



DOR:

استفاده از روش ماشین بینایی به منظور تنظیم غیرمستقیم قطعات ریخته‌گری شده روی ماشین فرز کنترل عددی با رویکرد کاربرد صنعتی

بابک هوشمند^{۱*}، حسین امیر آبادی^۲ و خلیل خلیلی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه نیشابور، نیشابور

^۳ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ای تی اچ، زوریخ

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۴

چکیده

ماشین بینایی از جمله فناوری‌هایی است که می‌توان از آن به منظور تعیین موقعیت قطعه به صورت غیر برخط و پیش از اجرای عملیات ماشین‌کاری، در ماشین‌های ابزار مجهز به سیستم کنترل عددی استفاده کرد. در این تحقیق، از این روش به منظور موقعیت‌یابی دو نمونه قطعه‌کار ریخته‌گری شده روی میز ماشین‌ابزار فرز مجهز به سیستم کنترل عددی استفاده شد. میانگین خطای به دست آمده در پیدا کردن مرکز دایره‌ای نوعی در پوش ریخته‌گری شده شامل 0.361 میلی‌متر در امتداد محور x و 0.372 میلی‌متر در امتداد محور y و میانگین خطای یافتن نقطه صفر پره پمپ ریخته‌گری شده 0.2 میلی‌متر پس از 10 بار تکرار آزمایش گزارش شد؛ همچنین در پیدا کردن محل لبه در پوش ریخته‌گری شده، به منظور کاهش زمان تعیین مسیر حرکت ابزار نسبت به قطعه‌کار بسته شده روی میز ماشین‌ابزار مربوطه برای عملیات ماشین‌کاری، 0.25 میلی‌متر در هر دو راستای x و y و 0.4 میلی‌متر در امتداد z ، و خطای مدل‌بازایی شده از نقاط استخراج شده از طریق پردازش تصاویر مربوط به پره پمپ ریخته‌گری شده با هدف تعیین موقعیت آن، 0.363 میلی‌متر در هر سه راستای x ، y و z به دست آمد.

کلمات کلیدی: تنظیم غیر برخط؛ ماشین‌کاری؛ قطعه ریخته‌گری شده؛ ماشین بینایی؛ انطباق استریو.

Using of Machine Vision System for Offline Setup Cast parts on CNC Milling Machine with Industrial Application Approach

B. Houshmand^{1*}, H. Amirabadi², K. Khalili³

¹ Phd Student., Mech. Eng., Isfahan Univ of technology., Isfahan, Iran.

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Neyshabur Univ., Neyshabur, Iran.

³ Prof., Mech. Eng., ETH Univ., Zurich, Switzerland.

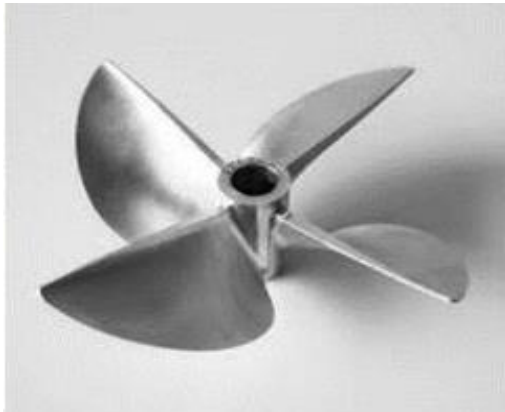
Abstract

machine vision is considered as one of the technologies that can be used for offline setup of the workpiece which located on cnc machine tools before machining operations. In this research, this method has been used to determine the position of two casted part samples on a cnc milling machine. The mean error after 10 times testing in order to finding a circular center of Some kind of casted cap as workpiece origin includes 0.361 mm along the x axis and 0.372 mm along the y axis and the mean error of finding the workpiece origin of the casted pump impeller was 0.2 mm. Also, mean error for finding edge location of the molded cap in order to reduce the time for determining the movement direction of the tool relative to the workpiece which is clamped on the machine tool table, includes 0.25 mm in both x and y directions, and 0.4 mm along the z axis. The model error recovered from the extracted points were obtained by processing the images of the casted pump impeller to determine its position includes 0.363 mm in all three directions x, y and z.

Keywords: Offline Setup; Machining; Cast Part; Machine Vision; Stereo Matching.

۱- مقدمه

زمان‌بر بودن، سبب ایجاد خطا در انجام تنظیمات می‌شود که ممکن است، منجر به خراب شدن قطعات گران‌قیمت و یا دوباره‌کاری شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱- (الف) پره قایق موتوری، (ب) در پوش ریخته‌گری شده و (ج) پره پمپ ریخته‌گری شده

در بحث آماده‌سازی یک یا تعدادی قطعه‌کار قبل از شروع عملیات ماشین‌کاری، یکی از مهمترین پیش‌نیازها، حذف و کاهش زمان‌های بین ماشین‌کاری یک قطعه و قطعه بعدی است؛ به ویژه هنگامی که تنظیم و موقعیت‌یابی قطعه‌کار وقت‌گیر باشد. حداقل کردن زمان تنظیم قطعه‌کار از جمله موارد مهم است که باید مورد توجه قرار گیرد. این امر به ویژه برای ماشین‌کاری قطعات پیچیده و یا با تعداد زیاد مشخص‌تر می‌شود. مدت زمان مورد نیاز برای آماده کردن یک وسیله، ماشین، فرآیند یا سیستم جهت انجام یک کار را مدت زمان تنظیم غیر برخط گویند [۱]. در مرحله تنظیم و موقعیت‌یابی قطعه‌کار که قسمتی از زمان‌های تنظیم غیر برخط هستند، ماشین ابزار کنترل عددی مورد استفاده غیر فعال بوده و هیچ‌گونه عملیات ماشین‌کاری را انجام نمی‌دهد که با توجه به هزینه بالای اولیه این نوع ماشین‌های ابزار و متعلقات آن‌ها، بایستی این زمان‌ها برای کاهش قیمت تمام شده قطعه‌کار مورد نظر حتی الامکان کاهش یابند. از طرفی با توجه به نوع قطعه‌کارهای مورد نظر در این پژوهش (ریخته‌گری شده) و در نظر گرفتن این موضوع که افزایش دقت روش‌های ریخته‌گری، باعث کاهش اضافه‌مادی شده است که برای یک قطعه‌کار ریخته‌گری شده برای انجام عملیات ماشین‌کاری به دست می‌آید؛ لازم است تا صحت استفاده از روش‌های به کارگرفته شده برای موقعیت‌یابی این نوع قطعه‌کارها بهبود یابد. در برخی قطعه‌کارهای ریخته‌گری شده تنظیم و موقعیت‌یابی آن‌ها حتی زمان‌برتر از عملیات ماشین‌کاری آن قطعه است؛ لذا با کاهش زمان‌های تنظیم و موقعیت‌یابی این نوع قطعات، می‌توان هزینه‌های تمام شده در ساخت قطعه را کاهش داد.

از جمله این قطعات، می‌توان به مواردی همچون پره قایق موتوری، برخی درپوش‌ها و پره پمپ مطابق شکل ۱ اشاره کرد. در واحدهای کارگاهی و صنعتی ملاحظه شد که یافتن محل لبه قطعه‌کار بسته شده روی میز ماشین ابزار سه محوره مربوطه که محدودیت‌های حرکتی قابل ملاحظه‌ای نسبت به ماشین‌های گران‌قیمت با تعداد محوره‌های حرکتی بیشتر دارند، برای شروع عملیات ماشین‌کاری که نیازمند انطباق مدل مجازی با قطعه کار بسته شده روی میز ماشین ابزار است، اغلب با سعی و خطا همراه است. این امر علاوه بر

۲- ماشین بینایی

از جمله فناوری‌هایی است که می‌توان از آن به منظور موقعیت‌یابی قطعه‌کار به صورت غیر برخط، در ماشین‌های ابزار کنترل عددی استفاده کرد، ماشین بینایی است. با توجه به غیر تماسی بودن این روش، بهره‌گیری از آن به منظور سرعت بخشیدن به انجام موقعیت‌یابی قطعه‌های ریخته‌گری شده می‌تواند امکان‌سنجی شود. استفاده از ماشین بینایی در بحث موقعیت‌یابی قطعه‌کار به کمک تصاویر به دست آمده از آن توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است. قطعه‌کارهایی که پیش از این مورد آزمایش قرار گرفته اکثراً محدود به یک بلوک مکعبی ساده بوده است؛ لذا با وجود تلاش‌های صورت گرفته با توجه به عدم تعیین بهینه پارامترهای مؤثر بر صحت روش ماشین بینایی مورد استفاده، باعث شده تا استفاده از این روش در کاربرد صنعتی به طور رضایت بخشی نباشد.

در این پژوهش قطعه‌کارهای مورد آزمایش دارای پیچیدگی بیشتری بوده، لذا نیاز به استفاده از روش‌های پیچیده‌تر به ویژه در یافتن پیکسل مشابه بین دو تصویر در استفاده از روش استریو است.

از جمله پژوهش‌هایی که در آنها از ماشین بینایی روی ماشین‌های ابزار کنترل عددی استفاده شده است عبارتند از: تیان و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۰ میلادی، از روش بینایی استریو به منظور شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری در یک ماشین فرز مجهز به سیستم کنترل عددی استفاده کردند. هدف آن‌ها مشاهده نحوه اجرای عملیات ماشین‌کاری به صورت مجازی قبل از اجرا در ماشین مورد نظر بود؛ به طوری که از خطاها یا برخوردهای احتمالی ابزار با گیره‌بندی قطعه‌کار مطلع شوند. نکته قابل ذکر در کار آن‌ها این است که از یک بلوک ساده در کار خود بهره بردند که پیدا کردن نقاط متناظر بین دو تصویر چپ و راست را آسان می‌کند. احمد رفیق و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۰ میلادی، به منظور هوشمندسازی عملیات ماشین‌کاری و با هدف تعیین مسیر امن و مؤثر ابزاربرشی، تصاویر گرفته شده از منطقه ماشین‌کاری را پردازش کردند. با کمک تصاویر به دست آمده از شرایط واقعی ماشین، اهداف شناسایی شده و نقاط بحرانی برای تعیین مسیر حرکت ابزار مشخص شدند؛ به طوری که از تداخل نوک ابزار با قطعه‌کار و همچنین تداخل بین ابزار یا

نگه‌دارنده آن با موانع موجود در منطقه ماشین‌کاری جلوگیری شود. اُکارما^۱ و گروودزینسکی^۲ [۴] در سال ۲۰۱۲ میلادی، تعدادی الگوریتم برای کالیبراسیون روش‌های پوییدن^۳ سه بعدی و تحلیل تصاویر، مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها، ارائه روشی برای موقعیت‌یابی قطعه‌کار روی ماشین‌های کنترل عددی با استفاده از ماشین بینایی بود. برای استخراج اطلاعات سه بعدی، از سه دوربین و سه پروژکتور استفاده کردند که نور با الگوریتم مشخصی را بر سطح قطعه هدف می‌تابانند. با تحلیل تصاویر حاوی این نور، اطلاعات عمق را استخراج کردند. آن‌ها در کار خود اشاره کردند که دقت مناسب در استفاده از این روش، نیازمند کالیبراسیون موفق و در نظر گرفتن مسئله نور است. چرا که نور و نوسان‌های آن، منجر به نقشه‌برداری غیرخطی از عمق می‌شود. استفان دومک و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ میلادی، سیستم بینایی را برای قرار دادن خودکار قطعات روی میز ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری ارائه کردند. ایده آن‌ها بر اساس اسکن سه‌بعدی با استفاده از الگوی لبه‌یابی صورت گرفته است؛ اما دقت کار آن‌ها به شدت به شرایط نورپردازی و کالیبراسیون مناسب سیستم بستگی دارد. در کار آن‌ها خطای موقعیت‌یابی برای پروژکتور کمتر از ۲ میلی‌متر و برای دوربین حداکثر ۱ میلی‌متر گزارش شد. کاراباگلی^۴ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵ میلادی، برای جلوگیری از برخورد ابزار برشی با قید و بندهای مهارکننده قطعه‌کار پس از شروع ماشین‌کاری، تصاویر گرفته شده توسط یک دوربین که عمود بر میز ماشین مربوطه نصب شده بود را پردازش کرده و مسیر مناسب برای حرکت ابزار برشی را استخراج کردند. آنها تنظیمات واقعی انجام شده برای بستن قطعه‌کار در منطقه ماشین‌کاری را با مدل طراحی شده در نرم‌افزار مربوطه منطبق کردند. کار آن‌ها در وضعیت غیر برخط و پیش از شروع عملیات ماشین‌کاری انجام شد. ژو^۵ و همکاران [۷] در سال ۲۰۲۰ میلادی، یک روش پردازش مبتنی بر روش ماشین بینایی برای سنگ‌زنی پروفیل سطوح

¹ Okarma

² Grudzinski

³ Scan

⁴ Karabagli

⁵ Xu

مختصات جهانی در فضای سه بعدی روی تصاویر تشکیل شده در دوربین‌های چپ و راست هستند. در نهایت f فاصله کانونی دوربین‌ها است.

$$x_{pl} = \frac{f}{Z}X \text{ و } x_{pr} = \frac{f}{Z}(X - b) \quad (1)$$

$$d = x_{pl} - x_{pr} = \frac{f}{Z}b \quad (2)$$

مقدار d ، اختلاف مکانی^۵ (اختلاف محل تشکیل تصویر یک نقطه در صفحه تصاویر چپ و راست) نامیده می‌شود. بدین ترتیب عمق هر نقطه با توجه به اختلاف مکانی آن قابل محاسبه است:

$$Z = \frac{f}{d}b \quad (3)$$

از رابطه (۳) می‌توان به معکوس بودن رابطه بین عمق نقطه با اختلاف مکانی پی برد.

۴- کالیبراسیون

پیش از شروع تصویربرداری توسط دوربین‌ها، کالیبراسیون آنها به منظور تعیین پارامترهای درونی و بیرونی لازم به اجرا است.

به منظور کالیبره کردن، ایده، نمایش یک مجموعه نقاط است که مختصات سه بعدی آنها شناخته شده است و سپس بایستی مشخص شود که این نقاط در کجای تصویر نمایش داده شده‌اند. با داشتن تعداد کافی نقاط سه بعدی و نقاط دو بعدی تصویر مرتبط، می‌توان مقادیر دقیق پارامترهای دوربین را از معادلات مربوطه استخراج کرد؛ لذا هر چه تعداد نقاط شناخته شده سه بعدی بیشتر باشد صحت مقادیر اندازه‌گیری شده (نزدیکی مقادیر به دست آمده با مقادیر از قبل تعیین شده) افزایش می‌یابد [۱۲]. این فرآیند پیچیده توسط جعبه ابزار کالیبراسیون ارائه شده در نرم‌افزار متلب^۶ به راحتی انجام می‌شود.

۵- انطباق در بینایی استریو

انطباق تصویر، فرآیند بر روی هم قرار دادن حداقل دو تصویر از یک منظره است که در شرایط متفاوت تصویربرداری مانند

پیچیده به جای روش معمول سنگ‌زنی پروفیل مبتنی بر بزرگنمایی نوری دستی ارائه کرده‌اند. آنها یک سیستم بینایی خاص به طور هماهنگ با سیستم سنگ‌زنی پروفیل برای اطمینان از اندازه‌گیری بدون اعوجاج کانتور قطعه‌کار و غلبه بر تداخل‌های محیط ماشینکاری در هنگام سنگ‌زنی پروفیل طراحی کردند. ارائه داده‌اند فونگ^۱ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۱ میلادی، یک سیستم اندازه‌گیری سایش ابزار مبتنی بر ماشین بینایی را ایجاد کردند. سیستم ارائه شده توسط آنها برای ابزارهای مختلف بر اساس نظارت بر لبه یا نظارت بر نوک قابل استفاده بوده و قابل استفاده در صنعت است. فونگ و همکاران از یک روش همبستگی متقابل برای تخمین سایش واقعی ابزار در ابزارهای مختلف برش استفاده کرده‌اند.

۳- بینایی استریو

بینایی استریو که یک روش اندازه‌گیری غیر تماسی غیر فعال محسوب می‌شود؛ برای تشخیص ساختار سه‌بعدی و عمق اجسام از دو یا چند تصویر محیط توسط دوربین از زوایای مختلف استفاده می‌کند. در حقیقت این تفاوت زاویه دید از محیط است که منجر به توانایی تشخیص عمق می‌شود [۹].

این روش قادر به ارائه تمایز^۲ با تفکیک‌پذیری بالا در محیط‌های داخلی و بیرونی است [۱۰]. به طور کلی در تصویربرداری پرسپکتیو، یکی از ابعاد هر نقطه از فضا هنگام پرتوافکنی بر صفحه تصویر حذف می‌شود. برای بازیابی این بعد از دست رفته، روش استریو به عنوان روشی برای بازیابی بعد سوم از تصاویر دو بعدی مطرح می‌شود. در این روش، توسط دو دوربین از یک صحنه معین دو تصویر گرفته می‌شود و با استفاده از پارامترهای دوربین‌ها و روابط حاکم بر مدل هندسی تصاویر استریو، هر سه بعد نقاط مورد نظر قابل محاسبه می‌شوند [۱۱].

در شکل ۲، O_L و O_R موقعیت دوربین‌های چپ و راست در صحنه، b ، فاصله بین آنها (خط مبنا^۳) و P_L و P_R پرتوافکنی^۴ P با مختصات (X, Y, Z) نسبت به دستگاه

¹ Fong

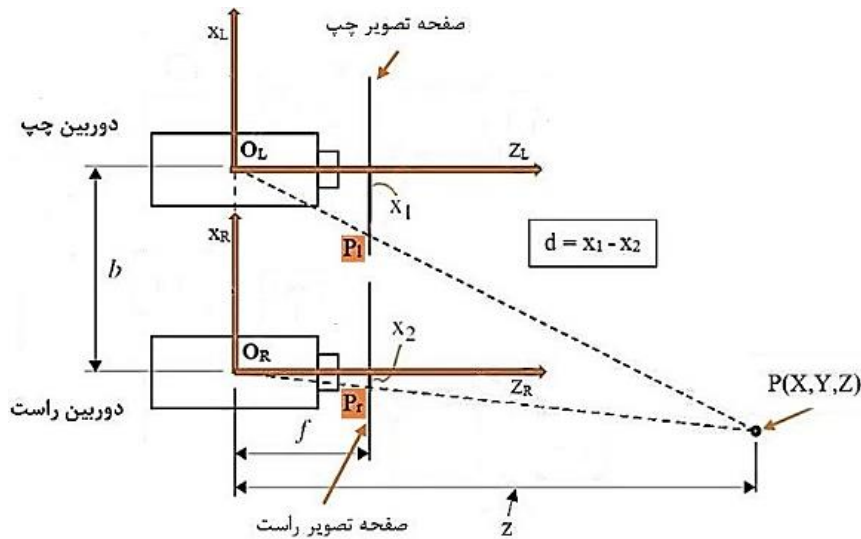
² Disparity

³ Baseline

⁴ Projection

⁵ Disparity

⁶ Matlab



شکل ۲- نحوه چیدمان دوربین‌های چپ و راست نسبت به یکدیگر در شرایط ایده ال (موازی بودن محور دوربین‌ها)

برابر اعوجاج‌های هندسی و رادیومتری عملکرد بهتری دارند [۱۳]. لازم به ذکر است که نوسان‌های ناخواسته، تفاوت شدت روشنایی^۱، موقعیت منابع روشنایی در صحنه و اخذ تصویر در حسگرها و باندهای طیفی متفاوت، باعث ایجاد تغییر در شدت روشنایی تصویر می‌شود که با عنوان مشکلات رادیومتری شناخته می‌شود. نوع ویژگی‌های انتخاب شده در تصویر بستگی به نوع تصویر و محتوای ویژگی‌های تصویر شده دارد. با توجه به سه نوع ویژگی مختلف در روش‌های مبتنی بر ویژگی، می‌توان نتیجه گرفت که ویژگی‌های نقطه‌ای از دیگر ویژگی‌ها پایدارتر هستند؛ یعنی شناساگرهای ویژگی نقاط، معمولاً در برابر انحراف‌های هندسی پیچیده بین تصاویر، پایدارتر از شناساگرهای نواحی است [۱۴].

از بین شناساگرهای ویژگی نقطه‌ای، از آنجایی که الگوریتم فست، پیکسل به پیکسل عمل جستجو را انجام می‌دهد، نسبت به الگوریتم‌هایی که به صورت آماری محل گوشه را تشخیص می‌دهند مناسب‌تر است. در روش فست، یک پیکسل مشخص به عنوان گوشه مشخص می‌شود، در حالی که در سایر روش‌ها بین دو یا تعداد بیشتری پیکسل به عنوان گوشه تعیین می‌شود. مزیت دیگر استفاده از شناساگر

زمان‌های متفاوت، زوایای متفاوت یا حتی حسگرهای متفاوت گرفته شده‌اند. این فرآیند از نظر هندسی، دو تصویر که یکی از آن دو به عنوان مرجع^۱ در نظر گرفته می‌شود را هم‌تراز می‌کند [۱۳]. هدف، استخراج اطلاعات سه بعدی تصویر (عمق) و کسب اطلاعات کامل‌تری از تصاویر مورد نظر است.

در این پژوهش، به منظور افزایش سرعت یافتن پیکسل مشابه و در عین حال حصول اطمینان از صحت انطباق انجام شده، ترکیبی از دو روش تعاملی^۲ و خودکار برای یافتن پیکسل مشابه استفاده شد. در روش تعاملی، یک مجموعه از نقاط کنترلی در تصاویر به صورت دستی انتخاب می‌شوند؛ در حالی که در روش‌های خودکار همین‌طور که از نام آن مشخص است، به صورت خودکار اقدام به شناسایی نقاط ویژگی‌ها می‌شود و سپس از این نقاط برای برآورد تابع تبدیل میان دو تصویر و نمونه برداری مجدد استفاده می‌کنند. به طور کلی روش‌های انطباق تصویر در انطباق خودکار، بر اساس ویژگی‌ها به دو دسته روش‌های مبتنی بر ناحیه و روش‌های مبتنی بر ویژگی تقسیم می‌شوند.

روش‌های مبتنی بر ویژگی در مقابل روش‌های مبتنی بر ناحیه از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار بوده و در

^۱ Intensity of light

^۲ Interactive تصویر مرجع: تصویری که به عنوان مبنا برای انطباق تصویر استفاده می‌شود.

۵-۱-۱- هندسه اپیپولار در استریو

به منظور کاهش فضای جستجو و افزایش سرعت در فرآیند تطبیق، از محدودیت خط اپیپولار^۵ استفاده می‌شود [۱۸]. بدین صورت که با یکسوسازی تصاویر چپ و راست می‌توان جستجو در تصویر سمت راستی را از دو بعد به یک بعد کاهش داد و در واقع برای یافتن متناظر هر نقطه ویژگی، عمل جستجو صرفاً در خط اپیپولار انجام پذیرد. در شکل ۳ نمای کلی تبدیل به وضعیت موازی نمایش داده شده است. برای این امر لازم است تا ابتدا دوربین چپ تحت یک ماتریس چرخش، دوران یابد. ترتیب دوران دستگاه مختصات دوربین عبارتند از [۱۹]:

۱. ابتدا محور x ، باید با بردار انتقال (t) هم راستا شود.

$$R_{rec} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{u}_t = \frac{t}{\|t\|} = e_1 \quad (۴)$$

۲. سپس جهت محور y دوربین باید قائم باشد، یعنی بر بردار انتقال و محور نوری عمود باشد.

$$R_{rec} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = Normalized \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \right) = \frac{1}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \begin{bmatrix} -t_x \\ t_y \\ 0 \end{bmatrix} = e_2 \quad (۵)$$

۳. در انتها محور z ، بر دو محور قبلی عمود خواهد شد.

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (۶)$$

در نهایت ماتریس چرخش برای یکسوسازی تصویر چپ به دست می‌آید:

$$R_{rec} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix} \quad (۷)$$

ماتریس به دست آمده برای چرخش دوربین چپ است. برای یافتن چرخش نقاط از ماتریس R_{rec}^{-1} استفاده می‌شود. با توجه به متعادل بودن ماتریس R_{rec} ، رابطه $R_{rec}^{-1} = R_{rec}^T$ برقرار است.

ماتریس دوران برای دوربین راست به صورت رابطه (۵-۵)، قابل محاسبه خواهد بود.

فست امکان تعیین حد آستانه برای تعیین مقدار اختلاف شدت روشنایی برای جستجو گوشه است. در کار گش^۱ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۵، صحت روش فست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که صحت نتایج در استفاده از این شناساگر در مقایسه با الگوریتم‌هایی مانند هریس و سرف^۲ به مراتب بهتر است؛ همچنین آنها اذعان کردند که در استفاده از توصیف‌گرهای یابنده محتمل‌ترین گوشه در تصویر مانند فریک^۳ که مبتنی بر این شناساگر هستند، بهترین صحت به دست آمده است.

۵-۱- تطبیق

پس از شناسایی ویژگی‌ها در دو تصویر لازم است، نقاط متناظر بین آنها تعیین شود. ویژگی‌های شناسایی شده در بین تصاویر می‌توانند با استفاده از روش‌های مقادیر شدت روشنایی، روابط فضایی و توصیف‌گرها تطبیق یابند [۱۳]. به طور کلی، روش‌های مبتنی بر اطلاعات مشترک (روابط فضایی) از میان دیگر روش‌های تطبیق مبتنی بر مقادیر روشنایی مقاوم‌تر است؛ چون این روش تنها از رابطه آماری بین تصاویر استفاده می‌کند [۱۶].

روش‌های مبتنی بر روابط فضایی، زمانی استفاده می‌شوند که ویژگی‌های شناسایی شده مبهم باشند یا همسایه‌های آن‌ها از نظر محلی دارای اعوجاج باشند [۱۳]. روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیف‌گرها به آسانی پیاده سازی می‌شود، اما زمانی که ویژگی‌ها و توصیف‌گرها، شکل‌های مشابهی داشته باشند، ممکن است با شکست مواجه شوند. عملکرد توصیف‌گرها به نوع تصویر هم بستگی دارد [۱۳]. در این پژوهش به منظور تطبیق پیکسل‌های مشابه شده با توجه به مزیت‌های استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر روابط فضایی از الگوریتم انطباق RANSAC^۴ [۱۷] استفاده شده است. این الگوریتم، به منظور جداسازی تطبیق‌های درست و نادرست از یکدیگر مطرح شده است که در برابر نوسان‌های ناخواسته سیگنال تصویر مقاوم و پایدار است.

^۲ Ghosh

^۱ SURF (Speeded-Up Robust Feature)

^۲ FREAK (Fast Retina Key Point)

^۳ Random Sample Consensus

^۵ Epipolar Line

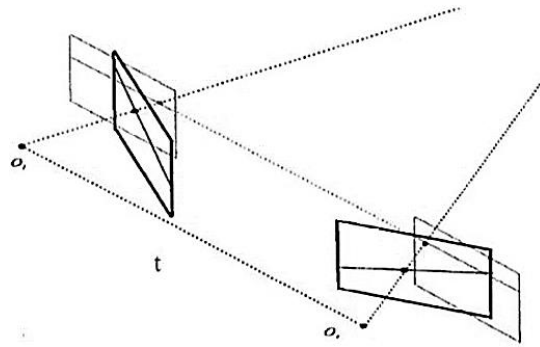


شکل ۴- چیدمان دوربین‌ها و سایر تجهیزات در محیط کارگاه

متلب انجام شد [۲۰]. در این پژوهش، برای کالیبراسیون دوربین‌ها از روش ژانگ^۳ [۲۱] به عنوان روش مبتنی بر استفاده از الگوی صفحه‌ای دو بعدی استفاده شد.

برای کالیبراسیون دوربین‌ها موارد زیر رعایت شد:

۱. ۲۱ تصویر از صفحه کالیبراسیون.
۲. زاویه بین خط واصل دوربین‌ها و محور نوری در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه (بایستی قطعه کار در دید کامل دو دوربین باشد).
۳. پیش گرم دوربین‌ها به مدت یک ساعت و ۴۵ دقیقه.
۴. اعمال مدل غیر خطی در محاسبه پارامترهای دوربین.
۵. در کانون قرار داشتن اهداف مورد نظر (تنظیم فاصله کانونی با هدف حداکثر وضوح تصویر).



شکل ۳- نمایش تبدیل به وضعیت موازی

$$R_r = RR_{rec} \quad (۸)$$

R_r ، ماتریس دوران بین دوربین‌های چپ و راست است.

۶- موقعیت یابی قطعه کارها

تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش شامل دو عدد دوربین محصول شرکت theimagingSource با کد DFK 23GM021 و با دو سریال ۳۱۴۱۴۸۵۱ و ۳۱۴۱۴۸۵۲ هستند. نرخ داده برداری آن‌ها ۶۰ فریم بر ثانیه، تفکیک‌پذیری^۱ ۹۶۰×۱۲۸۰ و مجهز به حسگر CMOS هستند؛ همچنین از دو لنز با کد شناسه M1214-MP2، قطر ۳۲ mm و فاصله کانونی ۱۲ mm استفاده شد. صفحه کاغذی کالیبراسیون چسبانده شده روی یک شیشه سکوریت با مقدار عدم تختی کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر در طول ۴۵ سانتی‌متر استفاده شده دارای تعداد ۶×۸ مربع با ابعاد ۳۰×۳۰ میلی‌متر است؛ همچنین دمای محیط با استفاده از تجهیزات تهویه مطبوع موجود در محدوده ۱۷ الی ۲۳ درجه سانتی‌گراد ثبت شد و استفاده از تیغ فرز انگشتی رادیوس HSS^۲ با کد D5R0.5 سایز ۵ میلی‌متر برای مرکز‌یابی.

در شکل ۴ چیدمان دوربین‌ها در محیط کارگاه نمایش داده شده است.

۶-۱- کالیبراسیون و بررسی صحت به دست آمده

کالیبراسیون برای هر یک از دوربین‌ها توسط جعبه ابزار کالیبراسیون بروز رسانی شده در سال ۲۰۱۵ در نرم‌افزار

^۳ Zhang

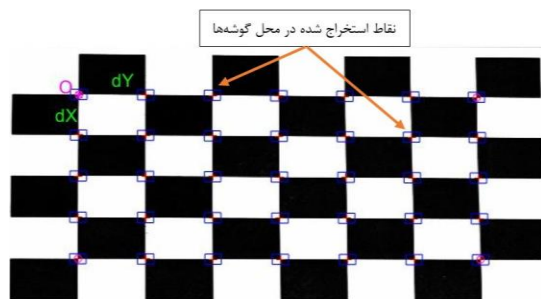
^۱ Resolution

^۲ High Speed Steel

می‌دهند؛ همچنین در شکل ۷ محل گوشه یافته شده توسط الگوریتم گوشه روی صفحه کالیبراسیون نمایش داده شده است.

در جدول ۱، پارامترهای خارجی به دست آمده توسط جعبه ابزار ذکر شده در نرم افزار متلب مشخص شده است که شامل انتقال و دوران بین دوربین‌های چپ و راست است؛ همچنین در جداول ۲ و ۳، پارامترهای به دست آمده داخلی و ضرایب مربوط به انحراف لنز استفاده شده در هر یک از دوربین‌ها، توسط جعبه ابزار مذکور آورده شده است.

در ادامه، پارامترهای به دست آمده در طی فرآیند کالیبراسیون استریو، توسط الگوریتم نوشته شده جهت موقعیت‌یابی قطعه‌کار فرآخوانی شده و سپس توسط کد نوشته شده، تصاویر چپ و راست یک گیج بلوک استاندارد با طول اسمی ۷۰ میلی‌متر و با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر مطابق شکل ۵، به منظور بررسی صحت کالیبراسیون انجام شده، توسط نرم‌افزار خوانده شده و به مقیاس خاکستری تبدیل شد. سپس، تصویر خاکستری به دست آمده از نمایش به صورت اعشاری کوتاه^۱ به حالت دابل^۲ (اعشاری بلند) با هدف دست‌یابی به جزئیات بیشتر تصویر تبدیل می‌شود.



شکل ۷- نقاط گوشه استخراج شده روی صفحه کالیبراسیون

جدول ۱- پارامترهای خارجی گزارش شده توسط نرم‌افزار متلب

نماد	پارامترهای خارجی
R°	[۰/۰۰۶۳۲ ۰/۲۸۱۰۶ ۰/۰۰۴۷۲]
$T(mm)$	[۴۰۶/۲۱۰۵۷ ۱۵/۲۴۴۳۵ ۳۹/۳۰۲۱۸]

R° ماتریس دوران و T ماتریس انتقال بین دو دوربین می‌باشند.

^۱ Float

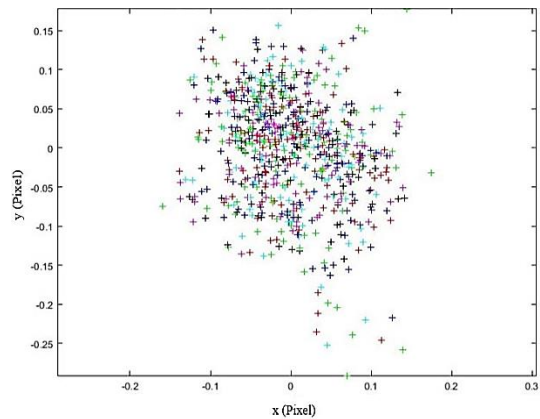
^۲ Double

۶. قرار دادن صفحه کالیبراسیون در موقعیت‌های متنوع در میدان دید دوربین.

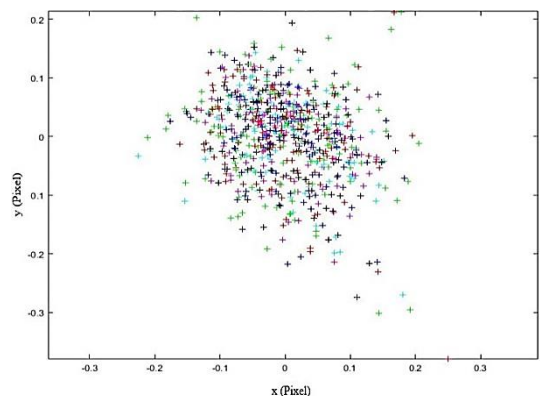
۷. تعداد اهداف روی صفحه کالیبراسیون ۳۵ عدد.

۸. طول خط واصل دو دوربین ۴۵۰ میلی‌متر (فاصله تا هدف ۱۴۸۰ میلی‌متر لذا خارج از محدوده خطای بالا).

شکل‌های ۵ و ۶، خطای پرتوافکنی مجدد (خطای کالیبراسیون) بر حسب پیکسل به دست آمده برای نقاط استخراج شده از روی صفحه کالیبراسیون را برای هر یک از دوربین‌های چپ و راست، توسط نرم‌افزار متلب، نمایش



شکل ۵- پراکندگی خطای پرتوافکنی مجدد نقاط گوشه استخراج شده از صفحه کالیبراسیون برای دوربین چپ بر حسب پیکسل



شکل ۶- پراکندگی خطای پرتوافکنی مجدد نقاط گوشه استخراج شده از روی صفحه کالیبراسیون برای دوربین راست بر حسب پیکسل

جدول ۲- پارامترهای داخلی به دست آمده برای دوربین‌های چپ و راست

α°	$v_0(Pixel)$	$u_0(Pixel)$	$f_y(Pixel)$	$f_x(Pixel)$	پارامترهای داخلی
۰	۵۹۶/۶۷	۸۲۴/۴۵	۴۲۴۴/۶۲	۴۲۸۵/۶۲	دوربین چپ
۰	۵۸۰/۷۴	۷۸۰/۸۶	۴۲۵۸/۱۵	۴۹۹۹/۶۵	دوربین راست

f_x° فاصله کانونی در امتداد x، f_y° فاصله کانونی در امتداد y، u_0 و v_0 مختصات مرکز تصویر به ترتیب در امتداد x و y، α° انحراف از متعامد بودن اضلاع پیکسل می‌باشند.

همان‌طور که در بخش ۵ اشاره شد؛ لذا کلیه گوشه‌ها توسط الگوریتم فست شناسایی شده و به طور مشخص گوشه‌های گچی بلوک مورد نظر به صورت دستی قابل انتخاب است. پس از انتخاب پیکسل مشابه بین تصاویر چپ و راست، مقادیر پیکسلی استخراج شده تحت تابع مثلث‌بندی استریو^۱ ارائه شده در جعبه ابزار کالیبراسیون در نرم افزار متلب [۲۰]، از مختصات پیکسلی به مختصات متریک تبدیل شده که برای محاسبه طول اقلیدسی یک لبه بلوک گچی برای تشخیص میزان صحت به دست آمده استفاده شدند.

در شکل ۹، تصاویر یکسوسازی شده، گوشه‌های شناسایی شده و تفاوت آن‌ها با قبل از یکسوسازی نمایش داده شده است.

در جدول ۴، مقادیر به دست آمده در اندازه‌گیری طول لبه گچی بلوک ۷۰ میلیمتری برای هر یک از دوربین‌های چپ و راست و با توجه به مقادیر پیکسلی استخراج شده مطابق شکل ۹، آورده شده است.

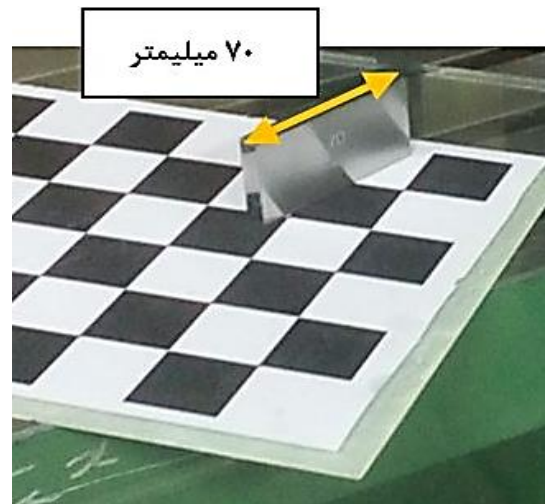
۲-۶- تعیین نقطه صفر قطعه‌کارها

در پوش ریخته‌گری شده مورد استفاده در این پژوهش، از جنس آلومینیوم با قطر بیرونی ۲۵۷ mm، قطر حفره وسط ۸۲ mm و ارتفاع ۲۰ mm است. در قطعات دایره‌ای شکل، معمولاً مرکز قطعه‌کار را برای سهولت در انجام عملیات بعدی، به عنوان نقطه صفر قطعه‌کار در نظر می‌گیرند. در شکل ۱۰، محل مبدأ مختصات در مرکز قطعه‌کار را در محیط نرم‌افزار ماشین‌کاری مربوطه (پاورمیل)^۲ را نمایش می‌دهد.

جدول ۳- ضرایب انحراف لنز هر یک از دوربین‌ها

ضرایب انحراف	k_1	k_2	p_1	p_2
دوربین چپ	-۰/۱۲۶	۰/۱۴۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸
دوربین راست	-۰/۱۳۶	۰/۳۲۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۶

k_1° و k_2° ضرایب انحراف شعاعی لنز و p_1 و p_2 ضرایب انحراف مماسی لنز هستند.



شکل ۸- بلوک گچی استاندارد به طول ۷۰ میلیمتر

در ادامه، با هدف تناظریابی در تک بعد، تصاویر چپ و راست مطابق مطالب بیان شده در بخش ۵-۱-۱ با یکدیگر موازی یا یکسوسازی شدند.

پس از یکسوسازی، به منظور محاسبه طول اقلیدسی لبه بلوک گچی‌ها برای مشخص شدن میزان صحت کالیبراسیون به دست آمده، باید نقاط گوشه روی بلوک گچی بلوک استخراج شوند.

در این پژوهش از ویژگی‌های نقطه‌ای فست به دلیل مزایای آن‌ها نسبت به سایر ویژگی‌ها استفاده گردید،

¹ Stereo Triangulation

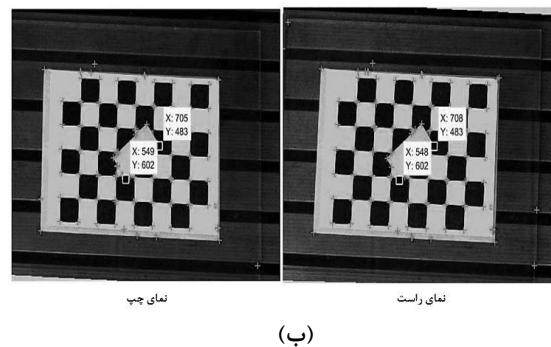
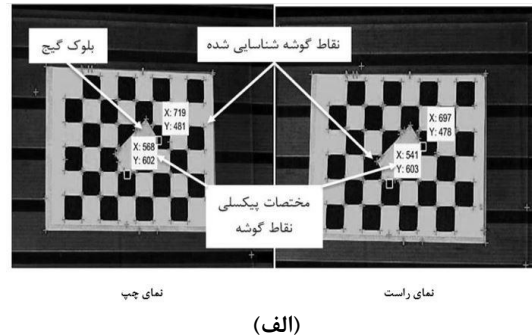
² Powermill

جدول ۴- طول محاسبه شده روی لبه بلوک گنج توسط تابع مثلث‌بندی استریو در جعبه نرم‌افزار متلب

خطای نسبی (%)	نتیجه سیستم استریو (mm)	اندازه اسمی گنج بلوک با دقت ۰/۱ (mm)	دوربین
۰/۲۵	۶۹/۸۲	۷۰	چپ
۰/۱۸	۶۹/۸۷۲	۷۰	راست

برای تعیین نقطه صفر از روی تصاویر قطعه‌کار، تصاویر چپ و راست قطعه‌کار توسط الگوریتم فرآخوانی شده و پس از یکسوسازی آن‌ها، فرآیند جستجوی ویژگی هندسی دایره‌ای آغاز می‌شود که برای این قطعه‌کار به صورت حفره دایره‌ای در وسط قطعه‌کار است. با توجه به این‌که حفره وسط قطعه‌کار در این پژوهش تیره است، لذا روش جستجو از منطقه تیره به روشن انجام می‌شود (این روش جستجو بر حسب شرایط قطعه‌کار قابل تغییر است). در طی جستجو برای یافتن ویژگی هندسی دایره‌ای شکل، محتمل‌ترین دایره را در نقطه پیکسل‌هایی میان‌یابی می‌کند که بیشترین گرادیان شدت بین دو پیکسل مجاور در امتداد شعاعی را داشته باشند. برای این‌کار، تمامی ۲۵۶ سطح روشنایی در مقیاس خاکستری بررسی می‌شود تا بیشترین اختلاف شدت به دست آید. در هر بار مقایسه، مشخصات دایره استخراج شده ذخیره شده و در نهایت بزرگترین دایره به عنوان محتمل‌ترین دایره گزارش می‌شود. با توجه به اینکه حد آستانه برای مقایسه تعیین شده است، تصویر خروجی از مقیاس خاکستری به تصویر باینری (دو دویی) تبدیل می‌شود. به عبارتی دیگر از یک فیلتر بالاگذر که تغییرات شدید را از خود عبور می‌دهد، در امتداد شعاعی استفاده شده است. در شکل ۱۱، نحوه گزارش مرکز بزرگترین دایره استخراج شده را نمایش می‌دهد. توجه شود که تصاویر یکسوسازی شده است، لذا حصول اطمینان در یافتن پیکسل مشابه بین تصاویر چپ و راست به دلیل رعایت بحث هندسه اپیپولار افزایش خواهد داشت. در طی آزمایش‌های انجام شده، افزایش دقت در یافتن پیکسل مشابه به عنوان مرکز دایره بین تصاویر چپ و راست در امتداد محور z ، بین ۱ الی ۴ پیکسل بوده که معادل ۰/۱ الی ۰/۴ میلی‌متر است.

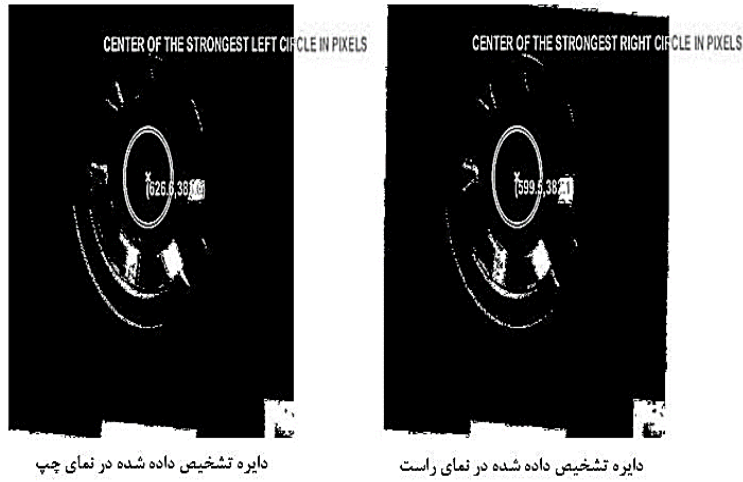
همچنین در شکل ۱۲ و ۱۳ تفاوت دو وضعیت انطباق ضعیف و مناسب دایره میان‌یابی شده بر پیکسل‌های مرزی



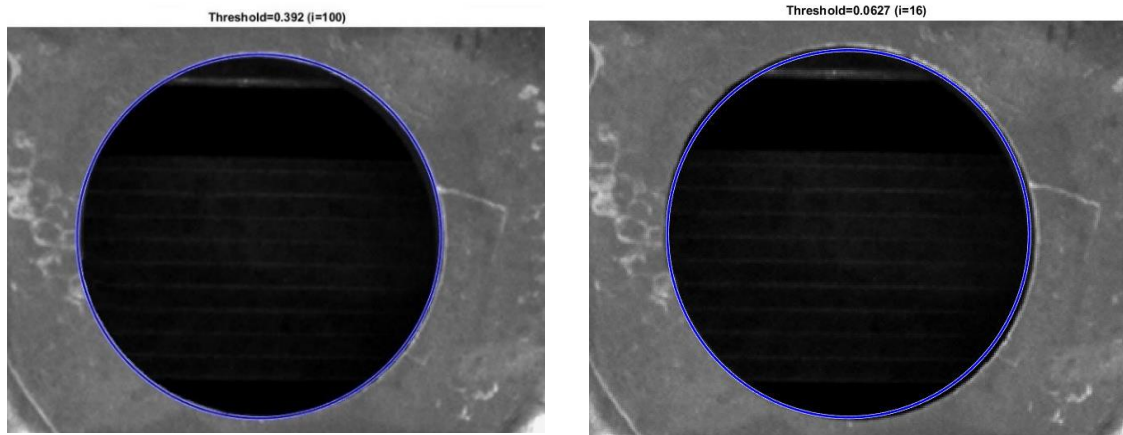
شکل ۹- الف، تصاویر چپ و راست قبل از یکسوسازی، ب، تصاویر چپ و راست بعد از یکسوسازی



شکل ۱۰- نمایش محل نقطه صفر در پوش در محیط نرم‌افزار پاورمیل مورد استفاده



شکل ۱۱- مراکز گزارش شده دواپر مرکزی قطعه کار در دو نمای چپ و راست بر حسب پیکسل



شکل ۱۳- دایره میان‌یابی شده در شانزدهمین تکرار با حد آستانه ۰/۳۲۹ بر حسب نسبت شدت روشنایی در امتداد شعاعی (انطباق مناسب)

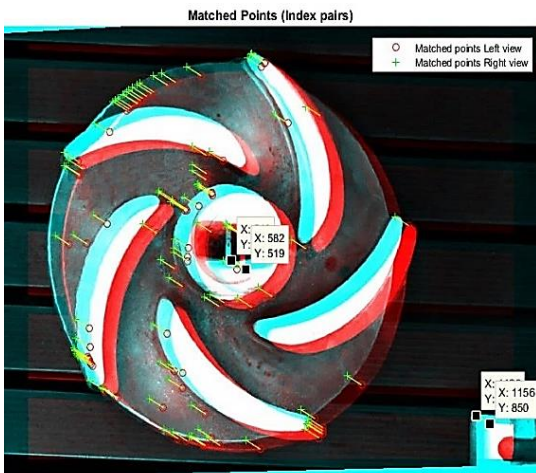
شکل ۱۲- دایره میان‌یابی شده در شانزدهمین تکرار با حد آستانه ۰/۰۶۲۷ بر حسب نسبت شدت روشنایی در امتداد شعاعی (انطباق ضعیف)

میانگین خطا در یافتن مرکز قطعه کار ریخته‌گری شده در مقایسه با یکی از روش‌های مرسوم یعنی مرکزیابی با کمک تیغ فرز، پس از ۱۰ بار تکرار شامل ۰/۳۶۱ میلی‌متر در امتداد محور x و ۰/۳۷۲ میلی‌متر در امتداد محور y است. منحنی (۱) و (۲) مقایسه نتایج ده آزمایش با هدف یافتن نقطه صفر قطعه کار را در امتداد محورهای x و y نمایش می‌دهند. لازم به ذکر است که در هر بار آزمایش، موقعیت قطعه کار روی میز ماشین جابه‌جا شد تا میزان صحت نتایج بهتر مورد بررسی قرار گیرد.

حفره مرکز قطعه کار در طی فرآیند جستجوی محتمل‌ترین دایره نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، در هر بار تکرار، نسبت روشنایی دو پیکسل مجاور در امتداد شعاعی به عنوان حد آستانه به دست آمده گزارش می‌شود. در نهایت بیشترین مقدار حد آستانه به دست آمده مبتنی بر بزرگترین شعاع به عنوان محتمل‌ترین دایره گزارش خواهد شد. برای مثال در شکل ۱۲، مقدار آستانه ۰/۰۶۲۷، حاصل تقسیم شدت روشنایی دو پیکسل مجاور در امتداد شعاعی با قطبیت تیره به روشن است.



شکل ۱۶- محل در نظر گرفته شده به عنوان نقطه صفر پره پمپ ریخته‌گری شده



شکل ۱۷- محل در نظر گرفته شده به عنوان نقطه صفر پره پمپ ریخته‌گری شده. میانگین خطا در یافتن محل نقطه صفر پره پمپ ریخته‌گری شده در این پژوهش پس از ده بار تکرار ۰/۳۶۳ میلی‌متر به دست آمد

شکل در وسط پره پمپ ریخته‌گری شده و تناظر یابی آن برای استخراج مختصات سه بعدی قابل مشاهده است.

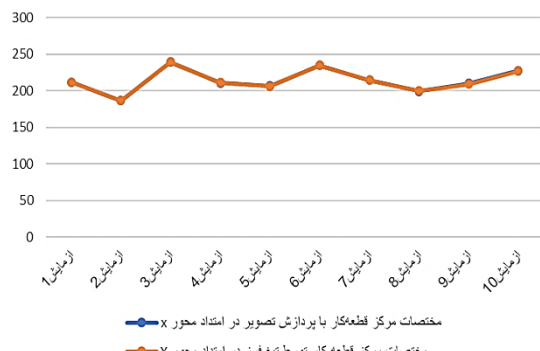
۳-۶- تعیین موقعیت قطعه‌کارها

در این مرحله، برای یافتن موقعیت در پوش ریخته‌گری شده مورد نظر، زاویه بین یکی از لبه‌های آن با یک شاخص که در امتداد افقی و موازی با محور x ماشین‌ابزار فرز مربوطه قرار گرفته استخراج شد. برای این منظور، ابتدا جستجوی پیکسل‌های گوشه بین تصاویر چپ و راست شاخص مورد استفاده توسط شناساگر گوشه فست انجام شد. در شکل ۱۸

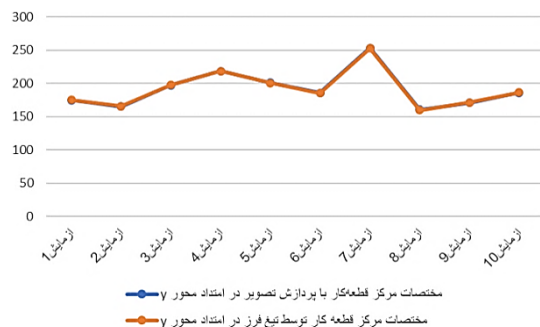
طبق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ انطباق مقادیر به دست آمده با دو روش استریو و استفاده از تیغ فرز، قابلیت استفاده از روش استریو را در یافتن مرکز دایره وسط قطعه‌کار بعنوان صفر قطعه‌کار مشخص می‌کند. پره پمپ ریخته‌گری شده مورد استفاده در این پژوهش که مشابه قطعه‌کار قبلی از جنس آلومینیوم می‌باشد دارای قطر بیرونی ۲۸۶ میلی‌متر، ارتفاع ۶۶ میلی‌متر و تعداد ۵ پره است.

به منظور سهولت در تعیین محل نقطه صفر روی قطعه‌کار مذکور، یکی از گوشه‌های حفره‌های مستطیلی شکل واقع در وسط قطعه‌کار به عنوان نقطه صفر در نظر گرفته شد. در شکل ۱۶ محل در نظر گرفته شده به عنوان نقطه صفر پره پمپ ریخته‌گری شده نمایش داده شده است.

همچنین در شکل ۱۷، نقاط گوشه استخراج شده از روی تصاویر چپ و راست در گوشه ویژگی هندسی مستطیلی

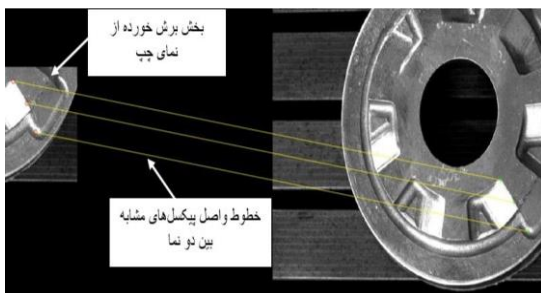


شکل ۱۴- مقایسه یافتن مختصات مرکز قطعه‌کار بین دو روش استریو و استفاده از تیغ فرز در امتداد محور X بر حسب میلی‌متر

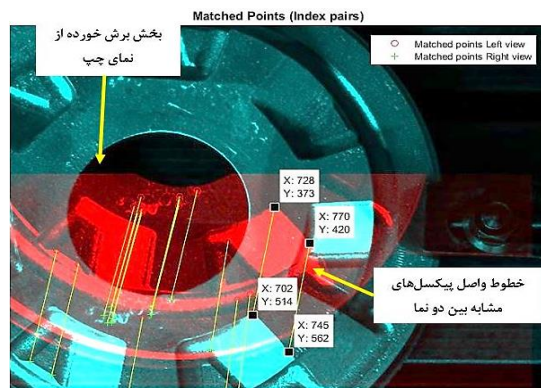


شکل ۱۵- مقایسه یافتن مختصات مرکز قطعه‌کار بین دو روش استریو و استفاده از تیغ فرز در امتداد محور Y بر حسب میلی‌متر

با اعمال این زاویه بر مدل مجازی قطعه کار در نرم افزار ماشین کاری پاورمیل، قطعه کار در فضای مجازی با قطعه بسته شده روی میز ماشین منطبق شده و آماده عملیات ماشین کاری شد. در شکل ۱۹، نحوه تناظریابی در دو وضعیت مونتاژ و جفت شده مشاهده می شود. در نمایش مونتاژ قسمت بریده شده از تصویر چپ و نمای کامل تصویر راست و ویژگی های نقطه های مشابه تشخیص داده شده روی لبه قابل مشاهده است. مشکل این نوع نمایش در نرم افزار متلب، عدم تفکیک مبدأ مختصات تصاویر چپ و راست از یکدیگر است. به این معنی که مختصات پیکسلی هر دو نما نسبت به مبدأ قرار گرفته در گوشه بالا و چپ کل تصویر تعیین می شود؛ ولی در حالت جفت شده، قسمت برش خورده از تصویر چپ به رنگ قرمز بر روی تصویر راست تناظریابی شده تا اینکه پیکسل های مشابه بین دو نما مشاهده شود. مختصات پیکسلی روی قسمت قرمز رنگ مربوط به تصویر چپ و نسبت به مبدأ مختصات تصویر چپ گزارش شده است و تداخلی با مبدأ مختصات تصویر راست ندارد.



(الف)



(ب)

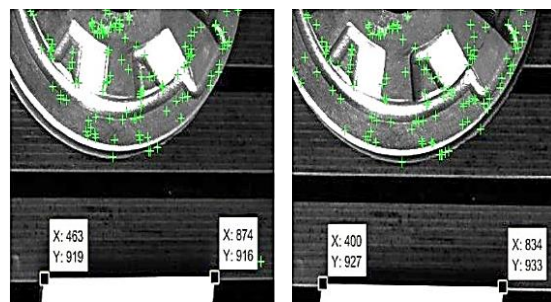
شکل ۱۹- تناظر یابی روی لبه قطعه کار؛ (الف) نمایش مونتاژ و (ب) نمایش جفت شده

نقاط گوشه استخراج شده از روی تصاویر شاخص قرار گرفته در امتداد افق نمایش داده شده است.

به منظور تطبیق پیکسل های مشابه روی لبه قطعه کار ریخته گری شده از الگوریتم های مبتنی بر روابط فضایی از الگوریتم انطباق^۱ RANSAC [۱۸] استفاده شده است.

در این پژوهش به منظور کاهش حجم محاسباتی و افزایش امکان یافتن پیکسل های مشابه روی لبه مورد نظر و همچنین عدم نیاز به شمارش تعداد پیکسل ها روی لبه، تنها بخش بریده شده به صورت دستی از تصویر چپ روی تصویر راست جستجو شد. این عمل نوعی محلی سازی^۲ محسوب می شود؛ همچنین از آنجایی که در الگوریتم استاندارد RANSAC، معیار توقف، یافتن حداکثر انطباق های مفید است، ممکن است که انطباق های مورد نظر یافت شده باشد، ولی تکرار همچنان ادامه داشته باشد؛ لذا برای کاهش زمان محاسبات و با توجه به ماهیت این الگوریتم (نمونه برداری تصادفی)، تکرار بیش از دو بار یک مجموعه انطباق بین ویژگی های نقطه ای استخراج شده تصاویر چپ و راست به عنوان معیار توقف در نظر گرفته شد.

در ادامه، زاویه بین بردار افقی (روی شاخص) و بردار مورب (روی لبه قطعه کار ریخته گری شده) تحت روابط ریاضی مربوط به محاسبه زاویه بین بردارها، توسط نرم افزار متلب گزارش شد.



(ب)

(الف)

شکل ۱۸- استخراج نقاط گوشه از تصاویر نماهای (الف) راست و (ب) چپ شاخص قرار گرفته موازی محور X ماشین ابزار فرز کنترل عددی

^۱ Random Sample Consensus

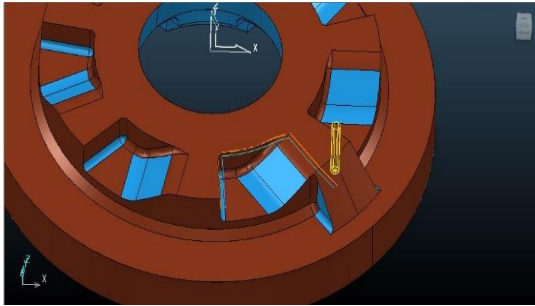
^۲ Localization

برای شروع ماشین‌کاری به همراه شرایط قطعه‌کار روی میز ماشین نمایش داده شده است.

میانگین خطای پیدا کردن محل لبه قطعه‌کار، پس از ۱۰ بار تکرار، ۰/۲۵ میلی‌متر در هر دو راستای x و y و ۰/۴ میلی‌متر، در امتداد z به دست آمد.

زاویه به دست آمده بین دو بردار مورب و افقی استخراج شده در این آزمایش ۴۸/۶۵۲ درجه گزارش شد.

همچنین در اشکال ۲۰ و ۲۱، مراحل موقعیت‌یابی یک لبه قطعه‌کار با زاویه گزارش شده حاصل از پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار متلب، در محیط نرم‌افزار ماشین‌کاری پاورمیل



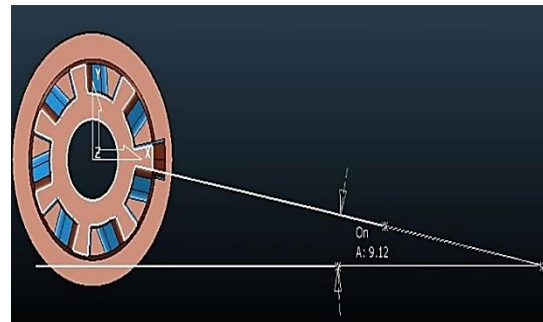
(الف)



(الف)



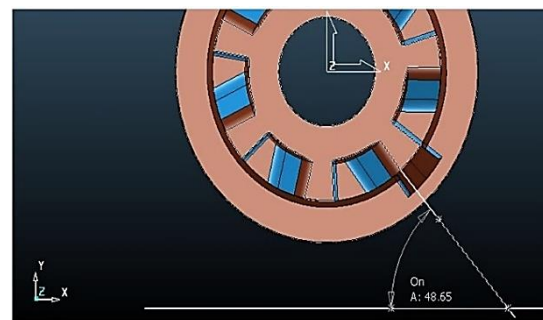
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۲۰- الف) موقعیت قرارگیری قطعه روی میز ماشین،
ب) زاویه اولیه مدل مجازی در محیط پاورمیل و
ج) دوران قطعه‌کار به اندازه زاویه گزارش شده پس از پردازش تصویر

شکل ۲۱- الف) تعیین مسیر ماشین‌کاری، ب) حرکت ابزار به سمت قطعه‌کار و ج) تماس شدن لبه ابزار با لبه قطعه‌کار

شده با هدف استخراج اطلاعات لازم برای ایجاد مدل مجازی آن قابل مشاهده است.

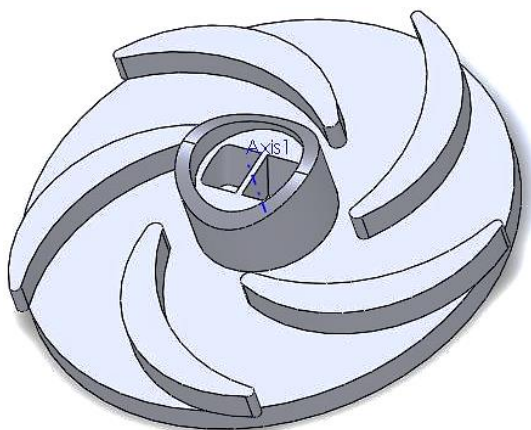
همچنین در شکل ۲۳، مدل مجازی ایجاد شده حاصل از اطلاعات استخراج شده از طریق پردازش تصاویر پره پمپ مورد نظر نمایش داده شده است.

در نهایت در شکل ۲۴، مسیر حرکت ابزار (تیغ فرز با قطر ۲۰ میلیمتر) داخل محیط نرم افزار پاورمیل و در شرایط واقعی روی پره پمپ ریخته‌گری شده مهار شده روی میز ماشین نمایش داده شده است. میانگین خطای مدل بازیابی شده از نقاط استخراج شده از طریق پردازش تصاویر مربوط به پره پمپ ریخته‌گری شده با هدف تعیین موقعیت آن پس از ده بار تکرار، ۰/۳۶۳ میلیمتر در هر سه راستای x، y و z، به دست آمد.

میانگین خطای مدل بازیابی شده از نقاط استخراج شده از طریق پردازش تصاویر مربوط به پره پمپ ریخته‌گری شده با هدف تعیین موقعیت آن پس از ده بار تکرار، ۰/۳۶۳ میلیمتر در هر سه راستای x، y و z، به دست آمد.

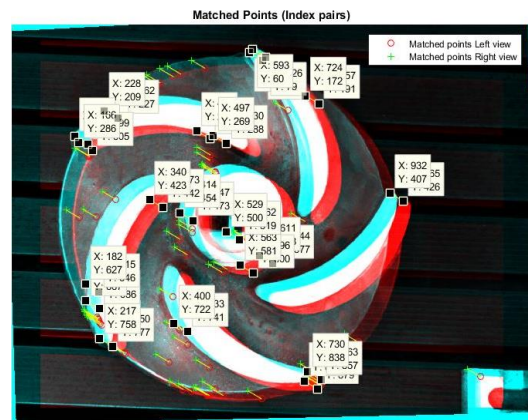
۷- بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های مختلفی برای هر یک از مراحل موقعیت‌دهی و مهار قطعه‌کار روی میز ماشین ابزار ارائه شده است که در برخی از آنها یافتن محل قطعه‌کار (موقعیت‌یابی) و همچنین مسیر ابزار برای شروع فرآیند ماشین‌کاری چالش برانگیز است. حتی اگر از موقعیت‌دهنده‌هایی که مختصات یک گوشه یا هر

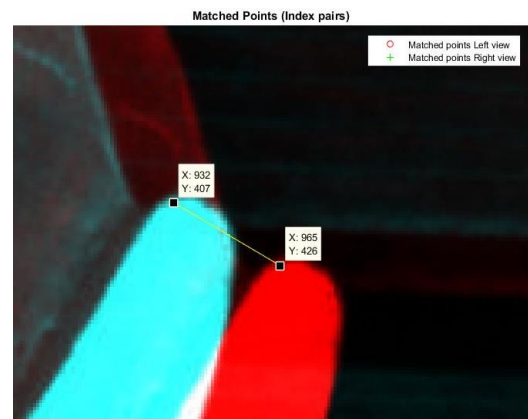


شکل ۲۳- مدل مجازی باز تولید شده با کمک اطلاعات استخراج شده حاصل از پردازش تصاویر پره پمپ ریخته‌گری شده

با توجه به مشخصات هندسی پره پمپ ریخته‌گری شده، به منظور تعیین زاویه یکی از لبه‌های آن نسبت به یک شاخص کار پیچیده‌تری است. از طرفی الگوی پره‌ای شکل تکراری موجود در این قطعه این امر را مشکل‌تر کرده است؛ لذا در این پژوهش اقدام به داده‌برداری از لبه‌های این قطعه‌کار با رعایت اصل تناظریابی بین تصاویر چپ و راست آن شد. در ادامه با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل مجازی آن ایجاد شده و در واقع قطعه‌کار با همان وضعیتی مدل شد که روی میز ماشین مهار و موقعیت‌دهی شده است. با این روش موقعیت‌یابی قطعه‌کار به صورت کارا ممکن شد. در شکل ۲۲، داده‌برداری روی لبه‌های پره پمپ ریخته‌گری



(الف)



(ب)

شکل ۲۲- (الف) تناظریابی روی لبه‌های پره‌ها و قسمت دایره‌ای شکل وسط پره پمپ ریخته‌گری شده و (ب) نمای نزدیک از تناظریابی روی لبه پره (رنگ قرمز تصویر دید از چپ و رنگ آبی تصویر دید از راست قطعه‌کار را نمایش می‌دهد)

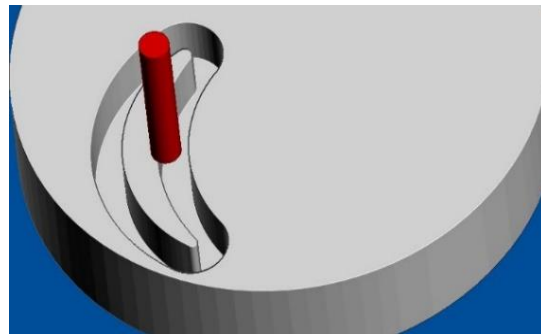
تصویر بسیار پیچیده بوده و نیازمند انجام آزمایش‌های متعدد و یافتن روابط پیچیده بین آن‌هاست.

به منظور موقعیت‌یابی دو نمونه قطعه‌کار ریخته‌گری شده با استفاده از توابع و الگوریتم‌های نوشته شده در نرم‌افزار متلب برای پردازش تصاویر گرفته شده از قطعه‌کار استفاده شد. نتایج به دست آمده گویای این مسئله است که الگوریتم‌های استفاده شده از قابلیت تکرار نتایج بالایی برخوردار است.

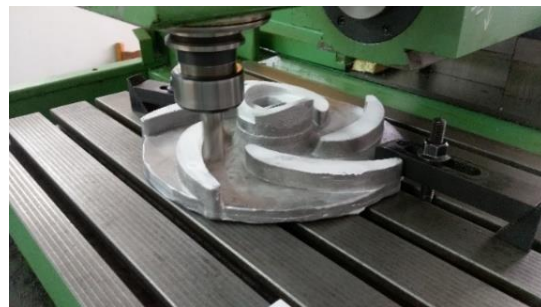
با توجه به اینکه قطعه‌کارهای هدف، با روش ریخته‌گری تهیه شده‌اند؛ یعنی دارای حداقل اضافه بار مجاز یک میلی‌متر هستند، لذا دقت‌های به دست آمده در استفاده از روش ماشین بینایی برای یافتن موقعیت قطعه‌کار روی میز ماشین فرز مورد استفاده مناسب است.

۸- مراجع

- [1] Pellegrinelli S, Cenati C, Cevasco L, Giannini F, Lupinetti K, Monti M, Parazzoli D, Tosatti LM (2017) Configuration and inspection of multi-fixturing pallets in flexible manufacturing systems evolution of the network part program approach. Robot Cim-Int Manuf 1-11.
- [2] Zhang X, Tian X, Yamazaki K (2010) On-machine 3D vision system for machining setup modeling. Int J Adv Manuf Technol 48: 251-265.
- [3] Rafiq A, Stephane T, Hascoet JY (2010) Integration of vision based image processing for multi-axis CNC machine tool safe and efficient trajectory generation and collision avoidance. J Mech Eng 10.
- [4] Okarma K, Grudziński M (2012) The 3D scanning system for the machine vision based positioning of workpieces on the CNC machine tools. Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR) 17th International Conference 85-90.
- [5] Domek S, Dworak P, Grudziński M, Okarma K (2013) Calibration Of cameras and fringe pattern projectors in the vision system for positioning of workpieces on the CNC machines. Solid State Phenomena (SSP) 229-234.
- [6] Karabagli B, Simon T, Orteu J (2015) A new chain-processing-based computer vision system for automatic checking of machining set-up application for machine tools safety. Int J Adv Manuf Technol 82: 1547-1568.
- [7] Xu L, Fan F, Hu Y, Zhang Z, Hu D (2020) A vision-based processing methodology for profile grinding of contour surfaces. J Eng Manuf 1-13.
- [8] Mun Fong K, Wang X, Kamaruddin S, Ismadi MZ (2021) Investigation on universal tool wear



(الف)



(ب)

شکل ۲۴- (الف) مسیر حرکت ابزار تعیین شده در پاورمیل و (ب) حرکت ابزار روی قطعه‌کار در شرایط واقعی

بخشی از آن‌ها نسبت به دستگاه مختصات ماشین از پیش تعیین شده باشد، باز هم در تولید برخی قطعه‌کارهای ریخته‌گری شده نیاز است تا مسیر ابزار روی آن به درستی تعیین شود.

راه حل پیشنهادی در این پژوهش استفاده از یک روش غیر تماسی با عنوان ماشین بینایی بود. بینایی استریو با هدف استخراج اطلاعات سه بعدی در این بحث مطرح شده است.

در بحث بینایی استریو، اصل اساسی تصویر است. یک تصویر در واقع یک سیگنال است که می‌توان آن را با یک آرایه دوبعدی نمایش داد؛ لذا استفاده از نرم‌افزار متلب به منظور پردازش تصاویر با توجه به ماتریسی بودن فضای نمایش دو بعدی تصاویر، کاربردی و مناسب است.

در پردازش تصویر، محل هر پیکسل و اطلاعاتی که آن پیکسل دارد، حائز اهمیت است. در پیدا کردن محل صحیح پیکسل مورد نظر، بین دو تصویر چپ و راست در روش استریو اطلاعاتی که آن پیکسل دارد از جمله میزان شدت نور دریافتی مد نظر است. با توجه به ماهیت روش استریو، پارامترهای تأثیرگذار بر دقت یافتن پیکسل صحیح از روی

- [15] Ghosh P, Pandey A, Pati UC (2015) Comparison of different feature detection techniques for image mosaicing. ACCENTS Transactions on Image Processing and Computer Vision (TIPCV).
- [16] Gholipour A, Kehtarnavaz N, Briggs R, Devous M, Gopinath K (2007) Brain functional localization: A survey of image registration techniques. IEEE Trans Med Imaging 26: 427-451.
- [17] Bolles MA, Fischler RC (1981) Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Commun ACM 24: 381-395.
- [18] Xu G, Zhang Z (1996) Epipolar geometry in stereo motion and object recognition a unified approach. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [19] Monasse P, Morel JM, Tang Z (2010) Three-step image rectification. British Machine Vision Conference (BMVC).
- [20] Bouguet JV (2018) www.mathworks.com/mathworks, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- [21] Zhang Z (2000) A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI) 22: 1330-1334.
- measurement technique using image-based cross-correlation analysis. Measurement 169.
- [9] Aguilar JJ, Torres F, Lope MA (1996) Stereo vision for 3D measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications. Measurement 18: 193-200.
- [10] Kazmi W, Foix S, Aleny`a G, Andersen HJ (2014) Indoor and outdoor depth imaging of leaves with time-of-flight and stereo vision sensors: Analysis and comparison. ISPRS J Photogramm Remote Sens 88: 128-146.
- [11] Hamzah RA, Kadmin AF, Saad Hamid M, Ghani FA (2018) Improvement of stereo matching algorithm for 3D surface reconstruction. Signal Process Image Commun 65: 165-172.
- [12] Yangao L, Wang B, Zhang B, Zhou H, Wang R (2018) Analysis on location accuracy for the binocular stereo vision system. IEEE Photonics J 10.
- [13] Flusser J, Zitova B (2003) Image registration methods: A survey. Image Vis Comput 21: 977-1000.
- [14] Zhang Q, Wang Y, Wang L (2015) Registration of images with affine geometric distortion based on maximally stable extremal regions and phase congruency. Image Vis Comput. 36: 23-39.