

Development of a Semi-Intelligent System for Automatic Measurement of Two-Dimensional Profiles of Parts Based on Machine Vision and edge detection algorithm

Arian Hosseini, Saeed Khodaygan^{*}, Hossein Soroush

Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: August 08, 2025
Revised: October 19, 2025
Accepted: October 26, 2025
ePublished: November 18, 2025

ABSTRACT

Dimensional metrology ensures that manufactured components meet precise dimensions, shapes, and geometric features. Automatic measurement of mechanical profiles faces challenges such as high costs and the need for skilled operators. In this study, a semi-intelligent automated measurement method based on machine vision was developed to reduce measurement time and minimize human error. Accordingly, a manual vision measurement system was retrofitted and automated. A two-stage algorithm was designed for this purpose. In the first stage, a side-mounted camera automatically detected and localized parts placed on the worktable without manual intervention. In the second step, a measurement path was generated to enable image measurement of the part profile. Next, the collected data from the previous step was reconstructed into a two-dimensional point cloud for dimensional analysis. A Windows-based graphical user interface (GUI) was developed to enhance the system's usability and overcome the limitations of the original device software. Standard gauges for length, angle, and thread dimensions were used to obtain the 2D profile and check the accuracy of the presented system. Furthermore, profile dimensional measurement of a standard ANSI 40A26 sprocket was carried out to explore the efficiency of the presented algorithm in actual working conditions. The developed system achieved an average measurement accuracy within 10 μm , with an average deviation of 15 μm compared to CMM-based measurements. However, the current system is limited to two-dimensional profile measurements of components. The results confirmed the system's measurement precision and demonstrated its potential as a cost-effective solution for dimensional inspection.

Keywords: Automatic Measurement, Machine Vision, Image Measurement, 2D Profile

How to cite this article

Hosseini A, Khodaygan S, Soroush H, Development of a Semi-Intelligent System for Automatic Measurement of Two-Dimensional Profiles of Parts Based on Machine Vision and edge detection algorithm. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(10):635-651.

*Corresponding author's email: khodaygan@sharif.edu

*Corresponding ORCID ID: 0000-0002-1937-2328



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



توسعه یک سیستم نیمه هوشمند برای اندازه‌گیری خودکار پروفیل دوبعدی قطعات مبتنی بر بینایی ماشین و الگوریتم تشخیص لبه

آرین حسینی، سعید خدایگان*^{ib}، حسین سروش

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

مسئله اندازه‌گیری ابعادی خودکار قطعات به دلیل نیاز به دستگاه‌های دقیق و پرهزینه، چالشی مهم در صنعت محسوب می‌شود. همچنین تخصص بالای اپراتور برای کار با این دستگاه‌ها ضروری است. در این پژوهش، یک روش خودکار نیمه‌هوشمند مبتنی بر بینایی ماشین با هدف کاهش زمان اندازه‌گیری و خطای انسانی برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات توسعه یافته است. بدین منظور، دستگاه اندازه‌گیری تصویری دستی به یک دستگاه خودکار تبدیل شده است. الگوریتم ارائه شده شامل دو مرحله است. در ابتدا به کمک دوربین جانبی، قطعات روی میز بدون دخالت دست شناسایی و موقعیت‌یابی شده‌اند. سپس، مسیر حرکتی و تصویربرداری جزئی ایجاد شده تا اندازه‌گیری تصویری قطعات انجام شده و ابرنقاط دوبعدی به دست آید. داده‌های به دست آمده از این مرحله برای انجام تحلیل‌های ابعادی استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور بهبود کاربرپسندی و رفع محدودیت‌های نرم‌افزار اصلی دستگاه، یک رابط گرافیکی مبتنی بر ویندوز نیز توسعه یافته است. در پایان، برای صحت‌سنجی روش ارائه شده، اندازه‌گیری پروفیل دو بعدی گیج‌های استاندارد طولی، زاویه‌ای و رزوه، و همچنین یک نمونه چرخ‌زنجیر استاندارد ANSI 40A26 در شرایط کاری واقعی انجام شد. سیستم توسعه‌یافته دقت اندازه‌گیری متوسط در محدوده ۱۰ میکرومتر را به دست آورد و میانگین اختلاف ۱۵ میکرومتر نسبت به اندازه‌گیری CMM داشت. با این حال، سیستم فعلی محدود به اندازه‌گیری پروفیل‌های دوبعدی قطعات است. نتایج حاصل دقت روش ارائه شده را تأیید نمود و کارایی آن را به عنوان یک راهکار مقرون به صرفه برای بازرسی ابعادی خودکار نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

کلیدواژه‌ها: اندازه‌گیری خودکار، بینایی ماشین، اندازه‌گیری تصویری، پروفیل دو بعدی

نحوه ارجاع به این مقاله

حسینی آرین، خدایگان سعید، سروش حسین، توسعه یک سیستم نیمه هوشمند برای اندازه‌گیری خودکار پروفیل دوبعدی قطعات مبتنی بر بینایی ماشین و الگوریتم تشخیص لبه، مهندسی مکانیک مدرس. ۷۰۱-۷۳۵: ۱۴۰۴؛ ۲۵(۱۰)

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: khodaygan@sharif.edu

*شناسه اراکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0002-1937-2328



۱- مقدمه

با گسترش ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری و پیشرفت نرم‌افزارهای طراحی و ساخت به کمک کامپیوتر، فرآیندهای طراحی، تولید و کنترل کیفیت محصولات مدرن دستخوش تغییرات چشمگیری شده‌اند. افزایش پیچیدگی عملکرد این محصولات و نیاز به رعایت دقت‌های ابعادی بالا، موجب شده است که روش‌های سنتی بازرسی ابعادی از نظر سرعت و دقت، به یک عامل محدودکننده در فرآیند تولید تبدیل شوند [۱، ۲]. برای رفع این محدودیت، تلاش‌های گسترده‌ای به منظور توسعه روش‌های خودکار برای دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات انجام شده است. با وجود این پیشرفت‌ها، اندازه‌گیری مختصات همچنان با مشکلاتی نظیر پیچیدگی در کاربرد و محدودیت در سرعت اندازه‌گیری روبه‌رو است. به همین دلیل، رویکردهای نوین کنترل کیفیت مبتنی بر بینایی ماشین به طور فزاینده‌ای جایگزین روش‌های سنتی شده‌اند [۳]. همچنین، دستگاه‌های اندازه‌گیری مختصات (CMM) به دلیل دقت و حساسیت بالا، نیازمند هزینه‌های قابل توجهی برای خرید و نگهداری هستند که این امر نیز یکی دیگر از چالش‌های موجود به شمار می‌آید [۴].

دستگاه‌های اندازه‌گیری پروفیل و ابعاد قطعات انواع مختلفی دارند. برای مثال، سیستم‌های اندازه‌گیری تماسی شامل ابزارهایی هستند که برای اندازه‌گیری ابعادی از تماس مستقیم با قطعه استفاده می‌کنند. دقیق‌ترین آن‌ها دستگاه اندازه‌گیری مختصاتی سه‌بعدی است که با سه محور مستقل و خطکش‌های دقیق، موقعیت را تعیین می‌کند اما فضای زیادی نیاز دارد و فرآیند اندازه‌گیری در آن زمان‌بر است [۵]. در مقابل، سیستم‌های اندازه‌گیری غیرتماسی بدون تماس مستقیم، داده‌های سطح قطعه را جمع‌آوری کرده و برای هندسه‌های پیچیده در صنایع مختلف مناسب‌تر هستند. نمونه‌هایی از آن شامل سیستم‌های تصویری، اسکنرهای لیزری و فتوگرامتری هستند. سیستم اندازه‌گیری تصویری (VMM) نیز از جمله روش‌های غیرتماسی است که برای بازرسی سریع و دقیق قطعات کوچک در حجم تولید بالا کاربرد دارد. علاوه بر موارد ذکر شده، از تکنیک پردازش تصویر نیز برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات استفاده می‌شود. پردازش تصویر دیجیتال که نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ استفاده شد، به سرعت به حوزه‌های گوناگون مانند پزشکی، نظامی، خودروهای خودران و باستان‌شناسی گسترش یافت [۶]. این فناوری با پیشرفت سخت‌افزارها، قابلیت پردازش سریع‌تر و دقیق‌تر تصاویر را فراهم ساخت. یکی از مراحل کلیدی پردازش تصویر، تشخیص لبه است که به‌عنوان گامی اولیه برای استخراج ویژگی‌ها به کار می‌رود. الگوریتم کنی، لبه‌ها را با ترکیبی از فیلترگذاری، گرادیان‌گیری، حذف نقاط غیرماکزیمم و آستانه‌گذاری هیستریزس شناسایی می‌کند [۷، ۸]. همچنین تفکیک تصویر نیز روشی برای تقسیم

تصویر به نواحی همگن به منظور ساده‌سازی تحلیل است که با تکنیک‌هایی مانند آستانه‌گذاری و خوشه‌بندی انجام می‌شود [۹]. در نهایت، تشخیص کانتور به شناسایی مرزهای اشیاء در تصاویر دودویی می‌پردازد. توابع مختلفی در زبان‌های برنامه‌نویسی این کانتورها را استخراج می‌کنند [۱۰]. تشخیص کانتور در عکس‌های دیجیتال اهمیت فراوانی داشته و به منظور پایش برخط خطوط تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

با گسترش مدل‌های مختلف یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در سالهای اخیر، استفاده از این روش‌ها برای حل مسائل مختلف مهندسی رشد چشمگیری را تجربه کرده است. برای مثال، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین برای پیش‌بینی شکست در قطعات مکانیکی، الکترونیکی و یا بهبود عمر محصولات صنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۲-۱۴]. در این بین، بینایی ماشین نیز به عنوان یکی از شاخه‌های پردازش تصویر و هوش مصنوعی، نقش مهمی در خودکارسازی فرآیندها و تقلید از دید و قضاوت انسان ایفا می‌کند. این فناوری با بهره‌گیری از دوربین‌ها و تحلیل تصاویر، امکان بازرسی سریع، مستمر و دقیق را فراهم کرده و در جهت تحقق اهداف اتوماسیون و صنعت نسل چهارم نقش کلیدی دارد. بینایی ماشین در خطوط تولید تصاویر یا ویدئوها را از محصولات در حین فرآیند ساخت دریافت و پردازش کرده و اطلاعات بصری مفیدی تولید می‌کند [۱۵]. این داده‌ها به تصمیم‌گیری سریع‌تر و بهینه‌تر در کنترل فرآیندها کمک می‌کنند. یکی از قابلیت‌های کلیدی بینایی ماشین، توانایی جمع‌آوری و پردازش حجم وسیعی از داده‌های تصویری است که می‌تواند برای شناسایی عیوب، تشخیص نقص‌های خط تولید، و عیب‌یابی سریع سیستم‌ها به کار رود [۱۶]. کاربردهای متنوع این فناوری شامل تشخیص موقعیت قطعات، شناسایی ترک‌ها و عیوب سطح، اندازه‌گیری حجم، بررسی کیفیت، جداسازی محصولات سالم از معیوب، و خواندن برچسب‌ها است. در صنایع داروسازی نیز از این سیستم برای بازرسی متون روی کپسول‌ها، شمارش و دسته‌بندی قرص‌ها، بررسی صحت بسته‌بندی و سطح مایعات استفاده می‌شود [۱۷، ۱۸].

با توجه به اهمیت ذکر شده برای علم بینایی ماشین و پردازش تصویر، پژوهش‌های زیادی در این حوزه به منظور اندازه‌گیری پروفیل و بازرسی قطعات مختلف انجام شده است. رویکرد کلی توسعه الگوریتم‌های مختلف پردازش تصویر مربوط به دو حوزه اندازه‌گیری قطعات با ابعاد و اندازه‌های مختلف و بهبود دقت روش‌های ارائه شده برای اندازه‌گیری است. در ابتدا، به معرفی پژوهش‌های شاخص انجام شده در زمینه بازرسی قطعات مختلف صنعتی با استفاده از پردازش تصویر پرداخته شده است. لو و همکاران [۱۹] سیستمی مبتنی بر آینه نیمه‌شفاف و نورپردازی هم‌محور طراحی کردند تا تغییر شکل مایعات در صفحات LCD طی فرآیند تولید ارزیابی شود. چوهان و سرچنر [۲۰] از فناوری بینایی ماشین برای پایش فرآیند مونتاژ اُ-رینگ بهره گرفتند و توانستند

بود. در پژوهش [۳۱] یک سیستم ۱۶ دوربینی برای اندازه‌گیری شعاع انحنای در لوله‌های سه‌بعدی توسعه داده شده است که با وضوح ۴/۶۵ میکرومتر بر پیکسل توانسته دقت اندازه‌گیری $\pm 0/5$ میلی‌متر را ارائه کند. گادلما [۳۲] سیستمی برای اندازه‌گیری خودکار رزوه پیچ‌ها با استفاده از دوربین CCD و میز نور پس‌زمینه مشابه دستگاه VMM معرفی کرد؛ این سیستم با وضوح ۵ میکرومتر بر پیکسل، اختلاف اندازه‌گیری $\pm 0/4$ میکرومتر نسبت به مقادیر استاندارد داشت. انگو و همکاران [۳۳] سیستمی شامل دو دوربین برای اندازه‌گیری قطر سوراخ‌ها ارائه کردند که با وضوح ۰/۱۹ میلی‌متر بر پیکسل، دقت $\pm 0/5$ میلی‌متر در اندازه‌گیری حاصل شد. تان [۳۴] نیز دستگاهی برخط برای اندازه‌گیری قطر شفت روی ماشین‌تراش ساخت که با نور لیزری خطی، در سرعت چرخش ۱۲۵۰ دور در دقیقه، خطای میانگین اندازه‌گیری برابر با ۰/۱۹ میلی‌متر را ارائه کرده است.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در توسعه سیستم‌های اندازه‌گیری غیرتماسی مبتنی بر بینایی ماشین، بسیاری از این سیستم‌ها محدود به اندازه‌گیری قطعات کوچک بوده و توانایی اندازه‌گیری خودکار قطعات بزرگ را ندارند. هرچند برخی سیستم‌های تصویری برای بازرسی قطعات بزرگ ارائه شده‌اند، اما این سیستم‌ها اغلب قیمت بسیار بالایی دارند و جایگزینی دستگاه موجود با مدل‌های اتوماتیک مستلزم صرف هزینه‌ای هنگفت خواهد بود. مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که عمده مطالعات در این حوزه بر اندازه‌گیری پارامترهایی همچون قطر، ضخامت، طول یا استخراج ویژگی‌های هندسی بر اساس داده‌های اولیه متمرکز بوده‌اند. در موارد محدودی نیز روش‌هایی برای اندازه‌گیری اجسام بزرگ پیشنهاد شده است، اما همچنان مشکل دقت پایین به دلیل تصویربرداری کامل از جسم در وضوح پایین، چالشی جدی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، سیستم موجود در آزمایشگاه امکان تصویربرداری یکپارچه و دقیق از کل قطعه را فراهم نمی‌کند و برای تحقق فرآیند اندازه‌گیری خودکار، نیاز به پروتکلی وجود دارد که بدون دخالت کاربر، کل قطعه را پوشش دهد. در پاسخ به این نیازها، پژوهش حاضر با هدف ارتقای دستگاه VMM دستی به یک سامانه خودکار مقرون به صرفه طراحی شده است که شکاف میان ابزارهای دستی و سیستم‌های پرهزینه CMM را با یک سامانه نیمه‌هوشمند و مقرون به صرفه پر می‌کند و اندازه‌گیری پروفیل قطعات دو بعدی را با دقت مناسبی انجام می‌دهد. این پژوهش شامل بازطراحی سخت‌افزار، توسعه پروتکل تشخیص موقعیت خودکار قطعات، الگوریتم بازسازی دوبعدی تصویر به منظور اندازه‌گیری قطعات بزرگ، و طراحی نرم‌افزار جامع اندازه‌گیری است. این رویکرد با ترکیب اتوماسیون و بینایی ماشین، امکان اندازه‌گیری دقیق، سریع و اقتصادی قطعات بزرگ را فراهم می‌کند.

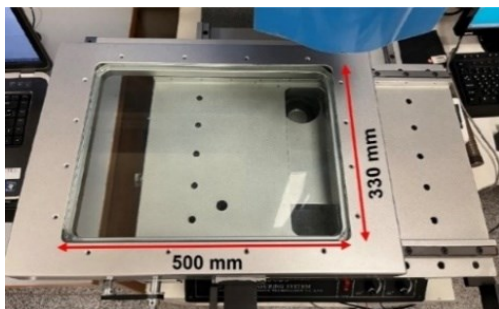
قطر و اشرفا را دسته‌بندی و عیوب را در حین اسمبل شناسایی کنند. در پژوهشی دیگر، مولدا و همکاران [۲۱] روشی برای اندازه‌گیری پروفیل اشیاء معرفی کردند که در آن از لیزر عمق‌سنج برای تسریع اتصال کانتور قطعه‌ها استفاده شد و این روش در بازرسی پروفیل مقطع ریل راه‌آهن به کار رفت. نتایج حاصل نشان داده است روش ارائه شده دقت بسیار مناسبی برای تشخیص عیوب موجود در ریل‌های بررسی شده ارائه کرده است. در ادامه، مولدا [۲۲] پروتکلی پیشنهاد داد که در صورت کاهش دقت اندازه‌گیری، هشدار صادر کند و کاربر را ملزم به تنظیم مجدد سیستم نماید. در پژوهش [۲۳] مدل کالیبراسیونی برای اندازه‌گیری ریل‌ها ارائه شده است که دقت اندازه‌گیری را تا خطای کمتر از ۰/۱۲٪ بهبود داده است. مطابق نتایج پژوهش [۲۴] سامانه‌ی پردازش تصویر برای بازرسی یاتاقان‌ها معرفی شده است که با الگوریتم‌های هاف و رگرسیون خطی، وضعیت خارج از مرکز بودن پوسته یاتاقان را پایش می‌کند. بررسی پایش یاتاقان‌های تولیدی در این تحقیق با استفاده از دوربینی که بر روی خط تولید نصب شده انجام پذیرفته است. ژیانگ و همکاران [۲۵] با استفاده از دو دوربین و الگوریتم کالیبره‌شده، فاصله بین گیره‌های لنت ترمز را اندازه‌گیری کردند. گادلما [۲۶] سیستمی توسعه داد که با پردازش تصویر (دودویی‌سازی، تشخیص و نازک‌سازی لبه‌ها، برچسب‌گذاری) پارامترهایی مانند قطر خارجی، قطر ریشه و تعداد دندان چرخ‌دنده‌ها را محاسبه می‌کرد. در پژوهش مورد نظر، چرخ‌دنده بر روی یک اسپیندل چرخان نصب شده و نقاط مختلف آن توسط یک ربات شش درجه آزادی که در انتهای آن یک دوربین و سنسور نصب شده است بازرسی می‌شود. مورو و بورو [۲۷] از لنزهای زوم معکوس برای اندازه‌گیری چرخ‌دنده‌های کوچک‌تر از ۷۰ میلی‌متر استفاده کردند و خطای اندازه‌گیری را به ۰/۰۲ میلی‌متر کاهش دادند. همچنین، یی و سو [۲۸] سامانه‌ای برای بازرسی عیوب مونتاژ یاتاقان‌های یک‌طرفه خودروها توسعه دادند که قادر بود در حالت برخط و بدون خط، تعداد خرابی و خطاهای مونتاژ را شناسایی کند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، شناسایی خطاهای مونتاژ بدون دخالت اپراتور توانسته است سرعت و دقت تولید را افزایش دهد.

در این قسمت، پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی بهبود دقت روش‌های پردازش تصویر بررسی شده‌اند. دقت سیستم‌های بازرسی مبتنی بر بینایی ماشین به طور مستقیم تحت تأثیر ویژگی‌های دوربین است. هرچه وضوح دوربین بالاتر باشد، تراکم پیکسلی تصویر افزایش یافته و در نتیجه دقت اندازه‌گیری بهبود می‌یابد. پنگ و همکاران [۲۹] الگوریتمی برای اندازه‌گیری قطر و ضخامت اُ-رینگ فلزی طراحی کردند و با دوربینی به وضوح ۴ میکرومتر بر پیکسل، و تلورانس $\pm 0/1$ میلی‌متر در اندازه‌گیری اُ-رینگ ۳ میلی‌متری، دقتی نزدیک به ۱۰۰٪ به دست آوردند. رج و همکاران [۳۰] نیز روشی برای بازرسی بصری خودکار محافظ‌های مکانیکی ارائه کردند که قادر به تشخیص لبه‌ها با تلورانس $\pm 0/02$ میلی‌متر

۲- روش تحقیق

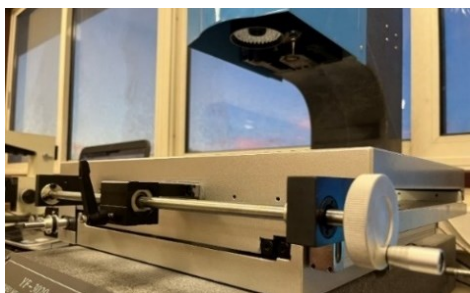
بال اسکرو و شفت‌ها انجام می‌شود و با چرخش اهرم انتهایی شفت، میز در جهت دلخواه جابه‌جا می‌گردد. بخش میانی میز نیز شیشه‌ای است تا امکان اندازه‌گیری دقیق پروفیل قطعات، به ویژه رزوه‌ها، با تابیدن نور از قسمت زیرین دستگاه فراهم شود. سیستم مربوط به حرکت خطی دستگاه نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. روی هر محور سنسور جابجایی خطی نصب شده است که موقعیت میز را کنترل می‌کند.

علاوه بر این، ارتفاع قطعاتی که اندازه‌گیری می‌شوند یکسان نیست و دوربین دستگاه دارای فاصله کانونی ثابت است. برای فوکوس کردن بر روی سطح مدنظر و دریافت تصویر در بهترین نقطه نیاز است تا دوربین در راستای محور Z جابجا شود، از این رو دوربین و لنز بر روی محور Z ثابت شده‌اند و با حرکت بال اسکرو به وسیله موتور این امکان فراهم شده است. در شکل ۴ محور Z دستگاه قابل مشاهده است.



شکل ۲ میزکار دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی مورد مطالعه

Fig. 2 Worktable of the video measuring system under study



شکل ۳ سیستم حرکت خطی دستگاه مورد مطالعه

Fig. 3 Linear motion system of the device under study

در این پژوهش، هدف ارتقای یک دستگاه اندازه‌گیری تصویری دستی مدل YF3020 از شرکت CIMTRIX به یک سامانه نیمه‌هوشمند خودکار با تکیه بر الگوریتم‌های پردازش تصویر است. این فرآیند شامل طراحی سخت‌افزار جدید، توسعه نرم‌افزار و تدوین الگوریتم‌هایی جهت شناسایی، ردیابی و اندازه‌گیری دقیق پروفیل قطعات صنعتی است. ساختار کلی روش تحقیق به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: اضافه کردن تجهیزات سخت‌افزاری به دستگاه جهت هوشمند سازی اندازه‌گیری پروفیل قطعات و توسعه الگوریتم‌های پردازش تصویر به منظور اندازه‌گیری خودکار. در ادامه‌ی این قسمت، موارد ذکر شده توضیح داده خواهند شد و مراحل تبدیل دستگاه اندازه‌گیری دستی به دستگاه نیمه اتوماتیک با جزئیات شرح داده خواهد شد.

۲-۱- معرفی دستگاه

دستگاه VMM مدل YF3020 یک سامانه دستی اندازه‌گیری دوبعدی مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصویر است. این دستگاه در دسته تجهیزات اندازه‌گیری الکترواپتیکی (الکتریکی-نوری) قرار می‌گیرد و به‌عنوان ابزاری بسیار کارآمد برای اندازه‌گیری دقیق و سریع پروفیل قطعاتی به‌کار می‌رود که خارج از محدوده توانایی سایه‌نگارهای دوبعدی هستند. اجزای اصلی این دستگاه شامل دوربین رنگی CCD با قدرت تفکیک بالا، لنزهای بزرگنمایی پیوسته، صفحه نمایش رنگی، مولد نشانگر ویدیویی، مقیاس خطی دقیق (خطکش دیجیتال)، صفحه نمایش تصویر، نرم‌افزار اندازه‌گیری دوبعدی، و میزکار دقیق دوبعدی می‌باشد. شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری مورد نظر را نشان می‌دهد.



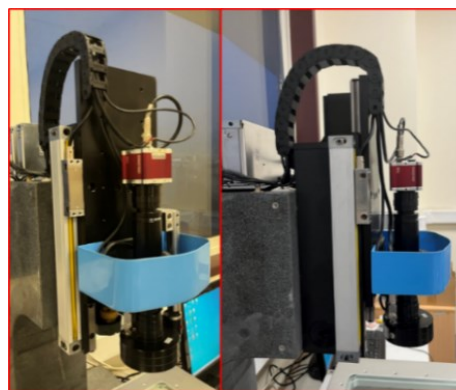
شکل ۱ دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی شرکت CIMTRIX مدل YF3020

Fig. 1 CIMTRIX Video Measuring Machine, Model YF3020

دستگاه VMM مدل YF3020 دارای میز کاری دستی به ابعاد ۳۳۰×۵۰۰ میلی‌متر در راستای محورهای X و Y است. شکل ۲ میزکار دستگاه را نشان می‌دهد. حرکت خطی هر محور به وسیله

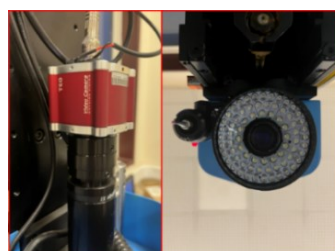
قدرت انجام شده و از حالت دستی خارج شده است. بدین منظور، دو استپر موتور که حرکت میز کار دستگاه را در راستای محورهای X و Y فراهم میکنند به کمک تجهیزات جانبی از جمله تسمه و پولی به دستگاه اضافه شده‌اند. در گام دوم، موتورهای محرک به سیستم رایانه متصل شده‌اند تا امکان حرکت آنها به صورت اتوماتیک فراهم شود. پس از آن، با استفاده از سنسورهای توقف مناسب، محدوده کاری میز مشخص شده است تا از حرکات اضافی دستگاه جلوگیری شود. در پایان نیز سیستم تشخیص موقعیت قطعات بر روی میز کار به دستگاه اضافه شده است. در ادامه، هر یک از مراحل به تفکیک و با جزئیات توضیح داده شده‌اند.

با توجه به نیاز به گشتاور بالا و عدم نیاز به فیدبک موقعیت، استپر موتور گزینه‌ای مناسب برای استفاده به عنوان موتور دستگاه به منظور خودکارسازی فرآیند اندازه‌گیری است. مشخصات موتور استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است. برای نصب، از براکت نگه‌دارنده استفاده شده و نحوه اتصال موتور به دستگاه برای محورهای X و Y در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است. حرکت دورانی موتور باید به شفت محورهای میز منتقل شود. دقت حرکتی مورد نظر ۰/۰۱ میلی‌متر است. موتور دارای گام ۱/۸ درجه بوده و رزولوشن حرکتی میز ۰/۳۶ میلی‌متر بر دور می‌باشد. بنابراین نسبت انتقال یک به یک کافی است. همچنین به منظور جلوگیری از انتقال ارتعاش و با توجه به نیروی اندک مورد نیاز، از سیستم پولی و تسمه تایم استفاده شده است که مزایایی مانند کاهش هزینه، دämpfung ارتعاش و جلوگیری از آسیب در شرایط بحرانی را دارد. علاوه بر این، به منظور کنترل بهتر ارتعاش ناشی از حرکت موتورها دو روش مجزا به کار گرفته شده است. در ابتدا از جداسازی فیزیکی و میراگر استفاده شده است. بر این اساس، سازه دستگاه به گونه‌ای طراحی شده که موتورها بر روی پایه‌های مجهز به واشرهای ضد لرزه (Vibration Damping Pads) نصب شده‌اند. همچنین، مجموعه دوربین و نورپردازی بر روی یک سکوی مستقل و سنگین قرار گرفته تا اثر ارتعاشات منتقل شده به حداقل برسد. در روش دوم نیز استراتژی اندازه‌گیری ابعاد و پروفیل قطعات با توجه به فعالیت استپر موتورها تنظیم شده است. در این حالت، اندازه‌گیری تنها پس از توقف کامل موتورها و گذشت یک تاخیر زمانی کوتاه (حدود ۵۰۰ میلی ثانیه) برای میرا شدن هر گونه لرزش باقیمانده آغاز می‌شود. انحراف معیار خطا (σ) میکرومتر ناشی از نتایج آزمایشهای تکرار شده ثبات نتایج اندازه‌گیری‌ها را تایید میکند و نشان می‌دهد ارتعاشات دستگاه عامل خطای قابل توجهی نیست.



شکل ۴ محور Z دستگاه اندازه‌گیری تصویری به همراه لنز و دوربین متصل به آن به منظور تنظیم ارتفاع جهت عکس‌برداری
Fig. 4 Z-axis of the video measuring system with the attached lens and camera used for height adjustment during image capturing

برای اندازه‌گیری قطعات در این دستگاه از دوربین استفاده می‌شود. نکته مهم در اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر، کالیبراسیون نرم‌افزاری دوربین (تنظیم دقیق نسبت میلی‌متر به پیکسل) است. دوربین به کار رفته دارای سنسور CCD به ابعاد ۶ میلی‌متر است. لنز آن امکان بزرگ‌نمایی ۳۰ تا ۱۹۰ برابر را در شش مرحله فراهم می‌کند. لنز دوربین مورد استفاده نیز از نوع تله‌سنتریک بوده که حداقل بزرگ‌نمایی آن ۰/۷ و حداکثر بزرگ‌نمایی آن ۴/۵ می‌باشد. لنز و دوربین استفاده شده در این پژوهش برای هوشمندسازی دستگاه اندازه‌گیری پروفیل از برند Teo بوده است. همچنین حلقه‌ای از LED در انتهای لنز نصب شده که با روشن کردن محل اندازه‌گیری، از ایجاد سایه جلوگیری می‌کند. نرخ تصویربرداری دوربین ۳۰ فریم بر ثانیه می‌باشد. شکل ۵ مجموعه لنز و دوربین دستگاه اندازه‌گیری تصویری مورد مطالعه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، در کنار دوربین دستگاه YF3020 محلی تعبیه شده است که امکان نصب پروب اندازه‌گیری را به کاربر می‌دهد. پروبی که بر روی دستگاه نصب شده از برند RENISHAW مدل MCP است که برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات استفاده می‌شود.

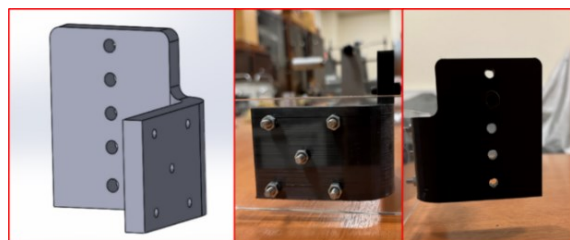


شکل ۵ لنز و دوربین دستگاه اندازه‌گیری تصویری YF3020
Fig. 5 Lens and camera of the YF3020 video measuring system

۲-۲- خودکار سازی دستگاه

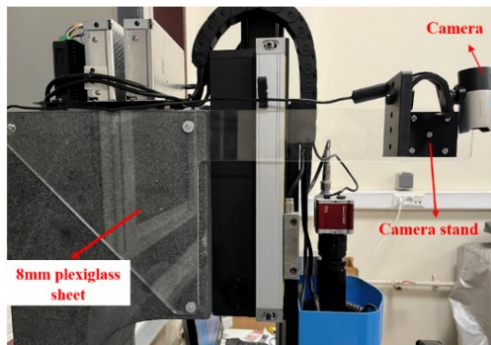
به منظور خودکار سازی دستگاه مورد نظر لازم است برخی تغییرات انجام شود و در طراحی برخی قسمت‌های دستگاه بازنگری صورت گیرد. در ابتدا حرکت خطی دستگاه به کمک موتور و سیستم انتقال

موتور بر روی میزکار حل شد. علاوه بر این، در مدل‌های خودکار، موقعیتیابی قطعه به وسیله اسکنر لیزری انجام می‌شود که با وجود کاهش زمان اندازه‌گیری، بسیار گران‌قیمت و کمیاب است. به عنوان جایگزین، استفاده از دوربین و پردازش تصویر با کمک کتابخانه‌های متن‌باز مانند OpenCV پیشنهاد شده است. انتخاب دوربین مناسب با میدان دید کافی برای پوشش کل میزکار اهمیت دارد. بر همین اساس، یک دوربین Microsoft LifeCam Studio انتخاب شده و پایه‌ای دو بخشی برای نصب آن طراحی گردید. بخش اول از پلکسی ۸ میلی‌متری متصل به بدنه دستگاه و بخش دوم از PLA با قابلیت تنظیم ارتفاع. شکل‌های ۸ و ۹ نحوه اتصال دوربین و پایه آن را به دستگاه VMM نشان می‌دهند.



شکل ۸ پایه پلاستیکی طراحی شده به منظور اتصال دوربین به بدنه دستگاه

Fig. 8 Designed plastic mount for attaching the camera to the device body



شکل ۹ مجموعه اسمبلی دوربین و پایه بر روی دستگاه اندازه‌گیری

Fig. 9 Camera and mount assembly on the measuring device

۲-۳- توسعه الگوریتم موقعیتیابی قطعات

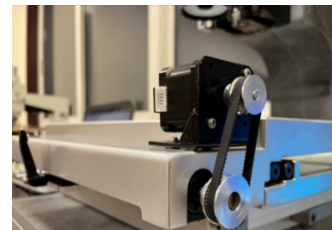
با توجه به محدودیت دستگاه در اندازه‌گیری عمق، فرآیند خودکارسازی محدود به سطوح دو بعدی می‌باشد، به این معنی که دستگاه صرفاً پروفیل‌هایی دو بعدی از قطعات را اندازه‌گیری مینماید. از این رو، نحوه قرارگیری قطعه بر روی میز کار باید به صورتی باشد که پروفیلی ۲ بعدی از قطعه به موازات صفحه میز کار قرار داشته باشد. شایان ذکر است که توسعه الگوریتم از حالت دو بعدی به سه بعدی نیز امکانپذیر است که مستلزم غلبه بر چالش‌های گوناگونی است. بدین منظور، برای اندازه‌گیری پروفیل

جدول ۱ مشخصات استپرموتور استفاده شده برای موتور دستگاه

اندازه‌گیری

Table 1 Specifications of the stepper motor used in the measuring system

Weight (grams)	Dimensions (mm)	Pitch angle (degree)	Model
320	42 × 40 × 40	1.8	BYGH4042



شکل ۶ نحوه اتصال استپرموتور بر روی محور X

Fig. 6 Stepper motor mounting configuration on the X-axis



شکل ۷ نحوه اتصال استپرموتور بر روی محور Y

Fig. 7 Stepper motor mounting configuration on the Y-axis

برای کنترل کردن موتورها، از ماژول RAMPS استفاده شده است که با ارائه ورودی‌های لازم، امکان کنترل میزکار را فراهم می‌کند. این ماژول نیازمند اتصال به برد آردینو مگا است. مزیت آن، قابلیت اتصال ماژول‌هایی مانند سویچ‌ها، سنسور دما و نمایشگر است. برای کنترل استپر موتورها، به درایور موتور نیاز است که روی RAMPS نصب می‌شود. در این پژوهش، از درایور DRV8825 استفاده شده که با پشتیبانی از ریزگام ۱/۱۲۸ دقت بالایی را فراهم می‌کند. یکی از ماژول‌هایی که قابلیت نصب روی برد RAMPS را دارد، سوئیچ‌های توقف است. این سوئیچ‌ها از طریق سیم به RAMPS متصل شده و در انتهای محورهای میزکار نصب شده‌اند. هنگام برخورد میزکار با این سوئیچ‌ها، دستگاه تشخیص می‌دهد که به حد نهایی حرکت خود رسیده و از فعالیت بیشتر موتور جلوگیری می‌کند. کاربرد اصلی این سوئیچ‌ها تعیین نقطه صفر و موقعیت مرجع میزکار است. در مواردی که محدوده حرکتی مشخص نباشد، می‌توان با نصب دو سوئیچ در ابتدا و انتهای میز، بازه حرکت را تعیین کرد. همان‌طور که اشاره شد، تفاوت‌های مهمی میان دستگاه‌های VMM دستی و خودکار وجود دارد. نخست، در دستگاه‌های دستی امکان اندازه‌گیری خودکار، یعنی حرکت میزکار و ثبت نقاط بدون دخالت اپراتور، فراهم نیست؛ این مشکل با نصب

تنظیمات در هر دو حالت قابل استفاده بوده و هدف آن‌ها بهینه‌سازی مسیر حرکتی دستگاه در فرآیند اندازه‌گیری است. مرحله‌ی بعد الگوریتم، تشخیص صفحه مرجع و کالیبراسیون ابعادی است. در این سیستم، صفحه‌ای مشکی رنگ به‌عنوان مرجع تصویری برای تشخیص قطعات مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، نرم‌افزار تنها کانتورهایی را که داخل این صفحه باشند پردازش می‌کند. یکی از گزینه‌های کلیدی نرم‌افزار در بخش انتخاب قطعه، کالیبراسیون است. از آنجا که تصاویر ماهیت پیکسلی دارند و فاقد مقیاس واقعی‌اند، نیاز است نسبت اندازه واقعی به پیکسل تعریف شود تا اندازه‌گیری‌ها قابل اتکا باشند. با انتخاب این گزینه، کاربر باید عکسی از قطعه‌ی مرجع بارگذاری کرده، دو نقطه از تصویر را مشخص و فاصله واقعی آن‌ها (مثلاً ۱۰۰ میلی‌متر) را وارد کند تا سیستم براساس آن کالیبره شود. لازم به ذکر است اندازه‌گیری فاصله‌ی دو نقطه از قطعه که توسط کاربر به منظور کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری انجام می‌شود ممکن است دقت بالایی نداشته باشد و موجب بروز خطا در اندازه‌گیری پروفیل قطعات شود. بدین منظور، برای کالیبراسیون از چند گیج بلوکی با خطای بسیار ناچیز ± 10 میکرو متر یا ۰/۰۱ درجه به عنوان مرجع اندازه‌گیری طولی و زاویه‌ای استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. با استفاده از گیج‌های استاندارد طولی و زاویه‌ای، خطای کالیبراسیون بسیار نزدیک به صفر خواهد بود.

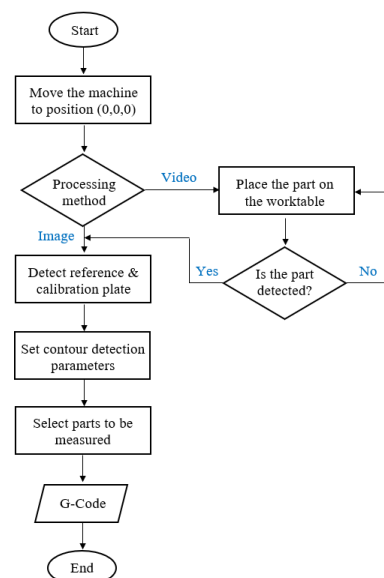
جدول ۲ گیج‌های استاندارد طولی و زاویه‌ای استفاده شده برای کالیبراسیون دستگاه

Table 2 Standard length and angle gauges employed for the calibration of the device

Gauge name	Reference length or angle	Error
100 mm gauge block	100.00	10 μm
30 mm gauge block	30.00	10 μm
30, 60, and 90 angle gauge	30.00° – 60.00° – 90.00°	0.01 deg

در گام بعد، تعیین پارامترهای تشخیص کانتور باید انجام شود. برای تشخیص قطعات داخل صفحه مرجع، از دستور تشخیص کانتور کتابخانه OpenCV استفاده می‌شود. کانتور، منحنی‌ای است که نقاط با شدت یا رنگ یکسان را به هم متصل می‌کند. ورودی این دستور باید دودویی باشد، بنابراین عکس باید پیش پردازش شود. ترجیح داده شده است که ورودی عکس به صورت لبه‌های کنی باشد که پیکسل‌های سفید را در پس‌زمینه سیاه پیدا می‌کند. تنظیمات تشخیص کانتور شامل حد بالا و پایین تابع تشخیص لبه کنی، نحوه‌ی تشخیص کانتورها، و نوع فیلتر عکس است. این کانتورها به طور دقیق برای تعیین مسیر حرکت میزکار استفاده می‌شوند، هرچند دقت بالا در آن‌ها مدنظر نیست. با تنظیم صحیح پارامترهای تشخیص کانتور، قطعات موجود روی میزکار برای کاربر نمایش داده می‌شود. به منظور بهینه‌سازی مسیر حرکتی دوربین

سه بعدی قطعات لازم است حداقل یک دوربین دیگر برای استخراج اطلاعات عمق اضافه شود و یا درجه آزادی دوربین موجود جهت حرکت در مختصات کروی نسبت به قطعه تغییر کند. علاوه بر این، در صورت استفاده از بیش از یک دوربین، کالیبراسیون دقیق نسبت مکانی دو دوربین نسبت به هم (کالیبراسیون استریو) بسیار پیچیده تر از کالیبراسیون تک دوربین است. همچنین، به الگوریتم‌های پیچیده تری برای تطابق برجستگی (Stereo Matching) و بازسازی سه بعدی نیاز است. نکته مهم دیگر این است که در صورت اضافه شدن دوربین، حجم داده‌ها و محاسبات به طور نمایی افزایش می‌یابد که سیستم به پردازنده های بسیار قدرتمند تری نیاز خواهد داشت. شکل ۱۰ فلو چارت الگوریتم طراحی شده برای موقعیت یابی قطعات را با استفاده از دوربین به کار گرفته شده نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ فلوچارت الگوریتم ارائه شده برای موقعیت‌یابی قطعات

Fig. 10 Flowchart of the proposed algorithm for part localization

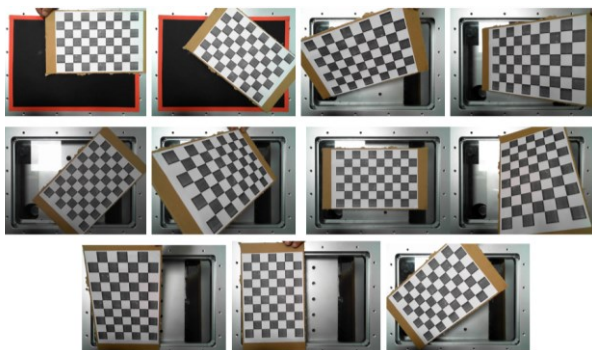
برای آغاز فرآیند موقعیت‌یابی قطعات، لازم است تصویری از میزکار به عنوان ورودی به نرم‌افزار ارائه شود. پس از قرارگیری دستگاه در موقعیت مبنا (۰، ۰، ۰)، کاربر یکی از دو گزینه‌ی «بارگذاری عکس» یا «پردازش ویدیو» را انتخاب می‌نماید. در صورت انتخاب پردازش ویدیو، نمای زنده‌ای از میزکار در اختیار کاربر قرار می‌گیرد تا از طریق آن، موقعیت دقیق قطعات بررسی شود. کاربر می‌تواند در لحظه از صحت تشخیص کانتور قطعات اطمینان حاصل کرده و با ثبت تصویر، ادامه‌ی فرآیند اندازه‌گیری خودکار را فعال نماید. در حالت بارگذاری عکس، کاربر باید تصویری ذخیره‌شده را انتخاب کند. سپس، صفحه‌ای ظاهر می‌شود که شامل گزینه‌هایی برای تنظیم پارامترهای استخراج کانتور و تشخیص پروفیل قطعه است. این

صفحه شطرنجی تهیه شده و با عکسبرداری از آن در زوایا و ارتفاع های مختلف مطابق شکل ۱۱، ضرایب اعوجاج و ماتریس دوربین مطابق رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه شده تا جبران خطا به صورت نرم‌افزاری انجام شود.

$$DC = [-0.0123, 0.1061, 0.0014, 0.008, -0.07119] \quad (۷)$$

$$\text{Camera Matrix} = \begin{bmatrix} 645.75 & 0 & 313.58 \\ 0 & 645.84 & 245.22 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

علاوه بر این، از گنج بلوکی با دقت ۱ میکرو متر برای کالیبراسیون استفاده شده است. دقت کالیبراسیون نیز بر اساس پارامتر RSME برابر با ۳/۲ میکرو متر به دست آمده است. همچنین با توجه به اینکه زوم دوربین در شش مرحله انجام میشود، برای هر سطح زوم، کالیبراسیون مجدد انجام شده تا مدل سوراخ سوزنی (pinhole) برای دوربین مورد نظر حاصل گردد. توجه به شرایط نور در هنگام اندازه‌گیری پروفیل قطعات و نویزهای محیطی از دیگر عوامل تاثیرگذار در عملکرد مطلوب دستگاه اندازه‌گیری توسعه داده شده هستند. برای حذف تاثیر چنین عواملی در فرآیند بازسازی پروفیل قطعات تمهیدات گوناگونی لحاظ شده است. در ابتدا دستگاه در یک محفظه قرار داده شده است تا تاثیر نور محیط کنترل و حذف شود. همچنین، از نورپردازی حلقه‌ای LED (Ring Light) با روشنایی ثابت و قابل تنظیم از طریق نرم‌افزار استفاده شده است. این امر تضمین می‌کند که شرایط نوردهی در تمام آزمایش‌ها یکسان و تکرار پذیر باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، از فیلترهای میان‌گذر گوسی برای حذف نویز و از آستانه‌گذاری تطبیقی (Adaptive Thresholding) برای تطابق با تغییرات جزئی کنتراست استفاده شده است.



شکل ۱۱ تصاویر صفحه شطرنجی استفاده شده در جهت‌ها و ارتفاع های مختلف به منظور کالیبراسیون دوربین

Fig. 11 Images of the chessboard used for camera calibration at different orientations and heights

تشخیص لبه‌ی قطعات، از فیلترهای گوسین، Canny و Sobel استفاده شده است. علاوه بر این، توجه به خطای اعوجاج لنز در اندازه‌گیری تصویری نکته بسیار مهمی است. در سیستم توسعه داده شده، خطای اعوجاج لنز به طور کامل در نظر گرفته شده است. در کد نرم افزاری از مدل ریاضی براون - کنراد (Brown-Conrady model) برای مدل سازی و جبران خطای ناشی از اعوجاج لنز استفاده شده است. بطوریکه اندازه‌گیری یک قطعه در گوشه‌ی تصویر پس از تصحیح، دارای خطای مشابهی با اندازه‌گیری در مرکز تصویر خواهد بود. بر همین اساس، کالیبراسیون دوربین برای از بین بردن پدیده‌های اعوجاج شعاعی و مماسی با استفاده از یک صفحه شطرنجی انجام شده است. مدل سازی ریاضیاتی این دو خطا (اعوجاج شعاعی و مماسی دوربین) مطابق رابطه‌های ۱ تا ۴ میباشد. روابط ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر مختصات x و y دارای اعوجاج شعاعی میباشند. به طور مشابه، روابط ۳ و ۴ نیز بیانگر مختصات x و y دارای اعوجاج مماسی میباشند.

$$x_{\text{distorted}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (۱)$$

$$y_{\text{distorted}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (۲)$$

$$x_{\text{distorted}} = x + [2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (۳)$$

$$y_{\text{distorted}} = y + [2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2)] \quad (۴)$$

در روابط بالا، k_1, k_2, k_3 و p_1, p_2 ضرایب اعوجاج (DC) هستند که مطابق با رابطه زیر بیان می‌شوند:

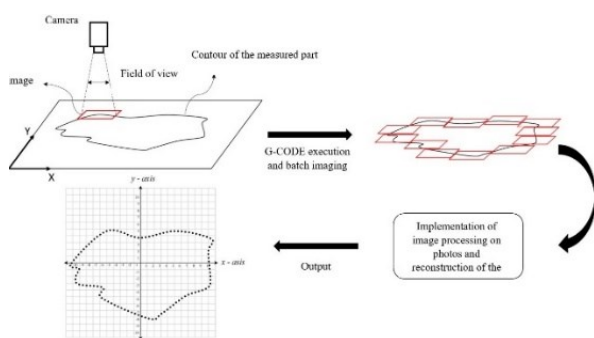
$$\text{Distortion Coefficients (DC)} = [k_1, k_2, p_1, p_2, k_3] \quad (۵)$$

هر دوربین مشخصه‌هایی ذاتی شامل f_x, f_y که فاصله‌های کانونی و c_x, c_y که مراکز اپتیکال هستند دارد که مطابق رابطه ۶ در قالب ماتریسی معرفی می‌شوند. در کتابخانه‌ی OpenCV دستوراتی فراهم شده است تا بتوان با استفاده از یک صفحه‌ی کالیبراسیون شطرنجی که ابعاد آن مشخص است، ضرایب اعوجاج و ماتریس مشخصه‌های ذاتی دوربین را محاسبه نمود و خطای اعوجاج را جبران کرد.

$$\text{Camera Matrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

قبل از استفاده از دوربین، بایستی محاسبات مربوطه برای کالیبراسیون ضرایب ذاتی صورت گیرد. برای اصلاح این خطا یک

کنار یکدیگر بازسازی می‌شوند. در پایان نیز یک ابرنقاط دقیق از قطعه تشکیل می‌گردد که شامل اطلاعات کامل ابعادی است. یکی از نکات مهم هنگام بازسازی دو بعدی پروفیل قطعات، اطمینان از موازی بودن سطح سنسور دوربین با سطح صفحه ای که قطعه روی آن قرار دارد است. بنابراین، وارد کردن یک نسبت ساده مانند اندازه‌گیری دو نقطه از قطعه برای جبران پرسپکتیو (عدم توازی سطوح) کافی نیست. راه‌حل این مسئله استفاده از ماتریس هوموگرافی (Homograph) است. ماتریس هوموگرافی یک تبدیل پرسپکتیو است که دقیقاً مسئله عدم موازی بودن صفحه سنسور دوربین و صفحه قطعه را حل می‌کند. این ماتریس با استفاده از حداقل ۴ نقطه متناظر (در کالیبراسیون با گنج‌های بلوکی) محاسبه می‌شود و هر نقطه از صفحه قطعه را به طور دقیق به مختصات دنیای واقعی نگاشت می‌دهد. بنابراین، نیازی به وارد کردن دستی زوایا توسط کاربر نیست و سیستم به طور خودکار این محاسبات را انجام می‌دهد. شکل ۱۳ الگوریتم طراحی شده برای بازسازی پروفیل قطعات را به صورت دو بعدی نشان می‌دهد.

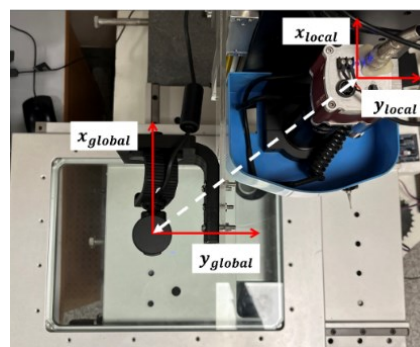


شکل ۱۳ توضیح شماتیک الگوریتم عکسبرداری جزئی از کانتور قطعه

Fig. 13 Schematic illustration of the partial contour imaging algorithm

دوربین محلی دارای فوکوس ثابت است و برای دستیابی به بهترین وضوح، محور Z باید قبل از شروع اندازه‌گیری روی قطعه تنظیم شود. در این فرآیند، محور Z از بالاترین موقعیت خود به تدریج پایین می‌آید و در هر نقطه، مقدار "امتیاز فوکوس" تصویر محاسبه شده است. با رسیدن به اولین نقطه‌ی ماکزیمم این امتیاز و کاهش آن، موقعیت مناسب فوکوس تعیین شده است. یکی از روش‌های رایج در این فرآیند، روش گرادیانی بر پایه تیزی لبه‌هاست که از آن برای محاسبه‌ی امتیاز فوکوس استفاده شده است. با شروع حرکت قطعه مقابل دوربین محلی، فرآیند عکسبرداری مرحله به مرحله آغاز می‌شود. برای دستیابی به تصاویر دقیق، باید دو نکته رعایت شود. نکته اول اینکه تصاویر نباید همپوشانی داشته باشند. نکته دوم نیز این است که سرعت حرکت قطعه باید با نرخ ثبت تصاویر دوربین هماهنگ باشد. برای جلوگیری از همپوشانی، تا زمانی که ناحیه‌ی تصویر قبلی از دید کامل خارج نشده، عکس جدید گرفته

در مرحله بعد، کاربر باید قطعات مورد نظر را انتخاب کند. اگر تنها یک قطعه در صفحه مرجع باشد، نرم‌افزار به طور پیش‌فرض آن را برای اندازه‌گیری انتخاب می‌کند. در غیر این صورت، کاربر از پنل مخصوص برای انتخاب قطعات استفاده می‌کند. پس از تشخیص قطعات، مرحله‌ی ایجاد مسیر حرکتی میزکار آغاز می‌شود. پس از نصب موتور و کنترلر بر روی میزکار، رابط نرم‌افزاری مارلین از جی‌کد برای به حرکت درآوردن موتور استفاده می‌کند. با داشتن مختصات نقاط X و Y هر نقطه از کانتور قطعه، می‌توان جی‌کدی تولید کرد که میزکار را از روبه‌روی دوربین عبور داده و اطلاعات ابعادی قطعه را با کیفیت بالا ذخیره نماید. در نرم‌افزار Auto Vision، سربرگ «ایجاد مسیر» با ترکیب حرکات خطی تحت عنوان G00 و موقعیت نقاط X و Y به تولید جی‌کد می‌پردازد. قطعات باید زیر دوربین محلی یا سیستم دوربین و لنز دستگاه قرار گیرند. در این مرحله، برای جای‌گیری درست قطعات، یک پاس اولیه برای جبران تفاوت مختصات بین دوربین کلی و محلی انجام شده است. میزان تفاوت مختصات ها در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

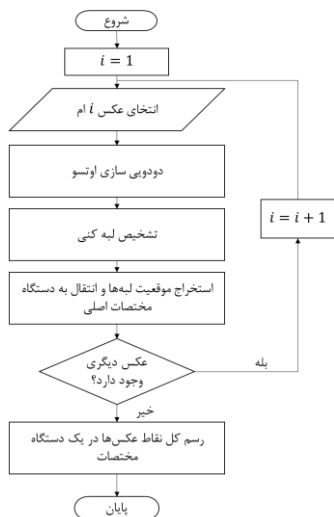


شکل ۱۲ مختصات کلی (دوربین تشخیص موقعیت) و مختصات محلی (دوربین دستگاه) در دستگاه اندازه‌گیری مورد مطالعه

Fig. 12 Global coordinates (position-detecting camera) and local coordinates (device-mounted camera) in the measuring system under study

۲-۴- الگوریتم بازسازی دو بعدی پروفیل قطعات

لنز دوربین دستگاه VMM در کمترین میزان زوم، دارای بزرگنمایی ۳۰ برابر است و تنها ناحیه‌ای محدود به ابعاد ۶/۴ در ۴/۸ میلی‌متر را نمایش می‌دهد. بنابراین امکان تصویربرداری با کیفیت از کل قطعه با یک عکس وجود ندارد. برای رفع این محدودیت، الگوریتمی طراحی شده است که اندازه‌گیری کامل پروفیل قطعه را امکان‌پذیر می‌سازد. در گام اول، قطعه با حرکت گام‌به‌گام از مقابل دوربین عبور کرده و از هر بخش به صورت مجزا عکس برداری می‌شود. پس از آن، موقعیت هر عکس با استفاده از خط‌کش‌های LVDT ثبت می‌گردد. در گام سوم، تصاویر به کمک روش‌هایی نظیر باینری‌سازی و تشخیص لبه پردازش می‌شوند. سپس، کانتورهای به دست آمده از عکس‌های گوناگون با استفاده از مدل کالیبره در



شکل ۱۵ الگوریتم بازسازی عکس‌های جزئی و ایجاد ابر نقاط قطعه

Fig. 15 Algorithm for reconstructing partial images and creating the part's point cloud

در مرحله بعد، موقعیت تمام نقاط قطعه در دستگاه مختصات اصلی با دقت ۱۰ میکرونی محاسبه شده است. دقت مورد نظر بر اساس دو عامل کلیدی به دست آمده است. عامل اول رزولوشن فضایی سیستم (پیکسل بر میلی‌متر) می‌باشد. بر این اساس، پس از کالیبراسیون میزان جابجایی واقعی هر پیکسل در صفحه قطعه محاسبه می‌شود. با وضوح دوربین و فاصله کانونی استفاده شده، این مقدار ۵ میکرون بر پیکسل به دست آمد. عامل دوم مربوط به الگوریتم زیر پیکسلی است. در این حالت، الگوریتم تشخیص لبه (مانند Canny به همراه تقریب زیرپیکسلی لبه‌ها) دقت مکان‌یابی لبه را تا حدود ۰/۱ پیکسل افزایش می‌دهد. بنابراین، دقت نظری سیستم طبق رابطه زیر به میکرون می‌رسد:

$$Accuracy = 5 \frac{\mu m}{pixel} \times 0.1 \text{ pixel} = 0.5 \mu m \quad (10)$$

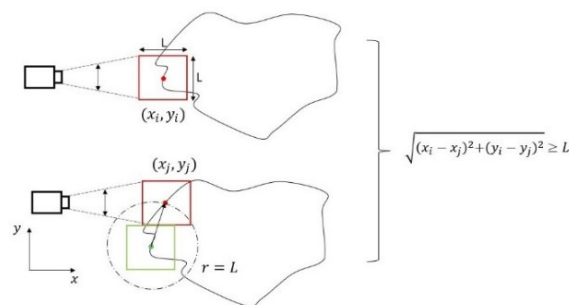
برای اعتبارسنجی عملی، ۴ اندازه‌گیری بر روی هر نمونه استاندارد (گیج بلوکی با دقت $\pm 1 \mu m$) انجام شد. میانگین خطای اندازه‌گیری (μ) ۷ میکرون و انحراف معیار خطا (σ) ۱ میکرون محاسبه شده است که نشان‌دهنده دستیابی به دقت در محدوده ۱۰ میکرون تحت شرایط کنترل شده ($\pm 3\sigma$) است. منابع خطا شامل خطای کالیبراسیون ($3.2 \mu m$)، لرزش مکانیکی ($3 \mu m$)، الحاق تصاویر ($5 \mu m$) و نویز CCD ($2 \mu m$) هستند. در گام بعد، از طریق رابطه زیر، موقعیت نقاط به مختصات اصلی انتقال می‌یابد. این فرآیند امکان بازسازی دقیق پروفیل قطعه را فراهم می‌آورد و به عنوان ابر نقاط ذخیره می‌شود.

$$\begin{aligned} x_{i, global} &= x_{c, global} - (x_{i, local} - \frac{L}{2}) \\ y_{i, global} &= y_{c, global} - (\frac{L}{2} - y_{i, local}) \end{aligned} \quad (11)$$

نمی‌شود. با فرض ناحیه دید مربعی به ضلع L ، دایره‌ای با شعاع L از مرکز آن رسم می‌شود و تماس آن با کانتور مشخص می‌کند که عکس جدید چه زمانی باید ثبت شود. در نتیجه اگر دستگاه در موقعیت (x_i, y_i) باشد، موقعیت (x_j, y_j) بعدی که بایستی در آن عکس جدید گرفته شود طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \geq L \quad (9)$$

شکل ۱۴ این مسئله را به صورت بصری نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ توضیح شماتیک گام عکسبرداری از پروفیل قطعات

Fig. 14 Schematic illustration of the part profile imaging step

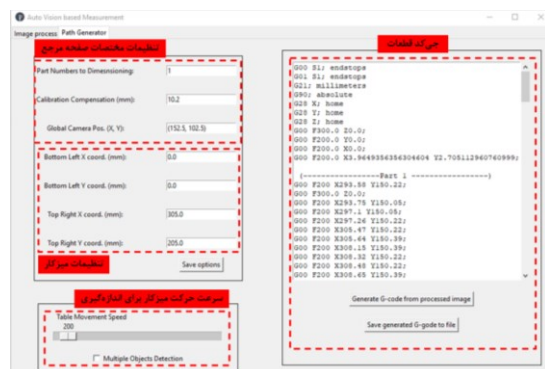
پس از ذخیره‌سازی عکس‌ها، الگوریتمی برای بازسازی پروفیل قطعه و تبدیل آن به ابر نقاط طراحی شده است. در ابتدا، یکی از عکس‌ها به حالت خاکستری تبدیل می‌شود. سپس با استفاده از دودویی‌سازی اوتسو، عکس آماده می‌شود تا به عنوان ورودی برای تابع تشخیص لبه کنی قرار گیرد و نقاط لبه‌ها شناسایی و ذخیره شوند. این مرحله برای تمامی عکس‌ها تکرار می‌شود. در این پژوهش، فرآیند تصویربرداری تکه‌ای و الحاق ابر نقاط در دو مرحله متوالی انجام شد. در گام نخست، از الگوریتم SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) برای شناسایی و تطبیق نقاط شاخص در نواحی همپوشان تصاویر جزئی استفاده گردید. این روش امکان هم‌ترازی دقیق تصاویر را حتی در شرایط تغییرات جزئی نور و زاویه دید فراهم کرد. سپس در مرحله دوم، به منظور بهبود هم‌ترازی و الحاق نهایی ابر نقاط، الگوریتم ICP (Iterative Closest Point) به کار گرفته شد. در نتیجه، خطای کلی الحاق و ثبت داده‌ها حدود ± 5 میکرومتر به دست آمد که بیانگر دقت مطلوب در تحلیل ابعادی انجام شده است. شکل ۱۵ الگوریتم طراحی شده برای بازسازی عکس‌های جزئی و ایجاد ابر نقاط قطعه را نشان می‌دهد.

با ایجاد جی کدی که بتواند میزکار را مطابق با کانتور قطعه از روبروی دوربین محلی عبور دهد، به کمک بازسازی و اتصال نقاط اندازه‌گیری شده امکان اندازه‌گیری یکپارچه‌ی قطعه بدون دخالت دست به وجود خواهد آمد. در نرم‌افزار Auto Vision سربرگی تحت عنوان ایجاد مسیر تعبیه شده است که در شکل ۱۷ نشان داده شده است. این بخش با در کنار هم قرار دادن حرکات خطی تحت عنوان G00 و موقعیت X و Y هر نقطه از کانتور قطعه به صورت خط به خط، جی‌کد مدنظر را تولید می‌نماید.



شکل ۱۶ صفحه‌ی رابط کاربری نرم افزار به منظور پردازش تصویر و تشخیص قطعات به همراه تنظیمات مربوطه

Fig. 16 The user interface page of the software for image processing and parts recognition with the corresponding settings



شکل ۱۷ ایجاد جی کد از قطعات قرارگرفته بر روی میز کار دستگاه هنگام تشخیص پروفیل قطعات

Fig. 17 G-code generation from parts placed on the worktable during the part profile detection process

در ادامه‌ی این بخش، عملکرد دستگاه اندازه‌گیری در اندازه‌گیری موارد مختلف بررسی شده است.

در رابطه‌ی بالا $x_{i, global}$ و $y_{i, global}$ نشان دهنده‌ی مختصات در دستگاه اصلی می‌باشند. $x_{i, global}$ و $y_{i, global}$ نیز نشان دهنده مختصات در دستگاه محلی هستند. L نیز طول ضلع مربعی است که در ناحیه دید لنز قرار دارد.

۳- تحلیل و تفسیر نتایج

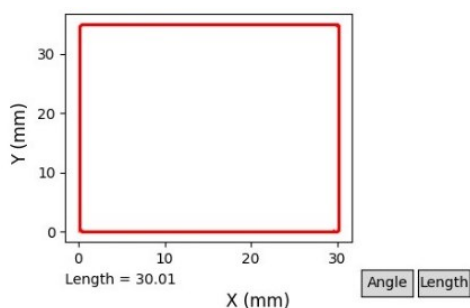
در این قسمت، اندازه‌گیری پروفیل قطعات استاندارد با استفاده از روش ارائه شده مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصویر انجام شده است. هدف از اندازه‌گیری پروفیل قطعات استاندارد مطالعه شده در این بخش سنجش توانایی روش ارائه شده است. بدین منظور، از قطعات استاندارد برای اندازه‌گیری طول، زاویه، رزوه و پروفیل چرخ زنجیر استفاده شده است. همچنین برای بررسی تکرارپذیری روش، هر کدام از گیج‌ها چندین بار اندازه‌گیری خواهد شد. هدف از دقت‌سنجی چرخ‌زنجیر به منظور صحت‌سنجی و قابلیت روش توسعه یافته در اندازه‌گیری نمونه‌های واقعی صورت گرفته است. برای شروع موقعیت‌یابی قطعات بایستی تصویری از میزکار به عنوان ورودی الگوریتم به نرم‌افزار داده شود. پس از قرارگیری دستگاه در مختصات (۰،۰)، یکی از گزینه‌های بارگذاری عکس و یا پردازش ویدیو، توسط کاربر انتخاب می‌شود. استفاده از گزینه بارگذاری عکس بایستی با دقت صورت گیرد زیرا در صورت مطابقت نداشتن عکس با شرایط میزکار، روند اندازه‌گیری به درستی صورت نمی‌گیرد. پس از انتخاب گزینه‌ی بارگذاری عکس، نرم‌افزار از کاربر می‌خواهد تا یک عکس که قبلاً بر روی کامپیوتر ذخیره شده را بارگذاری نماید. پس از آن صفحه‌ای همانند شکل ۱۶ ظاهر می‌شود که امکان تعیین پارامترهای تشخیص پروفیل قطعه به کاربر داده می‌شود. این صفحه همچنین با عکسبرداری از میزکار در گزینه پردازش ویدیو، برای کاربر به نمایش درمی‌آید. در سمت راست این صفحه گزینه‌هایی در اختیار کاربر قرار داده شده است تا با تغییر آن‌ها بهترین کانتور قطعات استخراج شود و بهینه‌ترین مسیر حرکتی ایجاد گردد. پس از کالیبراسون دوربین و تعیین پارامترهای تشخیص کانتور که در قسمت‌های پیشین توضیح داده شد، برای تشخیص قطعات مورد نظر، نوبت به ایجاد مسیر حرکتی میزکار می‌رسد. جی‌کد زبان استاندارد کنترل عددی کامپیوتری می‌باشد که با تعاریفی از قبل تعیین شده امکان ارسال دستورات حرکتی و کنترلی ماشین‌های کنترل عددی را فراهم می‌کند. بر این اساس، پس از نصب موتور و کنترلر بر روی میزکار، رابط میان کاربر و میزکار نرم‌افزار مارلین می‌باشد. این نرم‌افزار برای به حرکت درآوردن موتور ها از جی کد استفاده می‌کند. با در دست داشتن شکل کانتور قطعات، مختصات نقاط X و Y هر نقطه از هر قطعه در دسترس می‌باشد. از سوی دیگر برای اندازه‌گیری کل قطعه تنها نیاز است تا دوربین محلی دستگاه کانتور کامل قطعه را مشاهده کند و اطلاعات ابعادی هر بخش را با رزولوشن بالا ذخیره نماید. در نتیجه

شکل ۲۱ نیز تصویر گیج استفاده شده در نرم‌افزار دستگاه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ گیج بلوکی ۳۰ میلی‌متری

Fig. 20 30 mm Block Gauge



شکل ۲۱ خروجی دستگاه اندازه‌گیری برای گیج بلوکی ۳۰ میلی‌متری

Fig. 21 Measurement device output for the 30 mm block gauge

جدول ۴ مقادیر طول های اندازه‌گیری شده برای گیج ۳۰ میلی‌متری در آزمونهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج مشخص است، دستگاه اندازه‌گیری پروفیل قطعات که با استفاده از تغییرات انجام شده به کمک بینایی ماشین و پردازش تصویر پروفیل دو بعدی قطعات را اندازه‌گیری می‌کند، حداکثر خطای ۰/۰۳۳٪ را ارائه کرده است که بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. علاوه بر این، خطای اندازه‌گیری تنها در یکی از آزمون‌ها رخ داده و در سایر حالات اندازه‌گیری بدون خطا بوده است.

جدول ۴ نتایج اندازه‌گیری گیج ۳۰ میلی‌متری

Table 4 Measurement results of the 30 mm gauge

Test Number	1	2	3	4	Mean	Standard deviation
Length (mm)	30.00	30.01	30.00	30.00	30.0025	0.005

۲-۳- صحت سنجی دقت زاویه‌ای

در این بخش، با قرار دادن گیج ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، فرآیند اندازه‌گیری خودکار سه بار اجرا شده است.

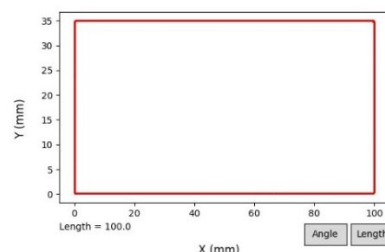
۱-۳- صحت سنجی دقت فاصله‌ای

در ابتدا از گیج ۱۰۰ میلی‌متری برای اندازه‌گیری صحت‌سنجی اندازه‌گیری طول استفاده شده است. فرآیند اندازه‌گیری خودکار چهار بار اجرا شده است و در هر بار از تست، طول قطعه با استفاده از اندازه‌گیری خودکار محاسبه شده است. شکل ۱۸ گیج استاندارد استفاده شده را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ نیز تصویر گیج استفاده شده در نرم‌افزار دستگاه اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. جدول ۳ مقادیر طول‌های اندازه‌گیری شده برای گیج ۱۰۰ میلی‌متری در آزمون‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج مشخص است، دستگاه اندازه‌گیری پروفیل قطعات که با استفاده از تغییرات انجام شده به کمک بینایی ماشین و پردازش تصویر پروفیل دو بعدی قطعات را اندازه‌گیری می‌کند، بدون هیچ خطایی و با دقت ۱۰۰٪ در تمامی آزمون‌ها طول گیج مورد نظر را اندازه گرفته است.



شکل ۱۸ گیج بلوکی ۱۰۰ میلی‌متری

Fig. 18 100 mm Block Gauge



شکل ۱۹ خروجی دستگاه اندازه‌گیری برای گیج بلوکی ۱۰۰ میلی‌متری

Fig. 19 Measurement device output for the 100 mm block gauge

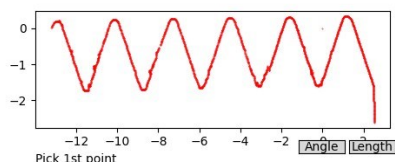
جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری گیج ۱۰۰ میلی‌متری

Table 3 Measurement results of the 100 mm gauge

Test Number	1	2	3	4	Mean	Standard deviation
Length (mm)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0

در گام بعد، از یک گیج ۳۰ میلی‌متری برای صحت‌سنجی عملکرد دستگاه اندازه‌گیری بر اساس بینایی ماشین و پردازش تصویر استفاده شده است. بر این اساس، فرآیند اندازه‌گیری خودکار چهار بار اجرا شده و با استفاده از خروجی ابر نقاط طول گیج محاسبه شده است. شکل ۲۰ گیج استاندارد استفاده شده را نشان می‌دهد.

دوربین تصویربرداری عملکرد قابل قبولی در تخمین پروفیل این قطعه استاندارد داشته است.



شکل ۲۴ خروجی اندازه‌گیری گیج رزوه

Fig. 23 Measurement results of the thread gauge

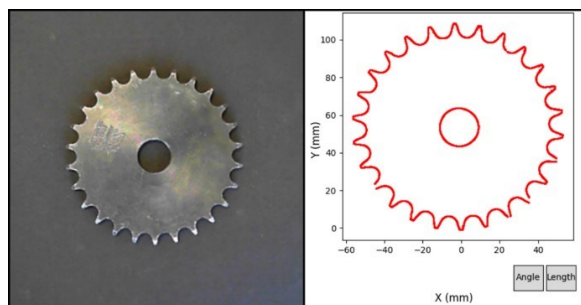
جدول ۶ نتایج اندازه‌گیری گیج رزوه

Table 6 Measurement results of the thread gauge

Variable name	Reference Value	Measured Value
Pitch (mm)	2.822	2.83
Thread height (mm)	1.807	1.81
Angle (degree)	55	55

۳-۴- صحت سنجی اندازه‌گیری پروفیل چرخ زنجیر

آخرین مورد از مطالعات موردی چرخ زنجیری است که به منظور سنجش توانایی روش توسعه یافته در اندازه‌گیری خودکار قطعات واقعی می‌باشد. بدین منظور، چرخ زنجیر 40A26 استاندارد ANSI مورد مطالعه قرار گرفته است و پروفیل آن استخراج شده است. تصویر واقعی چرخ زنجیر و خروجی اندازه‌گیری شده از آن در شکل ۲۵ قابل مشاهده است.



شکل ۲۵ چرخ زنجیر استاندارد اندازه‌گیری شده و خروجی نرم‌افزار

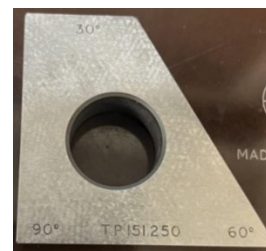
Fig. 25 Measured standard sprocket and software output

علاوه بر این، مقادیر قطر خارجی، قطر گام و گام که از خروجی ابر نقاط قطعه به دست آمده است در جدول ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۷ نتایج اندازه‌گیری چرخ زنجیر

Table 7 Measurement results of the sprocket

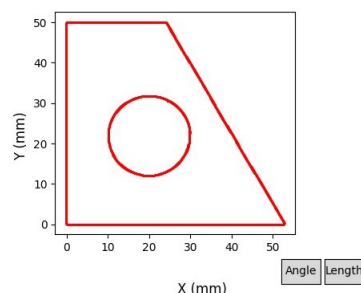
Variable name	Reference Value	Measured Value
Outer diameter (mm)	112.217	112.22
Pitch diameter (mm)	105.359	105.36
Pitch (mm)	12.70	12.70



شکل ۲۲ گیج استفاده شده برای اندازه‌گیری زاویه

Fig. 22 Gauge used for angle measurement

خروجی نرم‌افزار پس از اندازه‌گیری به صورت شکل ۲۳ است.



شکل ۲۳ خروجی اندازه‌گیری گیج زاویه‌ای

Fig. 23 Measurement outputs of the angle gauge

جدول ۵ نیز نتایج اندازه‌گیری برای زاویه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده، دقت اندازه‌گیری برای زاویه ۹۰ درجه برابر ۱۰۰٪ بوده و برای زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه حداکثر خطای ایجاد شده برابر ۰/۱ درجه بوده است که نشان از توانایی بالای روش ارائه شده در اندازه‌گیری زاویه است.

جدول ۵ نتایج اندازه‌گیری گیج اندازه‌گیری زاویه

Table 5 Measurement results of the angle gauge

Test Number	1	2	3	Mean	Standard deviation
Angle gauge 30°	30.00	30.01	30.00	30.0033	0.0058
Angle gauge 60°	60.00	59.99	60.00	59.9966	0.0058
Angle gauge 90°	90.00	90.00	90.00	90	0

۳-۳- صحت سنجی اندازه‌گیری رزوه

صحت‌سنجی در این بخش با رزوه ویت‌ورث بریتیش $7/8\text{ in}$ صورت گرفته است. خروجی به شکل ۲۴ است و مقادیر اندازه‌گیری مطابق جدول ۶ می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده، روش پیاده‌سازی شده در اندازه‌گیری پروفیل رزوه نیز عملکرد بسیار خوبی داشته است. بر این اساس، زاویه رزوه با دقت کامل به دست آمده است. علاوه بر این، با توجه به اینکه دقت اندازه‌گیری دستگاه ۰/۱ میلی‌متر است، اندازه‌گیری گام و ارتفاع رزوه نیز با دقت بسیار مناسبی انجام شده است. لازم به ذکر است که گرچه پروفیل رزوه نسبت به گیج‌های اندازه‌گیری طول و زاویه پیچیده تر است، اما

اندازه‌گیری‌های مترولوژی با دقت کمتر از میکرون (sub-micron) در محیط صنعتی، استفاده از دستگاه CMM ضروری به نظر می‌رسد. دستگاه ارتقاء یافته ضمن حفظ دقت ابعادی 0.01 میلی‌متر، امکان اتوماسیون کامل فرآیند اندازه‌گیری، بازسازی پروفیل و ایجاد مدل اولیه قطعات را فراهم کرده و زمینه‌ساز توسعه‌های آتی در حوزه هوش مصنوعی و تصویربرداری سه‌بعدی خواهد بود. البته لازم به ذکر است در این نسخه، سیستم برای اندازه‌گیری پروفیل دوبعدی قطعات (همچون چرخ‌زنجر) طراحی شده است. بنابراین، فرض بر این است که قطعه در صفحه فوکوس قرار دارد. برای سطوح ناهموار (مثلاً قطعات آهنگری شده)، اگر ناهمواری منجر به خارج شدن بخشی از پروفیل از صفحه فوکوس شود، دقت کاهش می‌یابد. این یک محدودیت ذاتی سیستم‌های بینایی با عمق میدان محدود است که جزو محدودیت‌های پژوهش حاضر می‌باشد. علاوه بر این، سرعت پردازش تصاویر و اندازه‌گیری پروفیل قطعات اهمیت ویژه‌ای به منظور استفاده از دستگاه اندازه‌گیری هوشمند در محیط‌های واقعی صنعتی دارد. سرعت پردازش یکی از نقاط قوت یک سیستم اندازه‌گیری در خطوط تولید است. کل فرآیند اندازه‌گیری (جابجایی، تصویربرداری، پردازش و استخراج ابرنقاط) برای یک قطعه نمونه توسط دستگاه مورد نظر حدود 8 الی 10 ثانیه به طول می‌انجامد. با بهینه سازی الگوریتم، الگوریتم‌های پردازش تصویر (مانند تشخیص لبه) بسیار بهینه شده‌اند و از روش‌های پردازش ناحیه مورد نظر (ROI) استفاده شده تا تنها بخش‌های مرتبط تصویر پردازش شوند. این سرعت برای خطوط تولید با زمان تکت (Takt Time) در حد چند ده ثانیه کاملاً مناسب است. برای مثال، در یک خط با تولید 300 قطعه در ساعت (تکت تایم 12 ثانیه)، این سیستم می‌تواند به صورت بر خط مورد استفاده قرار گیرد. البته برای خطوط بسیار پر سرعت (مثلاً چند قطعه در ثانیه)، نیاز به استفاده از دوربین‌های بسیار پر سرعت و پردازنده‌های قوی‌تر خواهد بود. به طور خلاصه، محدودیت‌ها و کارهای آینده برای بهبود پژوهش حاضر در موارد زیر خلاصه می‌شوند:

- (۱) به دلیل محدودیت در عمق میدان، برای قطعات با عمق زیاد ممکن است کل پروفیل قطعه در محدوده فوکوس نباشد.
- (۲) به واسطه وابستگی عملکرد سیستم به کنتراست، تشخیص لبه برای سطوح با کنتراست بسیار پایین (مثلاً روی شیشه) چالش برانگیز است.
- (۳) محدودیت سخت‌افزاری مانند دقت موتورهای استپر، دقت نهایی سیستم را محدود می‌کند.
- (۴) سیستم فعلی توانایی اندازه‌گیری پروفیل دوبعدی قطعات را دارد و برای اندازه‌گیری کامل سه بعدی یک قطعه پیچیده، نیاز به رفع چالش‌هایی مانند اضافه کردن دوربین‌های بیشتر از زوایای مختلف، توسعه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد نیاز است.

همانطور که مشاهده شد، روش ارائه شده توانمندی بالایی در تخمین پروفیل چرخ‌زنجر مورد نظر به عنوان یک نمونه در حالت واقعی دارد. بنابراین، توانمندی روش ارائه شده مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصویر برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات به اثبات رسید. در پایان به منظور صحت سنجی روش ارائه شده، نتایج حاصل از اندازه‌گیری با سیستم اندازه‌گیری تحت توسعه و اندازه‌گیری با ماشین CMM با دقت ± 5 میکرومتر انجام شده بر روی چند قطعه استاندارد (گج‌های بلوکی) مقایسه شد. میانگین اختلاف بین دو سیستم در اندازه‌گیری ابعاد کلیدی کمتر از 15 میکرومتر بود. لازم به ذکر است سیستم پیشنهادی قابلیت توسعه برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات بزرگ‌تر و پیچیده‌تر را نیز دارد. در این حالت، نیاز به افزایش طول میز اندازه‌گیری در راستای محورهای X و Y و استفاده از لنزهای با فاصله کانونی مناسب است. با اعمال این تغییرات می‌توان محدوده اندازه‌گیری دستگاه را افزایش داد. با این حال، بزرگ‌تر شدن میدان دید موجب کاهش وضوح تصویر (رزولوشن فضایی) خواهد شد که راهکار آن استفاده از دوربین‌های با رزولوشن بالاتر یا راهکار عکسبرداری تکه‌ای و الحاق (Image Stitching) خواهد بود. همچنین، سیستم حاضر توانایی اندازه‌گیری پروفیل دوبعدی قطعات با پیچیدگی‌هایی در دامنه رزولوشن عملکردی ± 1 میکرومتر را دارد که با بهبود سخت‌افزار دستگاه می‌توان آن را ارتقا داد.

۴- نتیجه‌گیری

در فضای رقابتی تولید جهانی، کنترل ابعاد قطعات پس از تولید، عاملی حیاتی در تضمین کیفیت و بقای صنعتی به شمار می‌آید. روش‌های سنتی اندازه‌گیری، با وجود دقت بالا، به دلیل هزینه‌بر بودن، زمان‌بر بودن و نیاز به اپراتور متخصص، پاسخگوی نیازهای امروزی صنایع در زمینه سرعت و سهولت اندازه‌گیری نیستند. در این پژوهش، با هدف دستیابی به یک روش اندازه‌گیری دقیق، سریع و مقرون‌به‌صرفه، یک دستگاه اندازه‌گیری تصویری دستی (VMM) با طراحی شد و با افزودن یک میزکار موتوردار، به یک سامانه نیمه‌خودکار تبدیل گردید.

به‌منظور تشخیص موقعیت قطعات بدون دخالت اپراتور، دوربینی برای تصویربرداری کلی از میزکار نصب شده و الگوریتمی برای استخراج کانتور قطعات و تولید مسیر حرکتی توسعه داده شد. همچنین فرآیندی جهت بازسازی دوبعدی پروفیل قطعات و ایجاد ابرنقاط با رزولوشن 10 میکرون پیاده‌سازی گردید. در نهایت، نرم‌افزار Auto Vision طراحی شد تا ارتباط میان دوربین، سنسورها و میزکار را برقرار سازد. استفاده از روش ارائه شده در مقایسه با اندازه‌گیری پروفیل قطعات با استفاده از دستگاه CMM باعث کاهش هزینه و زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری پروفیل قطعات می‌شود. با این حال، برای قطعات با هندسه بسیار پیچیده و

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [10] G. Bradski and A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. "O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- [11] S. Suzuki, "Topological structural analysis of digitized binary images by border following," *Computer vision, graphics, and image processing*, vol. 30, no. 1, pp. 32-46, 1985, doi:10.1016/0734-189X(85)90016-7.
- [12] H. Soroush, A. Nourani, and G. Farrahi, "A Machine learning model to predict fracture of solder joints considering geometrical and environmental factors," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, p. 104865, 2025, doi: 10.1016/j.tafmec.2025.104865.
- [13] A. Golmohammadi, H. Soroush, and S. Khodaygan, "A Machine learning-based model to predict residual stress in aluminum shell formed by shot peening," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 313, p. 113250, 2025, doi:10.1016/j.ijsolstr.2025.113250.
- [14] H. Soroush and A. Nourani, "Application of data mining techniques for assessment of fracture load and energy in double cantilever beam solder joints," *Journal of Design Against Fatigue*, vol. 1, no. 3, 2023, doi:10.62676/9v4azj82.
- [15] V. Karathanassi, C. Iossifidis, and D. Rokos, "Application of machine vision techniques in the quality control of pharmaceutical solutions," *Computers in industry*, vol. 32, no. 2, pp. 169-179, 1996, doi:10.1016/S0166-3615(96)00063-2.
- [16] M. Bahaghighat, M. Mirfattahi, L. Akbari, and M. Babaie, "Designing quality control system based on vision inspection in pharmaceutical product lines," in *2018 international conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET)*, 2018: IEEE, pp. 1-4, doi:10.1109/ICOMET.2018.8346360.
- [17] S. Anand and L. Priya, *A guide for machine vision in quality control*. Chapman and Hall/CRC, 2019.
- [18] A. A. J. Campbell, "Machine vision for in-process inspection on an automated peptide manufacturing platform," Massachusetts Institute of Technology, 2020.
- [19] Q. Lu, Q. Fu, L. Luo, Q. Yuan, W. Hua, and Y. Yunguang, "Measurement method of LCD surface deformation for smartphone based on optical vision sensing system," *Optik*, vol. 172, pp. 1079-1088, 2018, doi:10.1016/j.ijleo.2018.07.122.
- [1] H.-T. Yau and C.-H. Menq, "An automated dimensional inspection environment for manufactured parts using coordinate measuring machines," *The International Journal of Production Research*, vol. 30, no. 7, pp. 1517-1536, 1992, doi:10.1080/00207549208948105.
- [2] H. Soroush, S. Khodaygan, and J. Hemati Nik, "Tolerance allocation of mechanical assemblies including thermal deformation: A machine learning-based method," *Journal of Thermal Stresses*, vol. 48, no. 1, pp. 64-81, 2025, doi: 10.1080/01495739.2024.2444308.
- [3] W. Harmatys, A. Gaska, P. Gaska, M. Gruza, and J. A. Sładek, "Assessment of background illumination influence on accuracy of measurements performed on optical coordinate measuring machine equipped with video probe," *Sensors*, vol. 21, no. 7, p. 2509, 2021, doi: 10.3390/s21072509.
- [4] R. Koteras, M. Wiczorowski, and P. Znaniecki, "Acceptance and reverification of CMM in industrial conditions," *Advances in Science and Technology. Research Journal*, vol. 12, no. 1, 2018, doi:10.12913/22998624/80987.
- [5] A. Abdolahi, H. Soroush, and S. Khodaygan, "Process capability analysis of additive manufacturing process: a machine learning-based predictive model," *Rapid Prototyping Journal*, 2025, doi:10.1108/RPJ-08-2024-0349.
- [6] R. C. Gonzalez, *Digital image processing*. Pearson education india, 2009.
- [7] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, no. 6, pp. 679-698, 1986, doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [8] Y. Luo and R. Duraiswami, "Canny edge detection on NVIDIA CUDA," in *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2008: IEEE, pp. 1-8, doi:10.1109/CVPRW.2008.4563088.
- [9] P. Agrawal, S. Shrivastava, and S. Limaye, "MATLAB implementation of image segmentation algorithms," in *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, 2010, vol. 3: IEEE, pp. 427-431, doi:10.1109/ICCSIT.2010.5564131.

- Measurement*, vol. 117, pp. 326-338, 2018, doi:10.1016/j.measurement.2017.12.009.
- [32] E. Gadelmawla, "Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads," *Measurement*, vol. 100, pp. 36-49, 2017, doi:10.1016/j.measurement.2016.12.034.
- [33] N.-V. Ngo, Q.-C. Hsu, W.-L. Hsiao, and C.-J. Yang, "Development of a simple three-dimensional machine-vision measurement system for in-process mechanical parts," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 10, p. 1687814017717183, 2017, doi:10.1177/1687814017717183.
- [34] Q. Tan, Y. Kou, J. Miao, S. Liu, and B. Chai, "A model of diameter measurement based on the machine vision," *Symmetry*, vol. 13, no. 2, p. 187, 2021, doi:10.3390/sym13020187.
- [20] V. Chauhan and B. Surgenor, "Fault detection and classification in automated assembly machines using machine vision," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, pp. 2491-2512, 2017, doi:10.1007/s00170-016-9581-5.
- [21] J. Molleda *et al.*, "A profile measurement system for rail quality assessment during manufacturing," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 3, pp. 2684-2692, 2016, doi:10.1109/TIA.2016.2524459.
- [22] Á. F. Millara, J. Molleda, R. Usamentiaga, and D. F. García, "Profile measurement of rails in a rolling mill: implementing and evaluating autonomic computing capabilities," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5466-5475, 2019, doi:10.1109/TIA.2019.2919487.
- [23] Á. F. Millara, J. Molleda, R. Usamentiaga, and D. F. García, "Calibrating a profile measurement system for dimensional inspection in rail rolling mills," *Machine Vision and Applications*, vol. 32, pp. 1-16, 2021, doi: 10.1007/s00138-020-01147-5.
- [24] J. Derganc, B. Likar, and F. Pernuš, "A machine vision system for measuring the eccentricity of bearings," *Computers in industry*, vol. 50, no. 1, pp. 103-111, 2003, doi: 10.1016/S0166-3615(02)00141-0.
- [25] R. Xiang, W. He, X. Zhang, D. Wang, and Y. Shan, "Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads," *Measurement*, vol. 122, pp. 106-116, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.017.
- [26] E. Gadelmawla, "Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears," *Measurement*, vol. 44, no. 9, pp. 1669-1678, 2011, doi: 10.1016/j.measurement.2011.06.023.
- [27] D. K. Moru and D. Borro, "A machine vision algorithm for quality control inspection of gears," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 1, pp. 105-123, 2020, doi:10.1007/s00170-019-04426-2.
- [28] J.-H. Ye and Q.-C. Hsu, "Automatic optical apparatus for inspecting bearing assembly defects," *Sensors and Materials*, vol. 30, no. 11, pp. 2637-2652, 2018, doi:10.18494/SAM.2018.2113.
- [29] G. Peng, Z. Zhang, and W. Li, "Computer vision algorithm for measurement and inspection of O-rings," *Measurement*, vol. 94, pp. 828-836, 2016, doi:10.1016/j.measurement.2016.09.012.
- [30] J. Rejc *et al.*, "The mechanical assembly dimensional measurements with the automated visual inspection system," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10665-10675, 2011, doi:10.1016/j.eswa.2011.02.133.
- [31] X. Wang, J. Liu, S. Liu, P. Jin, T. Wu, and Z. Wang, "Accurate radius measurement of multi-bend tubes based on stereo vision,"