

موقعیت‌یابی پروانه قایق موتوری روی ماشین کنترل عددی سه‌محوره با استفاده از ماشین بینایی

حسین امیرآبادی^{۱*}، امیر بشارتی‌نیا^۲، بابک هوشمند^۳، خلیل خلیلی^۳

^۱ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

^۳ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

*مسئول مکاتبات: hamirabadi@birjand.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

ماشین بینایی
تنظیم قطعه
بینایی استریو
قطعات ریخته‌گری
ماشین‌های کنترل عددی (CNC)

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

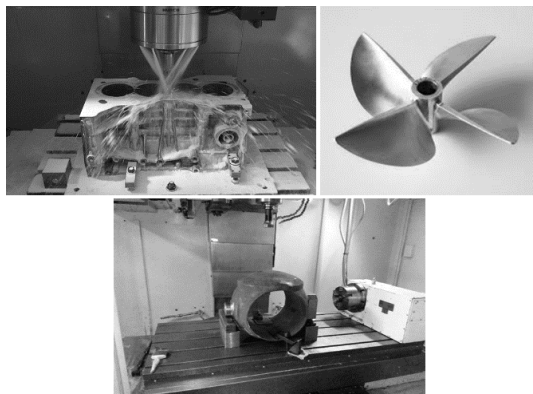
اغلب قطعات ریخته‌گری شده برای اینکه به دقت ابعادی و صافی سطح مطلوب برسند، نیاز به عملیات ماشین‌کاری دارند. به منظور کاهش هزینه مواد و همچنین هزینه‌های ماشین‌کاری تلاش می‌شود که مقدار اضافه ماده لحاظ شده در فرآیند ریخته‌گری تا حد امکان کم باشد و در نتیجه ماشین‌کاری این نوع قطعات با حجم برابرداری بسیار کم (اصطلاحاً عمل سفیدکاری) به صورت اقتصادی صورت می‌پذیرد. تنظیم این نوع قطعات اغلب به صورت سعی و خطا صورت می‌گیرد که علاوه بر زمان‌بر بودن، خطا در تنظیم قطعه کار موجب معیوب شدن قطعه یا دوباره‌کاری می‌شود. در این پژوهش جهت کاهش زمان تنظیم قطعه‌کار روی ماشین‌ابزار؛ استفاده از ماشین بینایی و روش بینایی استریو پیشنهاد گردیده است. بدین منظور در ابتدا فرآیند کالیبراسیون دوربین‌ها و سپس استخراج داده‌های سه بعدی از تصاویر ضبط شده صورت گرفته و پس از آن با تحلیل داده‌ها، پارامترهای مورد نیاز جهت موقعیت‌یابی قطعه کار از داخل نرم‌افزار استخراج شده است. در ادامه از آنجا که تنظیم قطعات با فرم آزاد روی ماشین‌های کنترل عددی (CNC) مشکل و زمان‌بر است لذا موقعیت‌یابی پیش از شروع عملیات ماشین‌کاری یک پروانه قایق موتوری که جزء قطعات غیر منشوری و دارای فرم آزاد است مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت زمان و دقت تنظیم قطعه مذکور با روش ماشین بینایی با حالت تنظیم دستی مقایسه شد.

۱ مقدمه

با دقت و حساسیت بیشتری انجام شود [۲].

تنظیمات لازم پیش از شروع عملیات ماشین‌کاری شامل موقعیت‌دهی، مهار و در نهایت موقعیت‌یابی قطعه‌کار مورد نظر است. در این بین، موقعیت‌یابی برخی از قطعات، مانند پروانه قایق موتوری، تویی داخلی شیرهای صنعتی، بلوک سیلندر خودرو که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند؛ بسیار زمان‌بر است به طوری که حتی ممکن است از عملیات ماشین‌کاری مورد نیاز نیز زمان بیشتری به خود اختصاص دهد.

رقابت شدید در بازار امروزی، سبب شده است که تولیدکنندگان در تکاپوی بیشتری برای کاهش زمان تولید، افزایش کیفیت و دقت محصولات تولیدی‌شان باشند به‌گونه‌ای که ساخت قطعات با هزینه کمتر و دقت بالاتر به یک ضرورت غیرقابل انکار تبدیل شده است [۱]. قطعات در صنعت با استفاده از روش‌های مختلف همانند ریخته‌گری، نوردکاری^۱، اکستروژن^۲، آهنگری، جوشکاری، متالورژی پودر^۳ و ماشین‌کاری تولید می‌شوند. ماشین‌کاری جزء لاینفک در تولید اغلب قطعات است که امروزه اغلب توسط ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری^۴ (CNC) انجام می‌گیرد. در فرآیند تولید برخی از قطعات، ابتدا توسط یکی از روش‌های ریخته‌گری و یا آهنگری شکل اولیه‌ای نزدیک به قطعه مدنظر به آن‌ها داده می‌شود و سپس این قطعات برای دست‌یابی به دقت و صافی مدنظر ماشین‌کاری می‌شوند. در صنعت تلاش بر این است که ریخته‌گری این موارد با حداقل اضافه ماده انجام شود و در ادامه ماشین‌کاری قطعات ریخته‌گری شده با حجم براده برداری بسیار کمی (اصطلاحاً عمل سفیدکاری) به علت صرفه‌جویی در مواد ریخته‌گری و کاهش زمان ماشین‌کاری انجام پذیرد. لازم است که تنظیم این نوع قطعات ریخته‌گری شده (که دارای حداقل مقدار اضافه ماده هستند) روی ماشین‌ابزار



شکل ۱: نمونه قطعاتی که بعد از ریخته‌گری، نیاز به ماشین‌کاری دقیق دارند.

¹rolling ²extrusion ³powder metallurgy ⁴Computer Numerical Control

کرد. آن‌ها به ترتیب از لیزر نقطه‌ای، نورساختار یافته و لیزر خطی برای تناظریابی بهره بردند. در این تحقیق، از نشان‌گرهای^۸ چسبیده‌شده بر روی سطح قطعه‌کار مورد نظر به منظور افزایش سرعت و دقت در امر تناظریابی استفاده شده است.

به طور خلاصه، ضرورت و اهمیت تنظیم قطعه‌کار با استفاده از ماشین بینایی روی میز ماشین فرز کنترل عددی کامپیوتری به شرح زیر است.

۱. کاهش زمان تنظیم قطعه‌کار با استفاده از روش ماشین بینایی نسبت به روش دستی.

۲. جلوگیری از معیوب شدن قطعه‌کار با حذف نیاز به اجرای مجدد عملیات ماشین‌کاری که ممکن است با براده‌برداری ناخواسته همراه باشد.

۳. افزایش بهره‌وری ماشین و کاربر.

یکی از اهداف مهم این پژوهش، کاهش زمان تولید و در نتیجه کاهش هزینه تولید یک قطعه‌کار ریخته‌گری شده است.

در این تحقیق با اندازه‌گیری ابعاد قطعات استاندارد دارای دقت معلوم، درصد خطای سیستم در اندازه برداری سه بعدی از سطح قطعه و میز ارائه گردیده است. در نهایت به کمک بینایی استریو آزمون تجربی و استخراج پارامترهای مورد نیاز جهت تنظیم قطعات روی میز انجام گرفته است.

۲ میزان اضافه مجاز تراش برای ماشین‌کاری

قطعات ریخته‌گری شده بعد از تولید نیاز به ماشین‌کاری دارند، لذا اضافه باری جهت ماشین‌کاری آنها در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین مقدار تراش مجاز از جدول ۱ استفاده می‌گردد. به این صورت که بزرگترین اندازه قطعه در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا هرچه ابعاد بزرگتر اضافه تراش بیشتر پس بدین ترتیب ماکزیمم اضافه تراش برای قطعه قرائت می‌شود تا اطمینان حاصل شود هیچ مک و حفره و ناخالصی درون قطعه باقی نمی‌ماند. با توجه به جنس قطعه (چدن، فولاد، فلزات غیر آهنی) مقدار تراش برای سطوح زیری، سطوح داخلی و جانبی و سطوح رویی مشخص می‌شود [۱۱].

جدول ۱: استاندارد تراش مجاز در آلایژهای مختلف بر حسب میلی‌متر [۱۱].

جنس قطعه	اندازه قطعه	سطوح زیری	سطوح داخلی و خارجی	سطوح رویی
چدن	تا ۱۵۰	۲/۵	۳	۵
	تا ۳۰۰	۳	۳/۵	۵/۵
	۳۰۰ - ۵۰۰	۴	۵	۶
	۵۰۰ - ۹۰۰	۴/۵	۵/۵	۶/۵
فولاد	تا ۱۵۰	۵	۶	۸
	تا ۳۰۰	۳	۳	۶
	۳۰۰ - ۵۰۰	۵	۶	۸
	۵۰۰ - ۹۰۰	۶	۷	۹/۵
فلزات غیر آهنی	تا ۱۵۰	۶	۸	۱۲
	۷۵ - ۱۰	۱/۵	۱/۵	۲
	۷۵ - ۲۰۰	۱/۵	۲	۲/۵
	۲۰۰ - ۳۰۰	۲	۲/۵	۳
	۳۰۰ - ۵۰۰	۲/۵	۳	۳/۵
	۵۰۰ - ۹۰۰	۳	۳/۵	۳/۵
	۹۰۰ - ۱۵۰۰	۳	۴	۵

بسته به نوع قطعه‌کار، ممکن است به منظور موقعیت‌یابی به استخراج اطلاعات سه بعدی از روی آن نیاز باشد. لذا از روش استریو جهت داده‌برداری سه‌بعدی اطلاعات استفاده شده است. اهمیت برداشت سه بعدی داده‌ها در این است که گاهی پیش از شروع عملیات ماشین‌کاری، یافتن محل سطح یا لبه‌ای از قطعه‌کار که بر روی میز ماشین ابزار مورد استفاده مهار و در جای خود محکم شده و انطباق آن با مدل مجازی، بسیار زمان‌بر است. قطعات با پیچیدگی هندسی بالا مانند پروانه قایق موتوری از جمله این موارد هستند.

داده‌برداری سه‌بعدی از اطلاعات هندسی و حرکتی اشیا از جمله پرکاربردترین زمینه‌های ماشین بینایی است، سیستم‌های داده‌برداری سه بعدی به دو گروه تماسی و غیر تماسی تقسیم می‌شوند. سیستم‌های غیر تماسی خود به دو گروه فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌گردند. نورپردازی ساختاریافته از جمله روش‌های فعال و سیستم بینایی استریو از جمله روش‌های غیرفعال ماشین بینایی است.

برخی پژوهش‌هایی که به استفاده از ماشین بینایی در کاربرد صنعتی و با هدف اجرای آن بر روی ماشین‌های کنترل عددی پرداخته است، عبارتند از: تیان و همکاران [۳] سیستم بینایی را جهت شبیه‌سازی عملیات ماشین‌کاری در ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری ارائه کردند. از آنجایی که کنترل عملیات به صورت دستی یک فرایند وقت‌گیر و مستعد خطا است آن‌ها این سیستم را ارائه کردند. اکارما و همکاران [۴] برای تهیه مدل مجازی قطعات و موقعیت‌یابی آن بر روی میز ماشین‌های کنترل عددی و همچنین به دست آوردن عمق هر یک از نقاط صحنه، با استفاده از سه دوربین و سه پروژکتور اقدام به داده‌برداری از سطح قطعه کردند. نتیجه این فرآیند، تشکیل ابر نقطاتی از سطح قطعه بود که عمق هر نقطه پیکسل را تعیین کرده و سپس مدل مجازی قطعه را شبیه‌سازی کردند. استفان دومک و همکاران [۵] سیستم بینایی را برای موقعیت‌یابی خودکار قطعات روی میز ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری ارائه کردند. ایده آن‌ها بر اساس اسکن سه بعدی با استفاده از الگوی لبه‌یابی صورت گرفته است؛ اما دقت کار آن‌ها به شدت به شرایط نورپردازی و کالیبراسیون مناسب سیستم بستگی دارد. پولیک^۵ و همکاران [۶] از ماشین بینایی برای تعیین موقعیت مرکز یک بلوک مکعبی بسته شده بر روی میز ماشین کنترل عددی استفاده کردند. آنها از الگوریتم سبل^۶ برای لبه‌یابی و یک شبکه عصبی آموزش داده شده برای تعیین مختصات پیکسلی مرکز بلوک مذکور استفاده کردند. رفیق احمد و همکاران [۷] به منظور هوشمندسازی فرآیند ماشین‌کاری در تعیین مسیر حرکت ابزار با هدف جلوگیری از برخورد ابزار با تجهیزات موجود در محیط ماشین‌کاری و همچنین حرکت مؤثر آن، از پردازش تصاویر گرفته شده از منطقه ماشین‌کاری و اعمال یک الگوریتم مسیریاب بهره بردند.

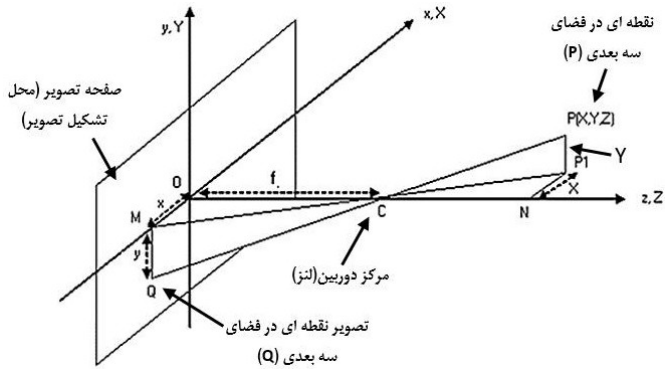
در استفاده از روش بینایی استریو ذکر این نکته حائز اهمیت است که با توجه به استفاده از دو تصویر از یک منظره، برای عمق‌یابی (استخراج بعد سوم) هر نقطه در فضا لازم است تا از تشابه نقطه انتخاب‌شده بین دو تصویر اطمینان حاصل کرد. این امر با عنوان یافتن نقطه متناظر^۷ شناخته می‌شود. موارد انجام‌شده در بحث تسهیل در تناظریابی می‌توان به کار دیپاندا و همکاران [۸]، جانگ و همکاران [۹] و تورس و همکاران [۱۰]، اشاره

^۵Paulic ^۶Sobel ^۷correspondence point ^۸markers

۳ بینایی استریو

$$x = \frac{fX}{Z - f}, \quad (3)$$

$$y = \frac{fY}{Z - f}. \quad (4)$$



شکل ۳: هندسه تصویربرداری دوربین [۱۴].

با توجه به روابط (۳) و (۴) امکان به دست آوردن بعد سوم نقطه (مختصات راستای Z) وجود ندارد. بنابراین برای محاسبه مختصات کلی نیاز به استفاده از سیستم بینایی استریو است.

۲.۳ مدل تصویربرداری استریو

شکل ۴ هندسه تصویربرداری استریو را نشان می‌دهد. در این سیستم فرض بر این است که دوربین‌ها کاملاً مشابه یکدیگر بوده، صفحه سنسور دوربین‌ها در راستای یکدیگر قرار دارند و فاصله کانونی برابر با f است [۱۴]. از معادله (۱) داریم:

$$X_1 = \frac{x_1}{f} (f - Z_1), \quad (5)$$

$$X_2 = \frac{x_2}{f} (f - Z_2). \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، اندیس‌های ۱ و ۲ برای (X, Y, Z) به معنی انطباق سیستم مختصات جهانی بر مختصات دوربین چپ و راست است. عبارتند از فاصله بین مراکز محور نوری دوربین‌های چپ و راست که با عنوان خط پایه^۹ شناخته می‌شود. این پارامتر بیانگر فاصله بین مراکز دو دوربین چپ و راست است. با فرض هم راستا بودن دو صفحه سنسور و دوربین داریم:

$$X_2 = X_1 + B \quad (7)$$

$$Z_2 = Z_1 = Z \quad (8)$$

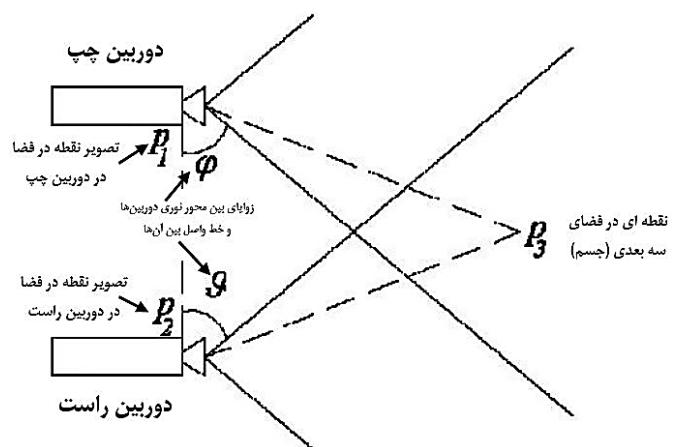
با جایگذاری روابط (۵) و (۶) در رابطه (۷) و با توجه به رابطه (۸)، رابطه زیر که مربوط به محاسبه عمق است به دست می‌آید.

$$Z = f - \frac{fB}{x_2 - x_1}. \quad (9)$$

بنابراین با داشتن x_1, x_2 و f می‌توان بعد سوم تصویر را محاسبه نمود.

بینایی استریو تشخیص ساختار سه‌بعدی و عمق اجسام با استفاده از دو یا چند تصویر محیط از زوایای مختلف است. در حقیقت این تفاوت زاویه دید از محیط است که منجر به توانایی تشخیص عمق می‌شود [۱۲].

جهت تهیه تصاویر استریو دو روش وجود دارد: در یک روش تصویرگیری به کمک دو عدد دوربین و به‌طور هم‌زمان صورت می‌گیرد و در روش دیگر به‌وسیله یک عدد دوربین از دو نمای مختلف شیء تصویر گرفته می‌شود. در نتیجه در روش دوم به هنگام جابجایی دوربین، برخی خصوصیات صحنه تغییر می‌کند و دقت کار نسبت به روش اول کاهش می‌یابد [۱۳]. در این تحقیق به علت بالا بودن دقت کار از دو دوربین به‌طور هم‌زمان مطابق الگوی به کار رفته در شکل ۲ استفاده گردید.



شکل ۲: موقعیت دوربین‌های چپ و راست نسبت به یکدیگر با محورهای دید موازی.

۱.۳ مروری بر هندسه تصویربرداری

شکل ۳ نحوه تشکیل تصویر در دوربین را با تبدیل پرسپکتیو نشان می‌دهد. این تبدیل نقاط سه‌بعدی فضا را به داخل صفحه تصویر می‌نگارد و چگونگی تشکیل پیکسل‌های تصویر از نقاط سه‌بعدی محیط را ارائه می‌دهد، در واقع مدل تصویربرداری دوربین، فرآیند نگاشت فضای سه‌بعدی به دو بعدی است؛ بنابراین طی این فرآیند نگاشت اطلاعات مربوط به عمق تصویر بازیابی می‌شود [۱۴]. در این سیستم، دستگاه مختصات دوربین با (x, y, z) و سیستم دستگاه مختصات جهانی با (X, Y, Z) مشخص شده است؛ همچنین پارامتر f ، فاصله کانونی (فاصله بین مرکز لنز دوربین و سنسور تصویربرداری آن) است؛ بنابراین از تشابه دو مثلث CNP_1 و COM داریم:

$$\frac{x}{f} = \frac{X}{Z - f}, \quad (1)$$

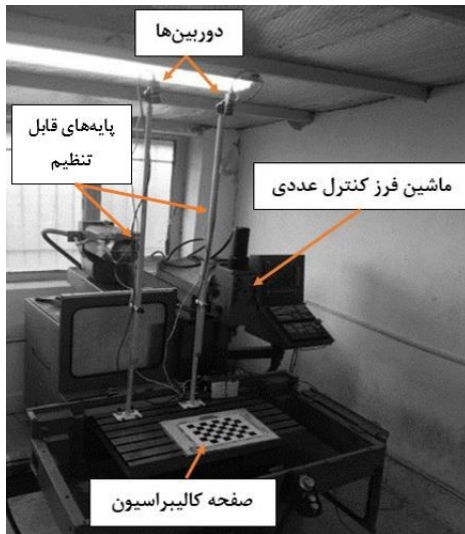
و برای دو مثلث CP_1P و CMQ داریم:

$$\frac{y}{f} = \frac{Y}{Z - f}. \quad (2)$$

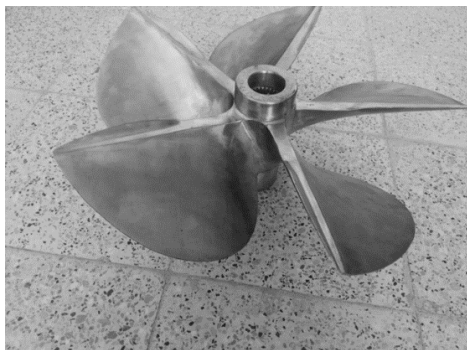
از روابط (۱) و (۲) داریم:

⁹base line

به دست‌یابی به حداکثر میدان دید ممکن برای هر یک از دوربین‌ها نسبت به میز ماشین‌ابزار فاصله بین دوربین‌ها تا میز ماشین ۱۵۰۰ mm تنظیم شد.



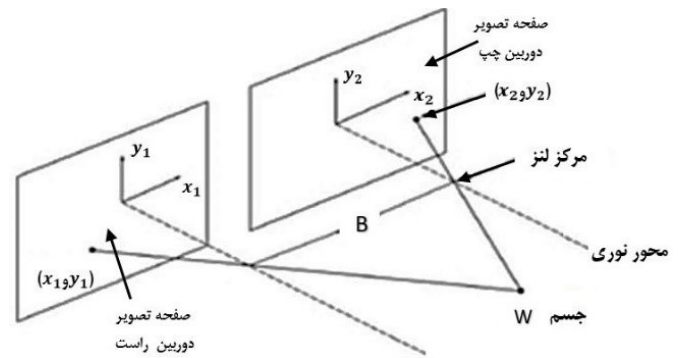
شکل ۵: سیستم آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده



شکل ۶: قطعه بافرم آزاد (پروانه قایق موتوری)

پیش از شروع اندازه‌گیری و موقعیت‌یابی قطعه‌کارهای مورد آزمایش، مهمترین موضوع کالیبراسیون صحیح دوربین‌ها است.

به طور کلی، هدف از کالیبراسیون دوربین، تعیین رابطه نگاشت نقطه بین دستگاه مختصات جهانی و دستگاه مختصات پیکسلی است [۱۷]. کالیبراسیون دوربین، با ارائه الگوهای شناخته شده به دوربین و تجزیه و تحلیل تصاویر به دست آمده ادامه می‌یابد. سپس، یک فرآیند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه پارامترهایی را که مشاهدات را توضیح می‌دهند، تعیین می‌کند. این فرآیند پیچیده توسط نرم‌افزاری مانند matlab به راحتی انجام می‌شود. 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 دقت افزایش می‌یابد. در شکل ۷ نمونه‌ای از نقاط استخراج شده از روی صفحه کالیبراسیون با الگوی شناخته شده توسط نرم‌افزار matlab نمایش داده شده است.



شکل ۴: هندسه تصویربرداری استریو [۱۵].

۳.۳ تناظریابی

نقاط ویژگی در یک تصویر مانند لبه‌ها و گوشه‌ها از جمله نقاطی هستند که از درجه بالای تمایز نسبت به سایر ویژگی‌های موجود در تصویر برخوردار هستند. به عبارتی گرادیان شدت نور در این نقاط مقدار بالایی دارد. با استفاده از تطبیق استریو می‌توان عمق نقاط ویژگی را با دقت مناسبی (حداکثر دقت به دست آمده در آزمون‌های تجربی ۰/۳ میلی‌متر و کمتر از آن است) استخراج کرد. منظور از انطباق استریو، پاسخ یک‌به‌یک، بین پیکسل‌هایی است که یک صحنه فضایی مشابه را در دو دید مختلف نمایش می‌دهند [۱۶]. پس از استخراج نقاط ویژگی در تصاویر دوربین‌ها، فرآیند تطبیق برای نقاط ویژگی انجام می‌گیرد. هدف از فرآیند تطبیق، استخراج مختصات سه‌بعدی نقاط ویژگی مورد نظر مطابق رابطه (۹) است. برای سهولت در یافتن نقاط ویژگی مشابه بین دو تصویر چپ و راست، روش‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله استفاده از نور ساختار یافته که با الگویی مشخص بر سطح قطعه‌کار هدف پرتوافکنی می‌شود و یا استفاده از لیزرهای خطی و نقطه‌ای. در این تحقیق از نشان‌گرهایی که بر سطح قطعه‌کار چسبانده شده‌اند برای این امر استفاده شده تا بتوان انطباق را به راحتی انجام داد. در بخش ۵، نحوه استفاده و محل چسباندن این نشان‌گرها بر روی پره قایق موتوری نمونه آورده شده است.

۴ سیستم آزمایشگاهی پیاده‌سازی شده

در شکل ۵ اجزای سخت‌افزاری سیستم آزمایشگاهی به منظور تصویربرداری، استخراج ابعاد و ویژگی‌های مورد نظر از روی قطعه‌کارهای مورد استفاده در این پژوهش نمایش داده شده است. دوربین‌های استفاده شده در این پژوهش شامل دو عدد دوربین محصول شرکت theimagingSource با کد DFK 23GM021 و با دو سریال 31414851 و 31414852 هستند. نرخ داده برداری آن‌ها ۶۰ فریم بر ثانیه، تشکیل‌پذیری ۱۰^{۱۶} × ۹۶۰ × ۱۲۸۰ و مجهز به حسگر CMOS^{۱۱} هستند. همچنین از دو لنز با کد شناسه M1214-MP2، قطر ۳۲ mm و فاصله کانونی ۱۲ mm استفاده شد. صفحه کالیبراسیون استفاده شده دارای تعداد ۶ × ۸ مربع با ابعاد ۳۰ × ۳۰ میلی‌متر است. همچنین از پایه‌های قابل تنظیم جهت نصب دوربین‌ها، ماشین‌ابزار فرز کنترل عددی کامپیوتری سه محوره و یک عدد پروانه قایق موتوری ریخته‌گری شده از جنس فولاد به قطر خارجی ۴۸ میلی‌متر (شکل ۶) نیز استفاده شد. با هدف

¹⁰resolution ¹¹sensor

با توجه به شکل ۸ میانگین خطای پیکسلی در راستای x و y به ترتیب $0/10197$ و $0/18083$ بر حسب پیکسل است. همچنین با توجه به شکل ۹، میانگین خطای پیکسلی در راستای x و y به ترتیب $0/5912$ و $0/24322$ بر حسب پیکسل است. میانگین خطای به دست آمده برای هر دوربین، خروجی نرم افزار متلب و بر مبنای میزان عدم تطبیق با محل واقعی هر نقطه پیکسل در فضای سه بعدی با تصویر آن بر صفحه تصویر است. و بر در ادامه موقعیت دوربین راست کالیبره شده نسبت به دوربین چپ کالیبره شده توسط ماتریس انتقال T و ماتریس دوران R ، تعیین می شود. بنابراین هر نقطه (X, Y, Z) در سیستم مختصات دوربین چپ با نقطه (X', Y', Z') در سیستم مختصات دوربین راست متناسب است به طوری که:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + T \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، ماتریس دوران (رابطه (۱۱)) و انتقال (رابطه (۱۲)) عبارتند از:

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

$$\begin{cases} R_{11} = \cos \phi_y \cos \phi_z, \\ R_{12} = \cos \phi_x \sin \phi_z + \sin \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z, \\ R_{13} = \sin \phi_x \sin \phi_z - \cos \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z, \\ R_{21} = -\cos \phi_y \sin \phi_z, \\ R_{22} = \cos \phi_x \cos \phi_z + \sin \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z, \\ R_{23} = \sin \phi_x \cos \phi_z + \cos \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z, \\ R_{31} = \sin \phi_y, \\ R_{32} = -\sin \phi_x \cos \phi_y, \\ R_{33} = \cos \phi_x \cos \phi_y. \end{cases}$$

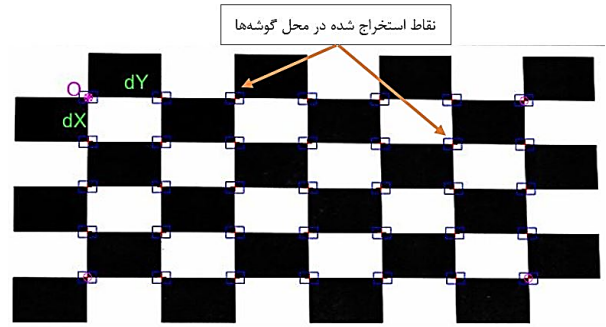
$$T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (12)$$

زوایای ϕ_x, ϕ_y و ϕ_z چرخش اویلر حول محورهای X, Y و Z هستند. همچنین t_x, t_y و t_z میزان جابجایی در امتداد محورهای X, Y و Z هستند. در جدول ۲ پارامترهای خارجی استخراج شده توسط نرم افزار matlab مشاهده می شود.

جدول ۲: پارامترهای بیرونی استخراج شده بعد از کالیبراسیون

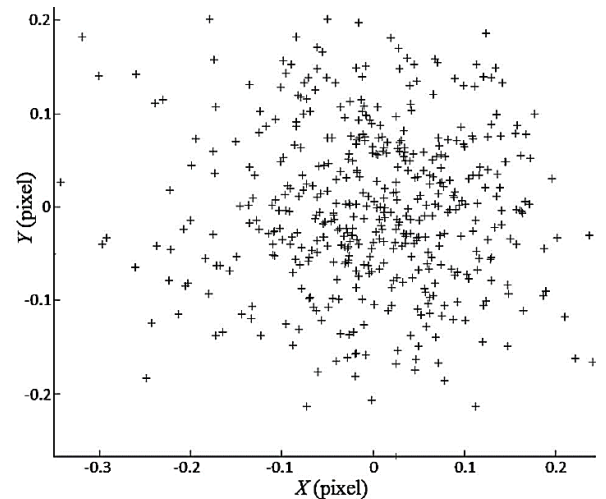
پارامتر	t_x (mm)	t_y (mm)	t_z (mm)	ϕ_x (deg)	ϕ_y (deg)	ϕ_z (deg)
مقدار	-۴۳۵/۸۹	-۱۵/۸۷	-۵/۲۵	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۰۲

به منظور بررسی دقت به دست آمده توسط سیستم آزمایشگاهی پیاده سازی شده، از دو بلوک گچی با اندازه اسمی ۵۰ و ۷۰ میلیمتر و دقت ساخت ۰/۰۱ میلیمتر استفاده شد (شکل ۱۰).

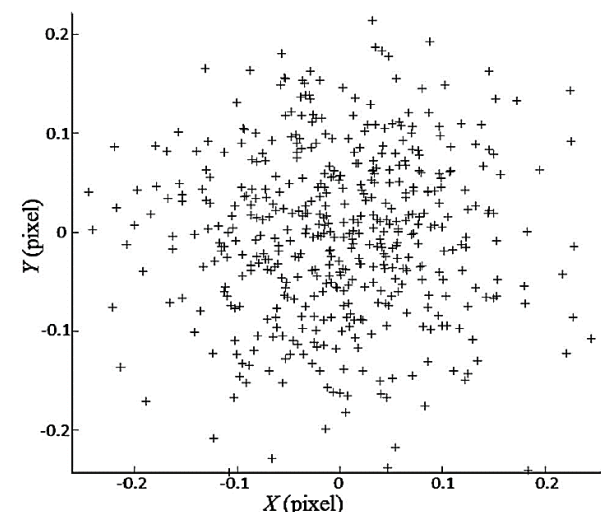


شکل ۷: نقاط استخراج شده از روی صفحه کالیبراسیون

برای استخراج پارامترهای کالیبراسیون شامل ماتریس انتقال و دوران با دقت قابل قبول، با توجه به صفحه کالیبراسیون استفاده شده در این پژوهش، ۳۵ نقطه از آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه صفحه کالیبراسیون در ۲۳ موقعیت مختلف در میدان دید هر یک از دوربین‌ها به منظور کالیبره کردن محدوده مورد نظر جابجا شد. پس از یافتن پارامترهای کالیبراسیون و برقراری رابطه مجدد بین نقاط متناظر بر صفحه کالیبراسیون و تصویر، برای تمام نقاط، مقدار اختلاف بین محل واقعی نقاط تصویر و نقاط استخراج شده برای هر یک از دوربین‌های چپ و راست در شکل ۸ و ۹ نمایش داده شده است.



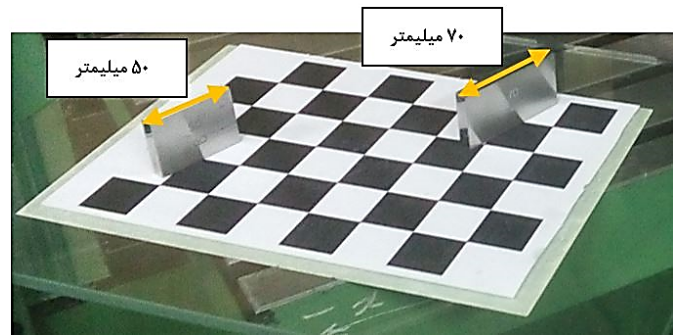
شکل ۸: تحلیل خطا برای نقاط مختلف صفحه کالیبراسیون (دوربین راست)



شکل ۹: تحلیل خطا برای نقاط مختلف صفحه کالیبراسیون (دوربین چپ)

تقاطع آن‌ها به عنوان نقطه گوشه در نظر گرفت شد. در شکل ۱۱، خطوط استخراج شده بر روی بلوک گیج‌های مورد استفاده مشخص شده است. یک لایه رنگ سفید روی سطح بلوک گیج‌ها برای عملکرد بهتر لایه‌یاب در نظر گرفته شده است. شدت لایه ۱۲ که تعیین‌کننده حداقل اختلاف در مقادیر شدت نور بین زمینه و لایه است، ۱۹/۴۵ در نظر گرفته شد. نقاط استخراج شده بر حسب مختصات پیکسلی تحت تابع مثلث‌بندی روش استریو به مختصات متریک تبدیل شده و فاصله اقلیدسی آن‌ها به دست آمد.

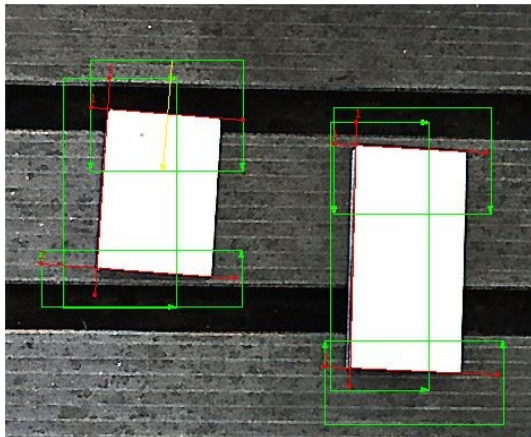
در جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری بلوک گیج‌های ۵۰ و ۷۰ میلیمتری مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰: بلوک گیج‌های انتخاب‌شده جهت اندازه‌گیری دقت به دست آمده

شرایط تصویربرداری برای اندازه‌گیری این قطعات با شرایطی که در ادامه برای تعیین موقعیت قطعه‌کارهای مورد بررسی در این پژوهش استفاده شده حتی الامکان یکسان در نظر گرفته شده است. با توجه به تلاش بر استفاده از روش پیاده‌سازی شده در شرایط کارگاهی، شدت نور با توجه به حضور دایمی کاربر، مطابق سیستم استاندارد بین المللی SI بایستی در محدوده ۲۰۰ لوکس باشد که با توجه به ابعاد کارگاه یعنی ۳۵ متر مربع باید ۷۰۰۰ لومن در نظر گرفته شود. این امر با کمک ۵ عدد لامپ فلورسنت ۲۰ وات تامین گردید. تصاویر برداشته شده از بلوک گیج‌ها به منظور کاهش حجم محاسبات ابتدا به مقیاس خاکستری تبدیل شدند. این تبدیل توسط نرم‌افزار NI Vision Assistant و در محیط برنامه نویسی Labview انجام شد.

در مرحله بعد به منظور اندازه‌گیری طول بلوک گیج‌ها، باید لایه‌های آن‌ها استخراج شود. لایه در یک تصویر عبارتند از تغییر قابل توجه در مقدار سطح خاکستری بین پیکسل‌های مجاور. نرم افزار NI Vision Assistant مقادیر پیکسل را در طول یک پروفیل یک بعدی برای تشخیص تغییرات ناگهانی شدت روشنایی تحلیل می‌کند. با تعیین یک آستانه می‌توان تعیین کرد که چه رنجی از تغییرات، یک لایه را شامل شوند. عملگر لایه‌یاب در نرم‌افزار مذکور به منظور تشخیص لایه، در امتداد خطوطی که موازی یکدیگر بوده اقدام به جستجوی تغییرات ناگهانی در شدت روشنایی می‌کند. در شکل ۱۱، نحوه شناسایی لایه توسط نرم‌افزار مذکور قابل مشاهده است.



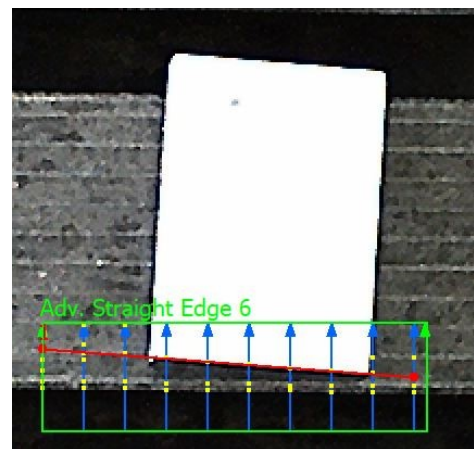
شکل ۱۲: لایه‌های شناسایی شده از روی بلوک گیج‌ها

جدول ۳: اندازه‌گیری بلوک گیج‌ها

خطای نسبی (%)	نتیجه سیستم استریو (mm)	اندازه اسمی (mm)	دقت (mm)	اندازه مشخص گیج
۰/۱۷	۶۹/۸۷۵۱	۷۰	۰/۰۱	بلوک گیج
۰/۳۲	۴۹/۸۳۵۷	۵۰	۰/۰۱	بلوک گیج

۵ تنظیم و ماشین‌کاری پروانه قایق موتوری با پردازش تصویر آن

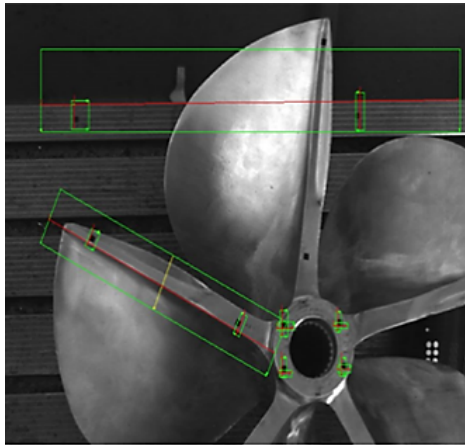
پروانه قایق موتوری (شکل ۱۳) جزء قطعات غیر منشوری دارای فرم آزاد است. با توجه به اینکه این نوع قطعه سطح مبنای مناسبی جهت قرارگیری روی میز ماشین ندارد و بعد از قرارگیری روی میز ماشین مدل ماشین‌کاری با مدل کد دارای موقعیت قرارگیری یکسانی نیست، تنظیم آن در واحدهای صنعتی مشاهده شده توسط پژوهشگر، به صورت سعی و خطا و مبتنی بر تجربه است. رویه تجربی به کار گرفته شده توسط اپراتور ماشین این‌گونه است که بعد از قرارگیری قطعه روی میز ماشین با یک افستی^{۱۳} از سطح پروانه برنامه ماشین‌کاری را اجرا می‌کنند و ابزار را به سطح پروانه نزدیک می‌کنند و چنانچه مدل کد پروانه با قطعه در یک راستا نباشد و ابزار با اختلاف زیادی از سطح موردنظر حرکت کند مدل کد را می‌چرخانند تا با قطعه یکی شود و این کار بر اساس تجربه شخص اپراتور ممکن است در چند مرحله انجام گیرد. در این پژوهش با استفاده از ماشین بینایی زاویه قرارگیری پروانه نسبت به یک قسمت مبنا (لایه) میز ماشین که با ساعت اندازه‌گیری کنترل شده به عنوان سطح



شکل ۱۱: جستجو برای یافتن بهترین لایه

به منظور یافتن نقاط گوشه متناظر بین دو تصویر چپ و راست از تصاویر بلوک گیج‌ها، لایه‌های مورد نظر مطابق شکل ۱۲ استخراج شده و سپس محل

¹²edge strength ¹³offset



شکل ۱۴: ویژگی‌های استخراج شده با کمک نشان‌گرها.

جدول ۵، نتایج ۵ آزمایش به منظور موقعیت‌یابی پروانه قایق موتوری بر روی یک لبه واقع بر یکی از پره‌های آن، آورده شده است.

جدول ۵: نتایج ۵ آزمایش برای موقعیت‌یابی پروانه قایق موتوری.

شماره آزمایش	خطا در امتداد محور (x) (mm)	خطا در امتداد محور (y) (mm)	خطا در امتداد محور (z) (mm)
۱	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۷۱
۲	۰/۴۲	۰/۳۶	۰/۸۹
۳	۰/۵۲	۰/۶	۱/۴۷
۴	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۶۷
۵	۰/۴۴	۰/۵	۱/۲۴

لازم به ذکر است که با توجه به هدف تحقیق (داده‌برداری از لبه و اندازه‌گیری)، از مواردی همچون هموار کردن^{۱۴} تصویر به علت اثر آن بر تصاویر (بلوری شدن) که منجر به کاهش جزئیات دقیق تصویر می‌شود، صرف نظر شده است [۱۷]. چرا که اطلاعات هر پیکسل با میانگین محلی پیکسل‌های مجاور آن عوض شده که خود عامل خطا در پیدا کردن گوشه یا لبه قطعه است.

۶ بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق بعد از پردازش تصاویر به دست آمده از دوربین راست و چپ، نقاط متناظر دو دوربین شناسایی و اطلاعات سه‌بعدی آن استخراج شده است. از این روش بیشتر برای تنظیم قطعات ریخته‌گری روی میز ماشین می‌توان استفاده کرد.

کاهش زمان موقعیت‌یابی قطعه‌کار یکی از مهم‌ترین دست‌آوردهایی بود که در این پژوهش به دست آمده است. اگرچه تنظیم و تهیه تصاویر نمونه اولیه ممکن است زمان‌بر باشد ولی با ذخیره اطلاعات و استفاده از آن برای قطعه مشابه، زمان مورد نیاز برای تنظیم به شدت کاهش می‌یابد.

میانگین خطا در یافتن موقعیت یکی از لبه‌های پره مورد آزمایش نسبت به لبه افقی (در امتداد محور x ماشین) عبارتند از ۰/۴۰۴ میلی‌متر در امتداد محور x، ۰/۴۴۴ میلی‌متر در امتداد محور y و بالاخره ۰/۹۹۶ میلی‌متر در امتداد محور z گزارش شد.

مبنا در نظر گرفته شده است) محاسبه می‌شود. زاویه‌ای که از روش ماشین بینایی به دست آمده همان پارامتر مدنظر برای تنظیم پروانه است. این روش علاوه بر کاهش زمان تنظیم قطعه، دقت ماشین‌کاری و ضریب اطمینان کار را افزایش داده است.

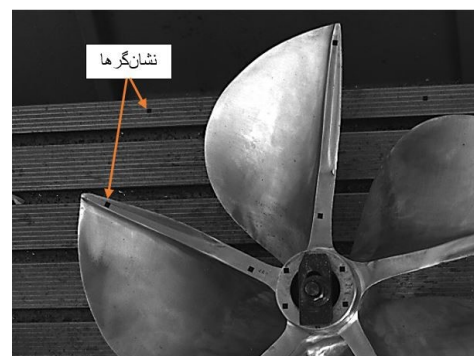
در ابتدا تنظیمات این قطعه به صورت دستی همراه با سعی و خطا انجام گرفته است. برای انجام تنظیمات آن به صورت دستی بعد از بستن قطعه - کار، برنامه ماشین‌کاری با یک افست مشخص از سطح پروانه اجرا شده و در چند مرحله مدل کد داخل نرم‌افزار چرخانده شده تا با مدل ماشین‌کاری که روی میز قرار گرفته، از نظر زاویه قرارگیری در یک راستا قرار بگیرد. به صورتی که بعد از اجرای برنامه ماشین‌کاری ابزار در موقعیت مدنظر قرار گرفته باشد. انجام کار به صورت سعی و خطا علاوه بر زمان‌بر بودن، سبب افزایش احتمال برخورد ابزار با سطح قطعه و میز وجود دارد که باعث ایجاد خسارت به ماشین و یا معیوب شدن قطعه کار می‌شود.

در جدول ۴، مدت زمان لازم و تعداد دفعات جابجایی مدل کد قطعه‌کار برای موقعیت‌یابی قطعه‌کار در طی ۵ آزمایش انجام شده قابل مشاهده است.

جدول ۴: نتایج ۵ آزمایش تجربی برای موقعیت‌یابی.

شماره آزمایش	مدت زمان موقعیت‌یابی (min)	تعداد دفعات سعی و خطا
۱	۴۱	۸
۲	۴۳	۱۰
۳	۳۶	۶
۴	۵۰	۱۳
۵	۲۸	۴

در مرحله بعد پارامترهای مورد نیاز جهت تنظیمات قطعه مورد نظر با استفاده از سیستم بینایی پیشنهادی نصب شده روی میز ماشین استخراج شده است. با استفاده از روش بینایی استریوی نصب شده روی میز ماشین زاویه قرارگیری پروانه نسبت به میز ماشین محاسبه شده و زاویه به دست آمده روی مدل کد اعمال شد. بعد از اجرای برنامه در ماشین (CNC) در یک مرحله، ابزار در موقعیت مورد نظر قرار گرفته است. در این پژوهش با هدف انجام صحیح تناظریابی بین تصاویر چپ و راست از نشان‌گرهایی مانند شکل ۱۳ روی سطح پره جهت داده‌برداری استفاده گردید. در شکل ۱۴ ویژگی‌های هندسی استخراج شده مورد نظر مانند لبه میز و لبه‌ای از یکی از تیغه‌های پره نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: استفاده از نشان‌گرها برای داده‌برداری از مناطق مورد نظر

¹⁴smoothing

- [11] Rolf, R. *Design and manufacture of casting models*. New Science Publishing Institute, 1997.
- [12] Raie, A. and Ghasemi, A. Use stereo images for mobile robot navigation. 2003.
- [13] Khalili, K., Abdulahian, H., and Emem, S. 3d model reconstruction based on stereo vision. 2008.
- [14] Rodriguez-Quinonez, J., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., and R. Rascon, Et Al. Improve a 3d distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods, approach. *Opto-Electronics Review*, 25:24-32, 2017.
- [15] Hosseininia, S. J., Khalili, K., and Emam, S. M. Modal analysis of wind turbine blade using machine vision. *Modares Mechanical Engineering*, 15:377-386, 2015.
- [16] Gai, Q. Optimazation of stereo matching in 3d reconstruction based on binocular vision. 2018.
- [17] Hornberg, A. *Handbook of Machine Vision*. Weinheim: Wiley-VCH, 2017.

لذا با توجه به جنس پره قایق موتوری مورد آزمایش (فولادی) و ابعاد آن (قطر خارجی ۴۸۰ میلیمتر) مقدار اضافه تراش مجاز برای سطوح رویی هر یک از پره‌ها طبق جدول استاندارد ۱، ۶ میلیمتر بوده که میزان خطای موقعیت‌یابی به دست آمده را قابل قبول می‌کند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی و تجهیزاتی دانشگاه بیرجند و همراهی شرکت قطعه‌سازی و مجموعه‌سازی کاویان شرق انجام شده است که بدین‌وسیله قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Eladawi, A., Gadelmawla, E., Elewa, I., and Abdel-Shafy, A. An application of computer vision for programming computer numerical control machines. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal Of Engineering Manufacture*, 217:1315-1324, 2003.
- [2] Haghghi, P., Ramnath, S., Kalish, N., Shah, J. V., Shah, J. J., and Davidson, J. K. Method for automating digital fixture-setups that are optimal for machining castings to minimize scrap. *Journal Of Manufacturing Systems*, 40:15-24, 2016.
- [3] Zhang, X., Tian, X., , and Yamazaki, K. On-machine 3d vision system for machining setup modeling. *he International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 48:251-265, 2010.
- [4] Okarma, K. and Grudzinski, M. The 3d scanning system for the machine vision based positioning of workpieces on the cnc machine tools. pp. 85-90, 2012.
- [5] Domek, S., Dworak, P., Grudzinski, M., and Okarma, K. Calibration of cameras and fringe pattern projectors in the vision system for positioning of workpieces on the cnc machines. *In Solid State Phenomena*, 199:229-234, 2013.
- [6] Paulic, M., Baliv, J., and Irgolic, T. Usage of machine vision for determination of workpiece origin. 2012.
- [7] Ahmad, R., Tichadou, S., and Hascoet, J.Y. Integration of vision based image processing for multi-axis cnc machine tool safe and efficient trajectory generation and collision avoidance. *Journal of Machine Engineering*, 10, 2010.
- [8] Dipanda, A., Woo, S., Marzani, F., and Bilbault, J.M. 3-d shape reconstruction in an active stereo vision system using genetic algorithm. *Pattern Recognition*, 3:2143-2159, 2003.
- [9] Jang, W., Je, C., Seo, Y., and Lee, S. W. Structured-light stereo: Comparative analysis and integration of structured-light and active stereo for measuring dynamic shape. *Optics and Lasers in Engineering*, 51:1255-1264, 2013.
- [10] Aguilar, J. J., Torres, F., and lope, M. A. Stereo vision for 3d measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications. *Measurment*, 18:193-200, 1996.