تفکیک‌پذیری ۶۴۸×۴۹۲ پیکسل، به‌عنوان دوربین استریو برای استفاده در پژوهش آن‌ها، کالیبره و تنظیم شدند. دنبال کردن سکو، با استخراج شکل دایروی آن با استفاده از الگوریتم تشخیص دایره اسکراموز [۱۷]، که در آن پردازش تصویر، روی نقشه لبه‌های تصویر انجام می‌شود و تنها آن نقاط از نقشه لبه که قویاً کاندیدی برای کانتور دایره هستند در نظر گرفته می‌شوند، انجام شده است. تطابق تصاویر استریو توسط الگوریتم مجموع تفاضلات مربع انجام شده و دقت گزارش شده نیز $۲/۱۸$ میلی‌متر است.

در مرجع [۱۸]، بینایی استریو در کالیبراسیون سینماتیکی یک ربات صنعتی سری به کار رفته است که در آن از روش چشم-روی-دست استفاده شده و دو دوربین از نوع سی‌سی‌دی، با محورهای نوری متعامد روی بازوی ربات قرار داده شده‌اند. نقطه تقاطع محورهای نوری به‌عنوان نقطه مرکزی ابزار در نظر گرفته می‌شود. در فضای کاری ربات، کره‌هایی قرار داده شده‌اند که مکان سه‌بعدی آن‌ها طی پروسه کالیبراسیون، با ابزار اندازه‌گیری بینایی اندازه‌گیری می‌شود. برای وضعیت‌های مختلفی از بازوی ربات، نقطه مرکزی ابزار به مکانی که کره کالیبراسیون قرار دارد، هدایت شده و سپس اندازه‌گیری موقعیت سه‌بعدی توسط سیستم بینایی انجام شده و از این طریق مکان واقعی بازوی ربات تعیین می‌شود. دوربین‌های مورد استفاده، دقت بالایی دارند؛ چراکه هر پیکسل تصویر، $۰/۰۵$ میلی‌متر (از جهان واقعی) را نگاشت می‌کند. دقت موقعیت‌دهی $۱/۲۹$ میلی‌متر گزارش شده است و گفته شده که جهت‌گیری در پژوهش بعدی بررسی می‌شود.

در اینجا ذکر دو نکته ضروری می‌نماید؛ اولاً با سوار شدن سیستم اندازه‌گیری روی ربات، علاوه بر تأثیر وزن تجهیزات در نتایج کالیبراسیون، مانعی در حرکت ربات به وجود می‌آید که همین موضوع امکان به‌کارگیری سیستم بینایی در کنترل ربات را نخواهد داد. همچنین عمود قرار دادن دو دوربین نسبت به هم با دقت کافی، چالش دیگری است که نائل شدن به آن در مقیاس آزمایشگاهی دشوار است، اما در صورت استفاده از دوربین استریویی که در کارخانه و با دقت بالا تولید شده است، این چالش برطرف خواهد شد.

هدف از انجام پژوهش حاضر نیز، طراحی یک سامانه اندازه‌گیری بر پایه علم بینایی ماشین، به‌منظور اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری سکوی متحرک یک ربات موازی با چهار درجه آزادی، است؛ به‌طوری‌که موقعیت و جهت‌گیری سکوی متحرک در دو مکان مختلف در فضا نسبت به هم، به‌صورت یک بردار جابجایی و یک ماتریس دوران گزارش شود. در این مقاله یک نمونه کاربردی استفاده از بینایی ماشین در صنعت، یعنی اندازه‌گیری مکان سکوی متحرک ربات، ارائه شده است. این روش، برخلاف روش‌های سنتی، هزینه پایین‌تر و تنظیمات آسان‌تری داشته و نیاز به فرد متخصص برای استفاده از آن نمی‌باشد. برای اندازه‌گیری با استفاده از سامانه طراحی‌شده، لازم نیست که در تمام مراحل، کنار ربات باشیم بلکه کافی است تصاویر سکو در موقعیت‌های موردنظر را گرفته و هر جا لازم بود آن‌ها را وارد سامانه کرد؛

پردازش و بازسازی سه‌بعدی، روی آن‌ها به‌عنوان ناحیه موردعلاقه، انجام می‌شود. برای ترکیب اطلاعات دوبعدی کسب‌شده از دو دوربین، ارتباط بین دوربین‌ها، طی پروسه کالیبراسیون دوربین، تعیین شد. دقت سیستم اندازه‌گیری در این تحقیق $۱/۵۵$ میکرومتر گزارش شده است.

در تخمین موقعیت بازوی یک ربات سری برای کالیبراسیون به‌هنگام آن در مرجع [۱۴] از یک دوربین مستقر روی بازو (چشم-روی-دست) و یک تخته (صفحه) شطرنجی که در مکان مشخصی نسبت به مختصات جهانی قرار گرفته، استفاده شده است. برای تصحیح استخراج نادرست نقاط صفحه، ابتدا گوشه‌ها به روش هریس، تشخیص داده شده و سپس خطوط افقی و عمودی تخته، استخراج می‌شوند تا از تقاطع آن‌ها نقاط گوشه به دست آیند و سپس آن دسته از نقاط گوشه که به درستی تشخیص داده نشده بودند، تصحیح شوند. در این تحقیق دوربین به روش ژنگ کالیبره شده است و آزمایش‌ها تأثیر زیاد تفکیک‌پذیری دوربین روی دقت نهایی را اثبات کرده‌اند.

ماریک و همکارش [۹] کالیبراسیون خودکار بازوی یک ربات سری را با بینایی استریو انجام دادند. در این تحقیق از یک نشانه مربعی استفاده شده و تناظریابی بر اساس شدت روشنایی پیکسل‌ها، که به آن روش مبتنی بر ناحیه^۷ می‌گویند، انجام شده است. در این روش که حساسیت بالایی به روشنایی محیط دارد، حول نشانه در تصویر چپ، پنجره‌ای در نظر گرفته شده و همبستگی پیکسل‌ها محاسبه می‌شود و برای هر پیکسل تصویر راست نیز همین عمل صورت می‌گیرد. سپس با یک تابع هزینه، تفاوت همبستگی پنجره در تصویر چپ و هر پنجره در تصویر راست محاسبه شده و نقاط متعلق به پنجره‌ها با کم‌ترین مقدار تابع هزینه، به‌عنوان متناظر معرفی می‌شوند. همچنین آن‌ها، برای انجام تناظریابی با دقت بالا، اندازه بهینه پنجره را برابر با نشانه مربعی گزارش کردند. در مقابل این روش، روش مبتنی بر ویژگی^۸، که در آن از یک ویژگی تصویر به‌عنوان علامت راهنما استفاده می‌شود، وجود دارد که این روش حساسیت کم‌تری به شدت روشنایی و دقت بالاتر و البته پیاده‌سازی مشکل‌تری دارد.

شهشهانی [۱۵] برای محاسبه ماتریس چرخش و بردار جابجایی در دو موقعیت مختلف، از بینایی استریو استفاده کرده است. علائم راهنمای استفاده‌شده، ویژگی‌های گوشه مانند (سیفت و سورف) می‌باشد. برای اندازه‌گیری، یک دوربین استریو با تفکیک‌پذیری ۶۴۰×۴۸۰ پیکسل در دو موقعیت مختلف قرار داده است. مبانی طراحی سامانه، مبانی بینایی استریو بوده و به‌منظور تخمین بردار جابجایی و ماتریس چرخش از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است. دقت گزارش‌شده در فاصله ۸۳ میلی‌متری، با ویژگی سیفت، $۱/۹$ میلی‌متر و با ویژگی سورف، $۷/۵$ میلی‌متر می‌باشد.

در مرجع [۱۶]، برای اندازه‌گیری مسیر سه‌بعدی سکوی متحرک یک ربات موازی با سه درجه آزادی، از سیستم اندازه‌گیری سه‌بعدی (بینایی استریو) استفاده شده و دو دوربین با اجزاء حساس به نور از نوع

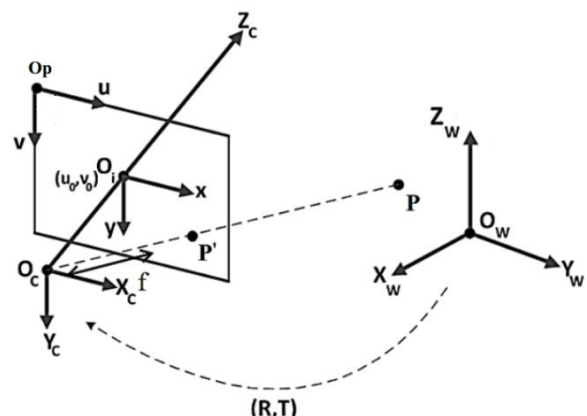
از این رو هنگام کالیبراسیون، عملکرد اصلی سیستم مختل نخواهد شد. استقرار دوربین در فضای کاری ربات و نه روی سکو، مانعی در حرکت ربات نخواهد بود و از این رو در صورت ارتقای سامانه به حالت بلادرنگ، می توان هنگام فعالیت ربات، کنترل آن را هم انجام داد.

همچنین استفاده از بینایی استریو امکان تخمین عمق به طور مستقیم و با دقت بیشتری نسبت به تک دوربین را داده و استفاده از دوربین استریو صنعتی نیز علاوه بر افزایش دقت، نیاز به تنظیم شدن دوربین ها توسط اپراتور را حذف می کند. طبق مرجع [۲] برای اندازه گیری مکان سکو، بهتر است از یک نشانه، روی سکوی ربات استفاده شود؛ از این رو در این تحقیق روش مبتنی بر ویژگی که حساسیت کمتری هم به روشنایی محیط دارد، پیاده سازی شده است و از یک نشانه مثلثی، استفاده می شود و پاره خط های تشکیل دهنده اضلاع آن به عنوان ویژگی، توسط سامانه، استخراج شده و بازسازی سه بعدی برای نقاط ابتدا و انتهای هر یک از خطوط انجام می شود.

الگوریتم سامانه طراحی شده برای تشخیص بهتر مراحل کار در ادامه نشان داده خواهد شد، که هر مرحله از آن در بخش های بعدی توضیح داده می شود. بخش های بعدی مقاله به ترتیب زیر می باشد؛ بخش ۲ مختص توصیف هندسه سیستم تصویر برداری و رابطه بین فضای سه بعدی واقعی و فضای دوبعدی تصویر خواهد بود. در بخش ۳ بینایی استریو و پارامترهای آن توضیح داده می شود، در بخش ۴ روش محاسبه جابجایی و جهت ارائه می شود، توضیح سخت افزار و نرم افزارهای مورد استفاده در بخش ۵ خواهد بود، در بخش ۶، روش و نتایج آزمایش سامانه طراحی شده روی سکوی متحرک ربات توضیح داده می شود و در نهایت جمع بندی مقاله در بخش ۷ ارائه می شود.

۲- هندسه سیستم تصویر برداری

در این بخش، رابطه بین فضای سه بعدی واقعی و فضای دوبعدی تصویر ارائه می شود (شکل ۱). مدل روزنه ای^۱، ساده ترین روش مدل سازی دوربین می باشد؛



شکل ۱: نمایش مدل روزنه ای، به همراه دستگاه های مختصاتی

مطابق شکل ۱، در این مدل برای کسب تصویر یک نقطه در فضای سه بعدی با مختصات P، روی صفحه تصویر دوربین، از آن نقطه خطی را به مرکز نوری دوربین (Oc) وصل کرده که محل برخورد این خط با

$$x = f X_c / Z_c, \quad y = f Y_c / Z_c \quad (1)$$

رابطه ۲ نیز ارتباط بین مختصات تصویر نقطه در دستگاه مختصاتی صفحه تصویر $P' = [x, y]$ و مختصات تصویر نقطه در دستگاه مختصاتی پیکسلی $P' = [u, v]$ را بیان می کند [۲۰].

$$u = x/d_x + u_0, \quad v = y/d_y + v_0 \quad (2)$$

که در آن d_x و d_y اندازه پیکسل های تصویر به ترتیب در جهت افقی و عمودی صفحه تصویر (با واحد mm/pixel) است.

با جایگذاری رابطه ۱ در رابطه ۲ و بازنویسی آن به صورت ماتریسی، رابطه ۳ به دست می آید.

$$Z_c [u \quad v \quad 1]^T = [K \quad 0] [P_c \quad 1]^T \quad (3)$$

که در آن Z_c بیانگر فاصله نقطه P از مرکز نوری دوربین (Oc) است. در بخش ۳-۳ در مورد چگونگی محاسبه Z_c توضیح داده می شود. K ماتریس پارامترهای ذاتی بوده و به صورت رابطه ۴ تعریف می شود.

تصویر متفاوت از یک صحنه دریافت و به مغز می‌فرستند و مغز، تفاوت تصاویر را درک و ترکیب کرده و حس عمق و فاصله شیء موردنظر را به انسان می‌دهد، الهام گرفته‌شده [۲۲] و بینایی استریو که تشخیص ساختار سه‌بعدی و عمق اجسام با استفاده از دو تصویر کسب‌شده از دو دوربین با دید متفاوت نسبت به صحنه را می‌دهد، به وجود آمده است [۲۱]. در ادامه پارامترهای بینایی استریو توضیح داده می‌شود.

۳-۱- انتخاب و استخراج ویژگی تصویر

در بینایی استریو، با توجه به مسئله تعریف‌شده می‌توان از یک سری نشانه‌ها (که به‌طور طبیعی وجود دارند و یا به‌طور مصنوعی ایجاد می‌شوند) برای مثال لبه، پاره‌خط، گوشه یا نقاط گوشه‌مانند، به‌عنوان هدف استفاده کرده و سپس با توجه به ماهیت نشانه‌ها، آن‌ها را از تصاویر استخراج کرد. پس از استخراج ویژگی، برداری موسوم به بردار ویژگی یا توصیف‌گر ویژگی تشکیل می‌شود که حاوی صفات ویژگی موردنظر بوده و در مراحل بعدی مورد استفاده خواهد بود [۲۱].

در این پژوهش، از پاره‌خط به‌عنوان علائم راهنما استفاده شده است. یک نشانه مثلثی به‌عنوان علامت راهنما، روی سکوی متحرک ربات موازی نصب می‌شود و پاره‌خط‌های تشکیل‌دهنده اضلاع این مثلث به‌عنوان ویژگی، طی پردازش تصاویر در سامانه طراحی‌شده، استخراج شده و سپس با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از آن، اندازه‌گیری موقعیت سکو انجام می‌شود. همچنین در این سامانه، به دلیل کاهش هزینه محاسباتی و کاهش خطای اندازه‌گیری در اثر ورود اطلاعات نامربوط، با انتخاب دو نقطه حوالی نشانه مثلثی، یک ناحیه موردعلاقه به وجود آمده و سپس مراحل استخراج پاره‌خط‌ها فقط در این ناحیه صورت می‌گیرد.

در این مرحله از سامانه طراحی‌شده، بعد از فراخوانی تصویر، ابتدا با روش لبه‌یابی کنی^{۱۴} نقاط لبه، شناسایی شده و در یک لیست قرار می‌گیرد. سپس برای ساخت پاره‌خط‌ها، نقاط لبه شناسایی‌شده، به طریق مناسب، به‌هم متصل شده و حدود مرزی تشکیل می‌شود و در مرحله بعد، پاره‌خط‌های تصویر از نقاط لبه متصل به‌هم (کانتورهای مرزی)، استخراج می‌شود. برخی از توابع به‌کار گرفته‌شده در استخراج پاره‌خط‌های تصویر از نقاط لبه، توابع پیاده‌سازی‌شده در منبع [۲۳] می‌باشند. در ادامه به توضیح چگونگی استخراج پاره‌خط‌ها پرداخته می‌شود.

برای ساخت حدود مرزی، اولین نقطه لبه یافته‌شده در تصویر در ابتدای یک لیست جدید قرار می‌گیرد. برای پیدا کردن نقاط لبه بعدی حدود مرزی، از روش اتصال-هشت استفاده می‌شود. به‌طوری‌که هرکدام از هشت نقطه مجاور نقطه مذکور، به‌عنوان نقطه لبه (مستخرج در مرحله لبه‌یابی) باشند به لیست ایجاد می‌افزاید می‌شوند. این کار تا زمانی که نقاط لبه متصل به‌هم، یافته شوند ادامه می‌یابد. در پایان، لیست نقاط متصل به‌هم، بسته شده و جستجوی نقطه لبه جدیدی که در لیست نقاط متصل قبلی، قرار نگرفته است، آغاز می‌شود و تمام مراحل قبلی برای نقطه لبه جدید تکرار می‌شود. که درنهایت، لیست‌هایی از نقاط لبه متصل به‌هم وجود خواهد داشت. در مرحله

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن f_x و f_y فاصله کانونی در جهت محورهای X و Y می‌باشند. به مولفه‌های رابطه ۴ پارامترهای ذاتی^{۱۲} دوربین گفته می‌شود. این پارامترها باید طی پروسه کالیبراسیون دوربین به دست آید.

تا به اینجا رابطه بین مختصات نقطه در فضای سه‌بعدی (P_C) و تصویر آن در صفحه تصویر دوربین ($P' = [u, v]$) توسط رابطه ۳ مشخص شده است. در صورت وجود دستگاه مختصات دلخواه، رابطه‌ای، بین این دستگاه و دستگاه مختصاتی دوربین، تعریف می‌شود. ارتباط بین مختصات نقطه در دستگاه مختصاتی دوربین جهانی^{۱۳} $P_C = [X_C \ Y_C \ Z_C]^T$ و مختصات نقطه در دستگاه مختصاتی جهانی^{۱۴} $P_W = [X_W \ Y_W \ Z_W]^T$ ، در رابطه ۵ نشان داده شده است.

$$P_C = R P_W + T \quad (5)$$

که در آن T بردار جابجایی و R ماتریس چرخش بوده و طبق روابط ۶ و ۷ تعریف می‌شوند.

$$T = [T_x \ T_y \ T_z]^T \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} C_\phi C_\kappa & S_\phi S_\phi C_\kappa - C_\phi S_\kappa & C_\phi S_\phi C_\kappa + S_\phi S_\kappa \\ C_\phi S_\kappa & S_\phi S_\phi S_\kappa + C_\phi C_\kappa & C_\phi S_\phi S_\kappa - S_\phi C_\kappa \\ -S_\phi & S_\phi C_\phi & C_\phi C_\phi \end{bmatrix}$$

که در آن C_i نماد $\cos(i)$ و S_i نماد $\sin(i)$ می‌باشد ($i = \kappa, \phi, \omega$) و Φ و ω و κ به ترتیب زاویه چرخش حول محور X ، Y و Z می‌باشند.

از روابط ۵، ۶ و ۷ داریم:

$$\begin{bmatrix} P_C \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه ۸ در رابطه ۳ داریم:

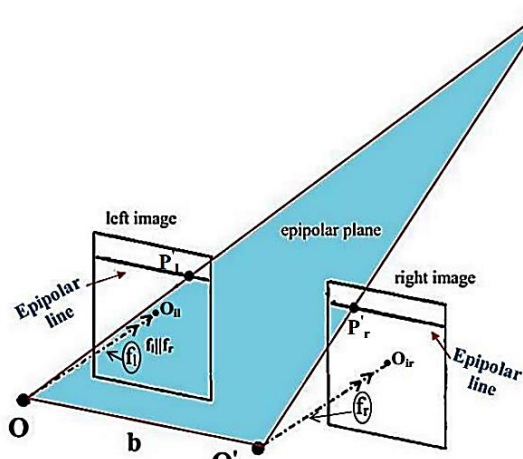
$$Z_C [u \ v \ 1]^T = K [R | T] \begin{bmatrix} P_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

که در آن $K[R | T]$ ، ماتریس تجسم نامیده شده و به R و T ، پارامترهای خارجی^{۱۳} گفته می‌شود [۲۱]. اگر نیاز به کسب مختصات نقطه در دستگاه مختصاتی دلخواه (دستگاه مختصاتی جهانی) باشد، باید پارامترهای خارجی نیز طی پروسه کالیبراسیون دوربین تعیین شوند، اما اگر دستگاه مختصات جهانی منطبق بر دستگاه مختصات دوربین در نظر گرفته شود، رابطه ۹ به شکل رابطه ۳ خواهد بود و فقط تخمین پارامترهای ذاتی، ضروری است.

۳- بینایی استریو

همان‌طور که در توضیح رابطه ۳ آمد، برای کسب اطلاعات سه‌بعدی به‌وسیله استفاده از اطلاعات دوبعدی تصویر، نیاز به محاسبه عمق یا فاصله از مرکز نوری دوربین (Z_C) است. برای این محاسبه، از سیستم بینایی انسان که بینایی برجسته‌بینی نام دارد و در آن دو چشم، دو

استفاده از بینایی استریو، خط پایه نیز به عنوان پارامتر ذاتی دوربین استریو محسوب می شود).



شکل ۳: استریوی موازی

صفحه گذرنده از نقطه P و مراکز نوری دوربین ها، صفحات تصویر را در دو خط به نام خط اپیپولار^{۱۰} قطع می کنند که نقاط تصویر P_l و P_r نیز روی این خطوط واقع هستند. هندسه اپیپولار نشان می دهد که به منظور یافتن متناظر یک نقطه در تصویر چپ، لازم به جستجوی کل تصویر راست نبوده و کافی است خط اپیپولار، جستجو شود؛ همچنین در استریوی موازی به دلیل توازی محور نوری دوربین ها، خطوط اپیپولار نیز با هم موازی و همچنین هم سطر هستند [۱۹].

در پیاده سازی الگوریتم تطابق پاره خط ها، پس از فراخوانی توصیف گرهای ویژگی تصاویر چپ و راست، مراحل زیر پیاده سازی شده است:

الف- برای هر پاره خط در تصویر چپ، شماره سطر نقطه میانی پاره خط، از بردار ویژگی تصویر چپ پیدا می شود و سپس محدوده جستجوی تصویر راست در سطری هم شماره با آن تعیین می شود (با توجه به هندسه اپیپولار).

ب- بین پاره خط موردنظر در تصویر چپ و هر کدام از پاره خط های کاندید (طبق مرحله الف) در تصویر راست، تابع معیاری بر اساس رابطه ۱۰ تشکیل می شود:

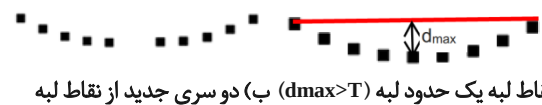
$$\text{Distance}(I_l, I_r) = w_l(\Delta l)^2 + w_\theta(\Delta \theta)^2 + w_m(\Delta \text{midy})^2 + w_c(\Delta c)^2 \quad (10)$$

که در آن $\text{Distance}(I_l, I_r)$ تابع معیار برای مقایسه دو خط مورد بررسی بوده و Δl ، $\Delta \theta$ ، Δmidy و Δc به ترتیب تفاوت اندازه، تفاوت جهت، تفاوت در مختصات v نقطه میانی پاره خط ها و تفاوت کنتراست دو پاره خط بوده و w_l ، w_θ ، w_m و w_c ضریب وزنی آن ها است.

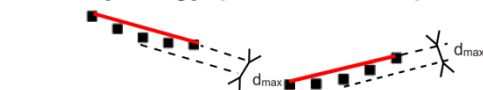
ج- کم ترین مقدار تابع معیار و همچنین پاره خط تصویر راست مربوط به آن تابع معیار را پیدا کرده و به عنوان کاندید نهایی تناظریابی معرفی شود.

د- اگر کم ترین مقدار تابع معیار (مرحله ج) از یک حد آستانه (که با توجه به مسئله تعریف می شود) کمتر باشد، پاره خط تصویر راست مربوط

بعد، برای یافتن پاره خط های مستقیم از حدود مرزی، برای هر لیست نقاط متصل به هم، خطی که نقاط ابتدا و انتهای لیست را به هم متصل می کند، در نظر گرفته می شود و از بین نقاط لیست موردنظر، نقطه ای که بیش ترین فاصله را از خط مذکور دارد انتخاب می شود و در صورتی که این فاصله ($d_{\max}$) از یک حد آستانه (T) بیش تر باشد (شکل ۲-الف)، در آن نقطه، لیست نقاط به دو لیست تقسیم می شود (شکل ۲-ب). سپس کار تجزیه، بر روی لیست های جدید، تا زمانی که بیش ترین فاصله نقاط هر لیست از مقدار حد آستانه کم تر شود، تکرار می شود (شکل ۲-ج) و در نهایت، برای هر پاره خط، یک لیست شامل نقاط روی پاره خط استخراج می شود (شکل ۲-د). شکل ۲، طرح شماتیکی از استخراج پاره خط ها از نقاط لبه متصل به هم را نشان می دهد.



الف) نقاط لبه یک حدود لبه ($d_{\max} > T$) دو سری جدید از نقاط لبه



ج) بررسی شرایط حد آستانه برای سری جدید نقاط لبه ($d_{\max} < T$)



د) پاره خط های نهایی استخراج شده

شکل ۲: استخراج پاره خط ها از نقاط لبه متصل به هم

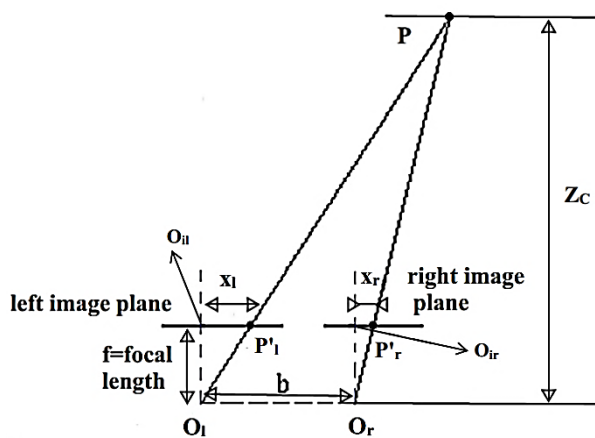
پس از استخراج پاره خط ها، توصیف گر ویژگی، برای پاره خط های استخراج شده، تشکیل می شود که برای هر پاره خط، شامل مختصات پیکسلی (v, u) نقاط ابتدایی و انتهایی پاره خط، طول پاره خط، جهت پاره خط، مختصات پیکسلی نقطه میانی پاره خط و میانگین گرادیان نقاط روی پاره خط (به عنوان کنتراست آن)، می باشد. هر یک از مراحل فوق باید برای تصاویر کسب شده از هر دو دوربین صورت پذیرد.

۳-۲- تطابق استریو

بعد از استخراج ویژگی (در اینجا پاره خط) و توصیف گرهای آن در دو تصویر در مرحله قبل، لازم است که ویژگی های متناظر در دو تصویر تطابق داده شده و پاره خط متناظر هر پاره خط در تصویر چپ، در تصویر راست مشخص شود. تطابق استریو مهم ترین مرحله محاسباتی در بینایی استریو است. اساس مرحله تطابق استریو این است که هر توصیف گر ویژگی تصویر چپ را با توصیف گرهای ویژگی کاندید در تصویر راست مقایسه کرده و سپس با استفاده از یک تابع معیار، شبیه ترین ویژگی به عنوان متناظر معرفی شود.

۳-۲-۱- استریوی موازی

معمول ترین روش بینایی استریو، استریوی موازی است که در آن طبق شکل ۳، محور نوری دوربین ها (f_l محور نوری دوربین چپ و f_r محور نوری دوربین راست) با هم موازی می باشند. در شکل ۳، تصویر نقطه P، در صفحه تصویر چپ P_l و در صفحه تصویر راست، P_r می باشد. b خطاصل بین مراکز نوری دوربین ها (O و O') بوده و خط پایه نام دارد (در

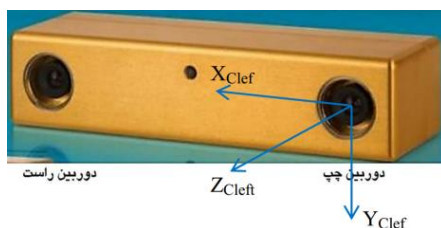


شکل ۵: روش مثلث‌بندی

به عبارت مخرج در رابطه ۱۱، اختلاف مکان گفته می‌شود که با d نمایش داده شده است [۲۲]. در نهایت رابطه مثلث‌بندی به شکل رابطه ۱۲، خواهد بود.

$$Z_c = \frac{bf}{d} \quad (12)$$

پس از استخراج ویژگی در تصاویر چپ و راست و انجام تطابق استریو و مشخص شدن متناظرها، می‌توان برای محاسبه Z_c از رابطه ۱۲ بهره برد و مقدار محاسبه شده را در رابطه ۳، استفاده کرد و در نتیجه، با اطلاعات دوبعدی حاصل از تصویر (u, v) ، اطلاعات سه‌بعدی فضایی (P_c) را کسب کرد. لازم به ذکر است که به‌طور قراردادی، دوربین چپ به عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته می‌شود و مختصات دو بعد دیگر $(Y_c$ و $X_c)$ بر مبنای آن صورت می‌گیرد. در شکل ۶ دوربین استریو مورد استفاده در این پژوهش به همراه محورهای مختصاتی دوربین چپ به عنوان مبنا، نشان داده شده است.

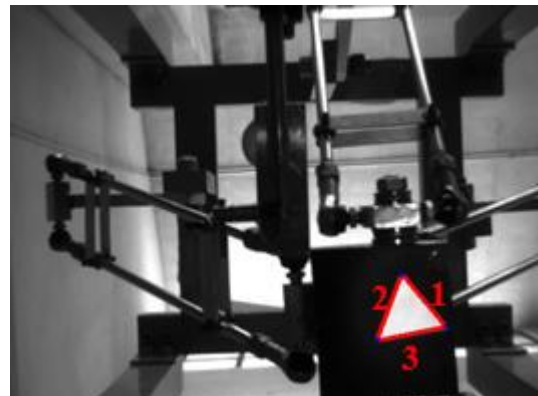


شکل ۶: دوربین استریو با محورهای مختصات دوربین چپ (مبنا)

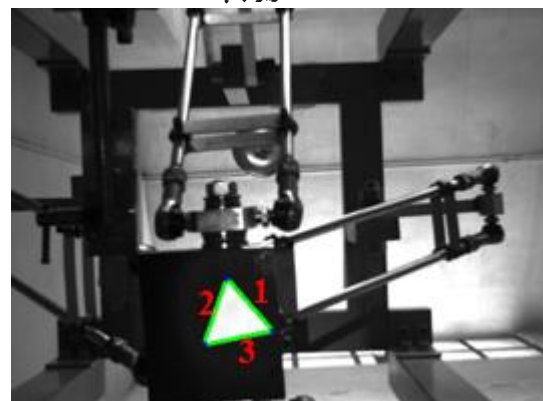
۳-۴-۳- دنبال کردن تصاویر استریو

در کاربردهایی که هدف (یا دوربین) حرکت می‌کند و نیاز است تا برای مثال موقعیت یک مکان از سکوی ربات نسبت به مکانی دیگر از آن تعیین شود، لازم است تا ویژگی‌ها در دو موقعیت مختلف نیز دنبال شده و مشخص شود که هر ویژگی در موقعیت بعدی در کجای تصویر قرار دارد. این مرحله با مقایسه بردارهای ویژگی تصاویر چپ و دو موقعیت، انجام می‌شود [۲۱]. در اینجا با توجه به آنکه سکوی ربات موردنظر، سه درجه آزادی حرکتی خطی و تنها یک درجه آزادی دورانی داشته و حول محور Y و به اندازه حداکثر $\pm 30^\circ$ درجه امکان چرخش دارد، هنگام حرکت از یک مکان به مکان دیگر و حتی در صورت وجود چرخش

به آن تابع معیار، به‌عنوان متناظر پاره خط موردبررسی در تصویر چپ شناخته می‌شود و بدین ترتیب تطابق استریو به پایان می‌رسد [۲۱]. شکل ۴ نمونه‌ای از پاره خط‌های استخراج شده و تطابق یافته در تصاویر چپ و راست یک موقعیت از سکوی متحرک ربات را که توسط سامانه طراحی شده انجام شده است را نشان می‌دهد. در شکل (۴-الف) و (۴-ب) پاره خط‌های متناظر، توسط سامانه، با شماره یکسان، علامت‌گذاری شده و درواقع تناظر یابی به درستی انجام شده است.



الف) تصویر چپ



ب) تصویر راست

شکل ۴: پاره خط‌های تطابق یافته در دو تصویر چپ و راست یک موقعیت سکو

۳-۳-۳- مثلث‌بندی^{۱۶}

با استفاده از روش مثلث‌بندی می‌توان عمق یا فاصله از دوربین را محاسبه کرد. در شکل ۵ که دید از بالای شکل ۳ است، با استفاده از تشابه مثلثاتی بین مثلث PP_iP_r و PO_iO_r رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_c = \frac{bf}{x_l - x_r} \quad (11)$$

که در آن x_l و x_r به ترتیب فاصله تصویر نقطه در صفحه تصویر چپ (P_i) از مرکز تصویر چپ (O_{il}) و فاصله تصویر نقطه در صفحه تصویر راست (P_r) از مرکز تصویر راست (O_{ir})، می‌باشد.

H یک ماتریس با ابعاد 3×3 بوده و بنام ماتریس همبستگی تعریف می‌شود.

$$[U \ S \ V] = SVD(H), H = USV^t \quad (17)$$

که در آن U و V، دو ماتریس مربعی اورتونرمال بوده و S نیز یک ماتریس قطری با درایه‌های غیرمنفی می‌باشد. با استفاده از این رابطه، ماتریس همبستگی H به مقادیر منفرد تجزیه می‌شود (ماتریس دوران نیز از نظر ریاضی یک ماتریس اورتونرمال است و از این رو از خواص ماتریس اورتونرمال در پیدا کردن ماتریس R، استفاده شده است).

$$\hat{R} = VU^t \quad (18)$$

که در آن $\hat{R}$ ماتریس چرخش بهینه می‌باشد که بعد از تخمین این ماتریس، می‌توان از رابطه ۱۳، بردار جابجایی را تخمین زد و برای تعیین زوایای چرخش حول محورها از رابطه ۷ استفاده کرد.

به منظور کاهش تأثیر خطای اندازه‌گیری، از الگوریتم سی‌تی‌اف^{۱۷} [۲۶] استفاده شده است؛ شکل ۸، الگوریتم این روش را نمایش می‌دهد. در این روش بعد از تخمین اولیه ماتریس چرخش و بردار جابجایی، با استفاده از آن‌ها و رابطه ۱۳، نداشت مختصات سه‌بعدی نقاط، از موقعیت اول سکو به موقعیت دوم سکو انجام شده و فاصله بین مقدار محاسبه‌شده و مقدار واقعی به دست می‌آید. بیشینه مقدار آن‌ها به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود. اگر خطای محاسبه‌شده از یک حد آستانه بیش‌تر بود، نقطه مربوط به آن، از مجموعه نقاط حذف می‌شود و دوباره محاسبه ماتریس چرخش و بردار جابجایی با مختصات سه‌بعدی نقاط باقی‌مانده انجام می‌شود. این کار تا زمانی که خطا از حد آستانه کم‌تر شود، ادامه می‌یابد.

۵- سخت‌افزار و نرم‌افزارهای مورد استفاده

دوربین مورد استفاده در این پژوهش، دوربین استریوی بامبلی‌بی-۱۸۲ ساخت شرکت پوینت‌گری کشور کانادا است. برای راه‌اندازی دوربین و همچنین به دست آوردن تصویر از آن با استفاده از نرم‌افزار مخصوص دوربین (تری‌کلاپس^{۱۹}) لازم است تا دوربین استریو از طریق کابل مخصوصی به رایانه‌ای که روی درگاه پی‌سی‌ای آن، کارت واسطی از نوع فایروایر نصب شده باشد، متصل شود. جدول ۱ مشخصات فنی دوربین و شکل ۶، تصویری از دوربین مذکور را نشان می‌دهند.

به دلیل آنکه دوربین استریوی موردنظر دوربین صنعتی بوده و لنزهای آن در کارخانه به صورت مکانیکی و با دقت بالا با محورهای نوری موازی مونتاژ شده‌اند، تصویربرداری استریو با آن یک تصویربرداری با هندسه استریوی موازی می‌باشد.

برای پردازش تصاویر و پیاده‌سازی الگوریتم‌های موردنظر و به‌طور کلی طراحی سامانه اندازه‌گیری موردنظر، از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. سامانه در یک لپ‌تاپ با پردازشگر Intel core i5 - 2.5GHz و رم 4GB و سیستم عامل Windows7 اجرا می‌شود. اجرای سامانه از لحظه ورود تصاویر تا تخمین ماتریس چرخش و بردار جابجایی، ۱/۷۱۳۷ ثانیه زمان می‌برد. لازم به ذکر است که می‌توان با پیاده‌سازی سامانه در نرم‌افزارهای پایه سی (مانند اپن‌سی‌وی) آن را به

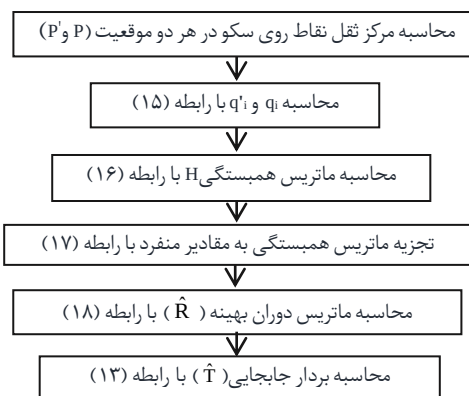
همراه جابجایی، چندان تغییری در جهت پاره‌خط‌های تصاویر ایجاد نمی‌شود و از این رو از تابع معیاری شبیه تابع معیار مرحله تناظریابی (رابطه ۱۰) استفاده شده و مرحله دنبال کردن تصاویر استریو نیز حل می‌شود.

۴- محاسبه بردار جهت و جابجایی

بعد از محاسبه مختصات سه‌بعدی نقاط در دستگاه مختصاتی دوربین، هم در موقعیت اولیه و هم در موقعیت جابجا شده و همچنین پس از دنبال کردن ویژگی‌های متناظر در دو موقعیت سکو، می‌توان موقعیت و جهت‌گیری دو مکان از سکوی ربات را نسبت به هم محاسبه کرد. به‌طور کلی، در صورتی که مختصات سه‌بعدی چند نقطه ویژگی در دو موقعیت از جسم (در یک دستگاه مختصاتی) در دست باشد، رابطه ۱۳ بین نقاط متناظر حاکم است.

$$P'_i = RP_i + T + N_i \quad (13)$$

که در آن R ماتریس چرخش و T بردار جابجایی بین دو موقعیت از جسم بوده و N_i بردار خطا می‌باشد. P_i و P'_i نیز مختصات سه‌بعدی نقطه ویژگی i ام به ترتیب قبل و بعد از جابجایی جسم می‌باشند هدف آن است تا بهینه‌ترین مقدار برای ماتریس چرخش و بردار جابجایی طوری به دست آید که با جاگذاری آن‌ها در رابطه ۱۳، کم‌ترین مقدار ممکن شود. روش ذکر شده در مرجع [۲۴ و ۲۵] که روشی بر پایه تجزیه به مقادیر منفرد می‌باشد، متداول‌ترین روش برای این محاسبه بوده که در این پژوهش مورد استفاده است و با صرف نظر از اثبات روش، در شکل ۷ مراحل آن در یک الگوریتم نمایش داده شده است.



شکل ۷: الگوریتم تخمین ماتریس چرخش و بردار جابجایی

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, P' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P'_i \quad (14)$$

که در آن P مرکز ثقل مجموعه نقاط قبل از جابجایی سکو و P' مرکز ثقل مجموعه نقاط بعد از جابجایی آن می‌باشند.

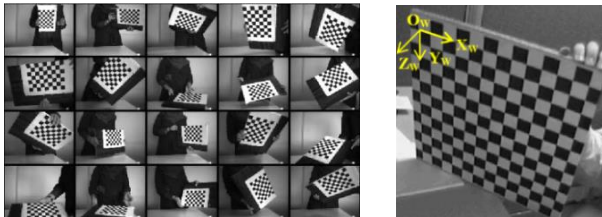
با استفاده از رابطه ۱۵، q_i و q'_i ، تعریف می‌شوند.

$$q_i = P_i - P, q'_i = P'_i - P' \quad (15)$$

به طوری که گفته شد، برای تجزیه به مقادیر منفرد از ماتریس H به ترتیب زیر استفاده می‌شود:

$$H = \sum_{i=1}^N q_i q_i^t \quad (16)$$

ناحیه‌ای که باید استخراج نقاط در آن صورت پذیرد، توسط کاربر و با انتخاب چهار گوشه مرزی صفحه شطرنجی، انجام می‌شود. پس از آن، اطلاعات پیکسلی (v, u) نقاط صفحه شطرنجی (برای هر موقعیت تصویربرداری) در جعبه‌ابزار استخراج می‌شود. سپس با مشخص بودن مختصات نقاط در دستگاه جهانی و مختصات پیکسلی تصویر آن‌ها، حل معادلات حاصل از رابطه ۹، در این جعبه‌ابزار صورت گرفته و در نهایت کالیبراسیون دوربین انجام می‌شود. در شکل (۹-الف) تخته کالیبراسیون به همراه مبدا جهانی نشان داده شده و در شکل (۹-ب) نیز موقعیت‌های مختلف صفحه کالیبراسیون در برابر دوربین نشان داده شده است.



الف) مبدا جهانی روی صفحه کالیبراسیون؛ ب) موقعیت‌های مختلف صفحه شکل ۹: صفحه کالیبراسیون مورد استفاده

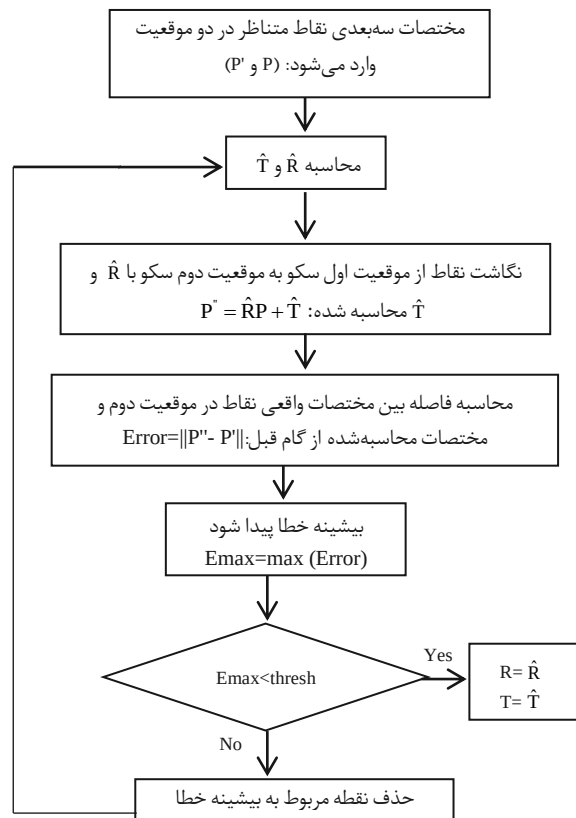
در شکل ۱۰ جمع‌بندی کلی مراحل کار و الگوریتم سامانه طراحی شده توضیح داده شده قبلی نشان داده شده است.

۶- آزمایش سامانه طراحی شده روی سکوی متحرک

آزمایش دقت سامانه اندازه‌گیری طراحی شده در اندازه‌گیری نسبی دو موقعیت از سکو، روی یک ربات موازی که دارای سه درجه آزادی حرکتی و یک درجه آزادی حرکت چرخشی حول محور z سکوی متحرک یا عملگر نهایی می‌باشد، انجام شد. در شکل ۱۱ ربات موازی موردنظر نشان داده شده است. سکوی متحرک این ربات به کمک وسایل اندازه‌گیری دقیقی مانند سنجه‌ها^۲، در دو وضعیت کاملاً مشخص نسبت به هم قرار داده شد و تصاویر استریو در هر مکان از سکو توسط دوربین گرفته شده و به عنوان ورودی سامانه، فراخوانی شد. سپس اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری دو وضعیت از سکوی ربات، در سامانه انجام شد. در نهایت اختلاف بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی (تنظیم شده توسط سنجه) به عنوان دقت سامانه گزارش می‌شود. شکل ۱۲، تنظیمات و اجزای مورد استفاده در آزمایش سامانه را نشان می‌دهد.

در این آزمایش طبق شکل ۱۳، یک سر سنجه با یک لبه از سکو مماس شده و سپس تصویر استریو در آن موقعیت (به عنوان موقعیت ابتدایی) کسب می‌شود.

سامانه بلادرنگ ارتقا داده و برای کارهایی چون کنترل ربات به روش بینایی ماشین استفاده کرد. همچنین تخمین پارامترهای ذاتی دوربین، از طریق کالیبراسیون دوربین با استفاده از جعبه‌ابزار کالیبراسیون دوربین در نرم افزار متلب [۲۷] انجام می‌شود.



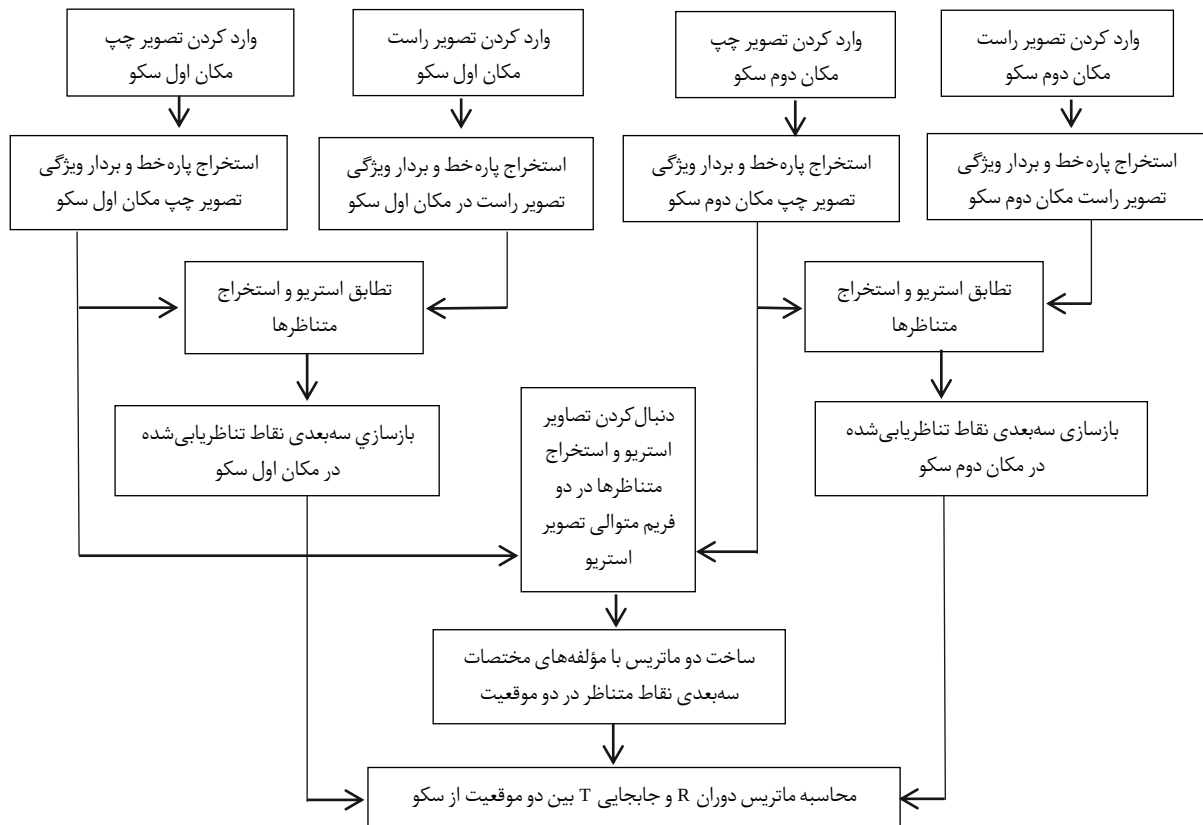
شکل ۸: الگوریتم روش سی تی اف

جدول ۱: مشخصات فنی دوربین بامبلی بی-۲ [۲۸]

تفکیک پذیری	۶۴۰ × ۴۸۰ پیکسل
ابعاد	۴۷.۴ × ۳۶ × ۱۵۷ میلی متر
لنز	2*M12(micro lens)
نوع سنسور	CCD خاکستری
نام سنسور	Sony ICX424
درگاه اتصال	Fire wire, IEEE-1394a

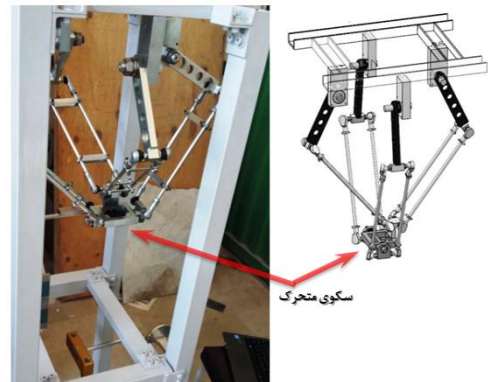
هدف از انجام پروسه کالیبراسیون دوربین، تخمین پارامترهای دوربین شامل فاصله کانونی (f_x, f_y)، نقطه اصلی (u_0, v_0) و خط پایه b می‌باشد. اساس جعبه‌ابزار کالیبراسیون دوربین در نرم افزار متلب الگوریتم ژنگ می‌باشد که در آن از یک صفحه کالیبراسیون شطرنجی که فاصله نقاط روی آن از هم مشخص است، استفاده می‌شود. با انتخاب مبدا دستگاه مختصات جهانی (O_w)، روی همان صفحه (معمولاً سمت چپ و بالای صفحه) مختصات نقاط در دستگاه مختصات جهانی (P_w) مشخص خواهد بود.

برای انجام کالیبراسیون، از صفحه کالیبراسیون در فواصل و زوایای مختلفی نسبت به دوربین، تصویربرداری شده و بعد از فراخوانی تصاویر،



شکل ۱۰: الگوریتم سامانه طراحی شده برای اندازه گیری موقعیت و جهت گیری سکوی متحرک در دو مکان مختلف نسبت به هم

آزمایش فاصله دوربین تا سکو ۵۰۰ میلی متر بوده که در این فاصله هر پیکسل تصویر ۰/۶۶ میلی متر از صحنه را نگاشت می کند. در جدول ۳ مقایسه ای بین روش و دقت چند پژوهش دیگر با سامانه طراحی شده در پژوهش حاضر، ملاحظه می شود. با توجه به شرایط این پژوهش، مانند استفاده از بینایی استریو در تخمین عمق، استفاده از دوربین استریو صنعتی و در نتیجه دقت بالاتر و عدم نیاز به تنظیم دستی دوربین ها، استقرار دوربین در فضای کاری ربات و در نتیجه عدم ایجاد اختلال در عملکرد اصلی ربات حین کالیبراسیون و خصوصاً با توجه به تفکیک پذیری تقریباً پایین دوربین، کارایی و دقت سامانه طراحی شده خصوصاً برای استفاده در سیستم های با دقت متوسط، مشخص است. که البته با استفاده از دوربین با تفکیک پذیری بالاتر، نتایج بهتری نیز می توان کسب کرد.



شکل ۱۱: ربات موازی مورد اندازه گیری به همراه سکوی متحرک

جدول ۲: نتایج اندازه گیری موقعیت و جهت سکوی متحرک ربات موازی (بر حسب میلی متر و درجه)

شماره آزمایش	مقدار اندازه گیری شده	خطای جابجایی	زاویه حول محور X	زاویه حول محور Y	زاویه حول محور Z
اول	۹۹/۳۲	۰/۶۸	۳/۵۸	۰/۵۸	۰/۹۱
دوم	۱۰۲/۳۷	۲/۳۷	۳/۶۷	۰/۷۱	۰/۶۱
سوم	۱۰۱/۷۵	۱/۷۵	۷/۸۷	۱/۵۹	۰/۴۹
انحراف جذر میانگین مربعات خطا		۱/۷۴mm	۲/۳۲°		

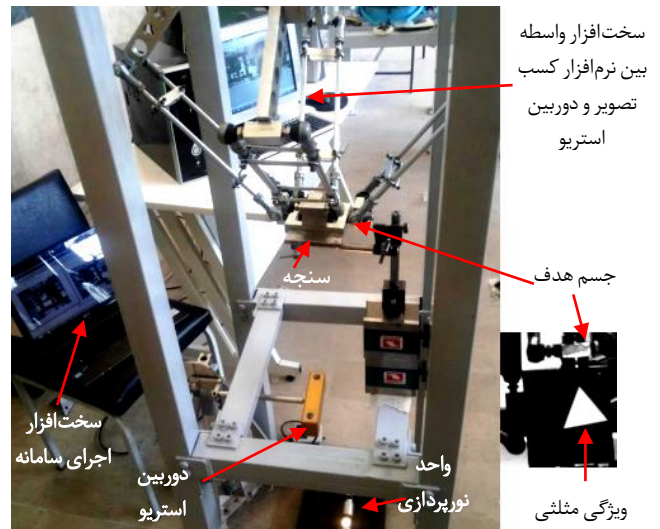
برای ایجاد موقعیت دوم، سکوی متحرک را به اندازه طول سنج حرکت داده تا لبه مذکور از سکو، به سر دیگر سنج مماس شود که در نتیجه سکوی متحرک حرکتی به اندازه طول دقیق سنج انجام داده است، سپس تصویر استریو در آن موقعیت سکو کسب می شود. این اندازه گیری با تنظیمات لازم سنج در جهات مختلف، در راستای هر سه محور X، Y و Z سکوی ربات انجام شده است. شکل ۱۴ تنظیمات موقعیت اول و دوم آزمایش را در راستای X (آزمایش اول)، نشان می دهد. طول سنج مورد استفاده و در نتیجه مقدار جابجایی سکو در سه آزمایش، ۱۰۰ میلی متر است. جدول ۲ نیز نتایج به دست آمده توسط سامانه طراحی شده برای سه آزمایش را نشان می دهد. طبق نتایج جدول ۲، حداکثر خطای مشاهده شده ۲/۳۷ میلی متر بوده و انحراف جذر میانگین مربعات خطا ۱/۷۴ میلی متر است. همچنین انحراف جذر میانگین مربعات خطا برای چرخش نیز ۲/۳۲ درجه می باشد (در طول

جدول ۳: مقایسه شرایط و دقت سامانه طراحی شده با سایر پژوهش‌ها

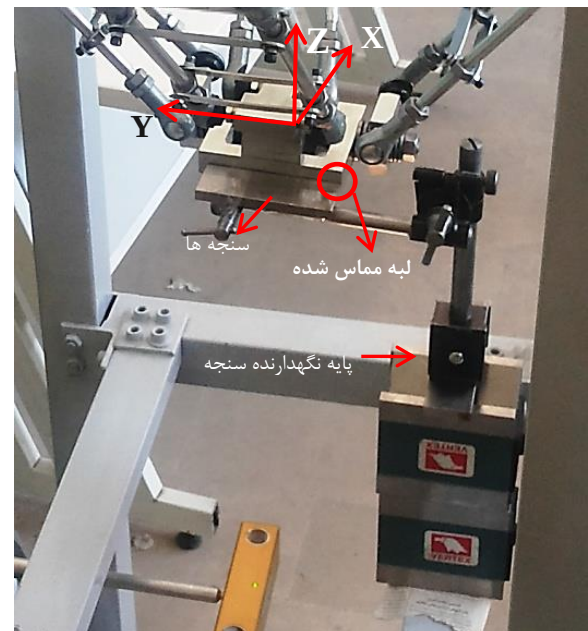
دقت	توضیحات شرایط آزمایش	پژوهش
۱/۷۴ میلی‌متر	تفکیک‌پذیری ۶۴۰×۴۸۰ فاصله تا دوربین ۵۰۰ میلی‌متر هر پیکسل ۰/۶۶ میلی‌متر را نگاشت می‌کند. بینایی استریو، دوربین صنعتی مستقر در فضای کاری	سامانه طراحی شده در این مقاله
۲/۱۸ میلی‌متر	تفکیک‌پذیری ۶۴۸×۴۸۲ بینایی استریو، تنظیم دستی دوربین‌ها	چیانگ [۱۶]
۱/۹ میلی‌متر	تفکیک‌پذیری ۶۴۰×۴۸۰ دوربین استریوی صنعتی	شهرشانی [۱۵]
۷/۵ میلی‌متر	SIFT SURF آزمایش با ویژگی‌های متفاوت فاصله تا دوربین ۸۳ میلی‌متر	
۳/۵۳ میلی‌متر	تک‌دوربین	دو [۱۴]
۲/۱۴ میلی‌متر	روشن چشم-روی-دست	
۱/۲۲ میلی‌متر	آزمایش با دوربین‌های متفاوت ۱۲۸۰×۹۶۰ پیکسل	
۱ میلی‌متر	تفکیک‌پذیری ۶۴۰×۴۸۰ بینایی استریو	کواریم [۱۲]
۷ میلی‌متر	تنظیم دستی دوربین‌ها فاصله تا دوربین ۴۰۰ میلی‌متر	
۱/۲۹ میلی‌متر	هر پیکسل ۰/۰۵ میلی‌متر را نگاشت می‌کند. دو دوربین متعامد با تنظیم دستی روشن چشم-روی-دست	سواکو [۱۸]
۱/۵۵ میکرومتر	تفکیک‌پذیری ۱۰۲۴×۱۰۲۴ دو دوربین متعامد با تنظیم دستی	جانز [۱۳]

۷- بحث و نتیجه‌گیری

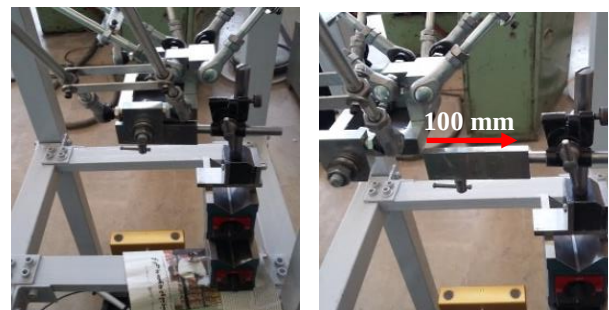
در این مقاله طراحی یک سامانه اندازه‌گیری بر پایه علم بینایی ماشین برای اندازه‌گیری موقعیت و جهت‌گیری سکوی متحرک یک ربات موازی با چهار درجه آزادی، شامل سه حرکت خطی و یک حرکت چرخشی، موردبررسی قرار گرفت. با نصب یک نشانه مثلثی روی سکوی متحرک و تصویربرداری از آن در دو موقعیت مختلف دلخواه از سکو، با استفاده از یک دوربین استریو، ورودی سامانه طراحی شده به دست می‌آید. برای طراحی سامانه اندازه‌گیری موردنظر، روش استریوی موازی مورد استفاده بوده و مراحل استخراج ویژگی (پاره‌خط‌های نشانه)، تطابق استریو، دنبال کردن تصاویر و بازسازی سه‌بعدی به کمک روش مثلث‌بندی و در نهایت تخمین موقعیت و جهت‌گیری دو موقعیت موردنظر از سکوی ربات، در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. با تنظیم دو موقعیت کاملاً مشخص از سکوی متحرک ربات موازی، با استفاده از سنجه‌های دقیق و سپس مقایسه مقدار تنظیم‌شده، با مقدار حاصل از اندازه‌گیری با استفاده از سامانه، آزمایش سامانه طراحی شده با روش بینایی ماشین، انجام شد؛ خطای آزمایش برای جابجایی ۱/۷۴ میلی‌متر و برای چرخش ۲/۳۲ درجه بوده، که با توجه به شرایط اندازه‌گیری (خصوصاً تفکیک‌پذیری دوربین) و مقایسه آن با روش‌های



شکل ۱۲: تنظیمات و اجزای مورد استفاده در آزمایش سامانه



شکل ۱۳: نمایش تنظیم سنجه همراه با محورهای سکوی متحرک



الف) موقعیت اول

ب) موقعیت دوم

شکل ۱۴: تنظیمات آزمایش اول

Open Journal of Applied Sciences, vol. 3, no. 7, pp. 393-403, 2013.

- [14] G. Du, and P. Zhang, "Online robot calibration based on vision measurement," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 6, pp. 484-492, 2013.

[۱۵] شهشهانی، تعیین موقعیت و جهت با استفاده از بینایی استریو،

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکترونیک، دانشگاه

تبریز، ۱۳۸۹.

- [16] M. H. Chiang, H. T. Lin, and C. L. Hou, "Development of a stereo vision measurement system for a 3D three-axial pneumatic parallel mechanism robot arm," *Sensors*, vol. 11 no. 2, pp. 2257-2281, 2011.
- [17] D. Scaramuzza, S. Pagnottelli, and P. Valigi, "Ball detection and predictive ball following based on a stereoscopic vision system," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1561-1566, 2005.
- [18] Š. Marko, Š. Bojan, Š. Filip, and J. Bojan, "Calibration of an industrial robot using a stereo vision system," *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 459-463, 2014.
- [19] M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle, *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Thomson-Engineering, 2007.
- [20] P. Corke, *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [21] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer-Verlag, New York, Inc., 2010.
- [22] D. A. Forsyth, and J. Ponce, *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- [23] P. Kovesi, *Computer Vision and Image Processing*, Available online at: <http://www.peterkovesi.com/>.
- [24] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein, "Least-squares fitting of two 3-D point sets," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-9, no. 5, pp. 698-700, 1987.
- [25] P. J. Besl, and H. D. McKay, "A method for registration of 3-D shapes," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no.2, pp. 239-256, 1992.
- [26] P. Gong, Q. Zhang, and A. Zhang, "Stereo vision based motion estimation for underwater vehicles," *Proc. Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 3, pp. 745-749, 2009.
- [27] J. Y. Bouguet, *Camera Calibration Toolbox for Matlab*, [Online], Available online at: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html#parameters.
- [28] Point Gray, Bumblebee2 1394a, 2015, [Online], Available online at: <http://www.ptgrey.com/bumblebee2-firewire-stereo-vision-camera-systems>.
- [29] .

زیر نویس ها

¹ Position

² Orientations

³ vision - based

⁴ eye-on-hand

⁵ Complementary metal-oxide-semiconductor(CMOS)

⁶ Disparity

⁷ Region based

⁸ Feature based

⁹ Charge-coupled device(CCD)

مطرح شده در سایر پژوهش های انجام شده در این زمینه دقت خوبی دارد. در صورت ارتقاء سیستم سخت افزاری استفاده شده، می توان به دقت های بالاتر نیز دست یافت. همچنین سامانه طراحی شده قابلیت ارتقاء به سامانه بلادرنگ و استفاده در کنترل ربات به روش بینایی ماشین را دارد.

مراجع

- [1] J. P. Merlet, *Parallel Robots*, Springer, Netherlands, 2006.
- [2] H. Zouand, and L. Notash, "Discussions on the camera-aided calibration of parallel manipulators," *Proc. Proceedings of CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines, and Mechatronics, Montreal: Canadian Space Agency*, 2001.
- [3] M. Gao, T. Li, and W. Yin, "Calibration method and experiment of Stewart platform using a laser tracker," *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, vol. 2793, pp. 2797-2802, 2003.
- [4] H. Zhuang, J. Yan, and O. Masory, "Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals," *Journal of Robotic Systems*, vol. 15, no.7, pp. 395-405, 1998.
- [5] S. Besnard, and W. Khalil, "Calibration of parallel robots using two inclinometers," *Proc. Robotics and Automation, Proceedings 1999 IEEE International Conference*, vol. 1753, pp. 1758-1763, 1999.
- [6] C. Dacheng, Y. Dayongand, and H. Junwei, "Kinematic calibration of parallel robots using CMM," pp. 8514-8518, 2006.
- [7] Y. Takeda, G. Shenand, and H. Funabashi, "A DBB-based kinematic calibration method for in-parallel actuated mechanisms using a Fourier series," *Journal of Mechanical Design*, vol. 126, no. 5, pp. 856-865, 2004.
- [8] N. Andreff, P. Renaud, P. Martinet, and F. O. Pierrot, "Vision-based kinematic calibration of an H4 parallel mechanism: practical accuracies," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 273-283, 2004.
- [9] P. Maric, and V. Djalic, "Choice of window size in calibrating the geometry of manipulators based on the regions correlation," *Electronics*, 2011.
- [۱۰] رسول قربانی و حمید ابریشمی مقدم، « استفاده از بینایی استریو به منظور ارائه یک سامانه واقعیت افزوده مبتنی بر بینایی، » مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۲، شماره ۱، صفحه ۱-۱۱، ۱۳۹۱.
- [۱۱] مرتضی نصیری و علیرضا بهراد، « استخراج و بازسازی خودکار اطلاعات سه بعدی زمین فوتبال در تصاویر تک دوربینی کالیبره نشده، » مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۴، شماره ۴، صفحه ۵۵-۶۴، ۱۳۹۳.

- [12] M. H. Korayem, M. Irani, and A. Hashemi, "Application of stereo vision on determination of end-effector position and orientation of manipulators," *Journal of Control Engineering and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 9-16, 2014.
- [13] A. Janz, C. Pape, and E. Reithmeier, "Position determination of a robot end-effector using a 6D-measurement system based on the two-view vision,"

-
- ¹⁰ Pinhole model
 - ¹¹ Principle point
 - ¹² Intrinsic parameter
 - ¹³ Extrinsic parameter
 - ¹⁴ Canny
 - ¹⁵ Epipolar line
 - ¹⁶ Triangulation
 - ¹⁷ CTF (Coarse-To-Fine)
 - ¹⁸ Bumblebee-2
 - ¹⁹ Triclops
 - ²⁰ Gauge block