



طراحی و ساخت یک اسکنر استریویی فعال و صحت‌سنجی نتایج از دیدگاه مترولوژیک

مریم انصاری¹، قاسم امیریان^{2*}، سید محمد امام³، سید جلال همتی⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

* یزد، صندوق پستی 741-89195، gamirian@yazd.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 شهریور 1397

پذیرش: 2 دی 1397

ارائه در سایت: خرداد 1398

کلیدواژه‌گان:

اسکنر سه‌بعدی

بینایی استریو

تناظریایی

شاخص‌های اندازه‌گیری

بازسازی مختصات سه‌بعدی با استفاده از بینایی استریو در سه مرحله کالیبراسیون دوربین‌ها، تناظریایی و مثلث‌سازی انجام می‌شود. تناظریایی را می‌توان مهم‌ترین و موثرترین بخش بر دقت در فرایند استریو دانست. در روش سنتی استریو غیرفعال اغلب از الگوریتم‌های که بر اساس ویژگی تصویر عمل می‌کنند، برای تناظریایی استفاده می‌شود. استفاده از این الگوریتم‌ها در تصاویر کم‌بافت یا با بافت زیاد، نتایج ضعیفی به همراه دارد. مشکلات مربوط به تناظریایی در تصاویر استریو را می‌توان با قرار دادن یک منبع نور فعال در کنار تجهیزات استریو، حل کرد. این تحقیق به طراحی و ساخت یک اسکنر سه‌بعدی، با ترکیب استریو غیرفعال و استفاده از یک لیزر خطی پرداخته است. در این سیستم نقطه متناظر، از تقاطع خط لیزر با خط اپیپولار با استفاده از روابط ریاضی و در مقیاس پیکسلی استخراج شده است. سپس، دقت و قابلیت دستگاه ساخته شده با استفاده از استانداردهای مربوطه و شاخص‌های اندازه‌گیری مربوط به این نوع اسکنر بررسی شده است. نمونه‌های آزمایش تحت اسکن 180 درجه قرار گرفته‌اند و بررسی دقت، تکرارپذیری، تجدیدپذیری و عدم قطعیت سیستم گزارش شده است. نتایج گویای دقت قابل قبول برای قطعات کوچک صنعتی با استفاده از سیستم پیشنهادی است.

Design and build an active stereo scanner and validation of results from a metrological viewpoint

Maryam Ansari¹, Ghasem Amirian^{2*}, Seyed Mohammad Emam², Seyed Jalal Hemmati³

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Hormozgan University, Bandar abbas, Iran

* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran, gamirian@yazd.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 16 September 2018
Accepted 23 December 2018
Available Online June 2019

Keywords:

3D scanner
Stereo vision
Matching
Measurement index

Abstract

3D model reconstruction by stereo vision is divided into three steps: the camera calibration, matching, and triangulation algorithm. The matching can be considered as the most important and effective part of accuracy. In passive stereo vision, matching is done by algorithms that are often based on image features. These algorithms yield poor results in low or high textured regions. The matching problem can be resolved by adding a light source to stereo rig. In this paper, a 3D scanner is designed and built by combining passive stereo and a slit laser. The match point is obtained as intersection between the epipolar line and the laser stripe on the image. It is solved by mathematical formulas on pixel scale. Then the accuracy and ability of the system are investigated by relevant standards and the measurement indexes. The test samples have been scanned over 180 degree and the accuracy, repeatability, reproducibility and reliability of the system are reported. The results show an acceptable accuracy for small industrial parts using the proposed system.

1- مقدمه

نیازمند هستند. روش‌های متعددی برای اینکار پیشنهاد و ارائه شده است که به وسیله اسکنرهای سه‌بعدی اجرا می‌شوند. اسکنرهای سه‌بعدی وسایلی هستند که می‌توانند اطلاعات سه‌بعدی را از جسم یا صحنه واقعی به‌دست آورند. اسکنرها ابر نقاط از سطح جسم ایجاد می‌کنند. برای هر نقطه فاصله از سطح را نمایش می‌دهند و موقعیت سه‌بعدی برای نقاط تصویر را به

به‌دست‌آوردن مدل هندسی دقیق یک جسم یا صحنه، همواره در زمینه‌های مختلفی مانند صنایع فیلم و بازی، حفظ میراث فرهنگی، کنترل کیفیت، مهندسی پزشکی، اندازه‌گیری و مهندسی معکوس مورد توجه قرار گرفته است. این صنایع به سیستم‌های سریع و خودکار برای تولید یک مدل سه‌بعدی دقیق

Please cite this article using:

M. Ansari, Gh. Amirian, S. M. Emam, S. J. Hemmati, Design and build an active stereo scanner and validation of results from a metrological viewpoint, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 20-29, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

که تنها از یک دوربین استفاده می‌شود، برای قطعات پیچیده در مدل به‌وجود آمده، یک گپ اطلاعاتی ایجاد می‌شود [8]. در این سیستم‌ها دقتی که به‌دست می‌آید، به طور خیلی زیادی وابسته به هزینه اجزا به کار برده شده است. با این حال حتی با افزایش هزینه اجزا، کمکی به راحت شدن فرایند کالیبراسیون نمی‌شود [2].

یک روش ترکیب روش‌های فعال و غیرفعال با الگوریتم‌های متفاوت است، که می‌تواند رویکرد مناسب و متعادلی برای کاهش محدودیت‌ها و جبران خطای هر دو روش باشد. ترکیب استریو غیرفعال (دو دوربین) و یک لیزر، در حل مشکلات مربوط به نقاط انسداد³ که در روش فعال با یک دوربین به وجود می‌آید، توانایی بالقوه‌ای دارد. همچنین این روش می‌تواند مسئله جستجوی نقاط متناظر در روش غیرفعال که در سطوح با بافت پایین مشکلات اساسی ایجاد می‌کند، را حل نماید [9]. از اهداف قراردادن دو دوربین در کنار یک منبع نور به جای یک دوربین، افزایش دامنه اندازه‌گیری و افزایش دقت سنسورها است. در این نوع اسکنرها، تصویر لیزر به صورت متقارن در هر دو دوربین ثبت می‌شود در حالیکه نقاط خارج از دامنه نامتقارن هستند و تنها در یک دوربین دیده می‌شوند. این باعث اعتباربخشی به اندازه‌گیری می‌شود [10].

اگیولار و همکاران [11] در سال 1996 از قراردادن یک لیزر در کنار تجهیزات استریو، برای سرعت بخشیدن به فرایند CIM و تهیه مدل CAD قطعات پیچیده کمک گرفته‌اند. دقت و سرعت این سیستم برای کاربردهای صنعتی، بررسی شده است. در این پژوهش، به ارزیابی برخی از موارد، مانند فاصله بین دوربین‌ها، کالیبراسیون و هندسه جسم بر دقت به‌صورت نمایش گرافیکی پرداخته شده است ولی هیچ تحلیل آماری در این زمینه انجام نگرفته است. لو و همکاران [12] در سال 2012 به کمک دو دوربین و یک لیزر خطی، یک اسکنر استریویی ساده و ارزان قیمت را طراحی و ساخته‌اند. در این اسکنر دوربین‌ها طوری قرار گرفته‌اند که نقاط متناظر در یک ردیف از جفت تصاویر استریو قرار می‌گیرند و بعد از جستجوی خط مرکزی لیزر در هر سطر، به راحتی پیدا می‌شوند و مدل سه‌بعدی جسم ارزیابی می‌شود. در این مقاله هیچ گزارشی از دقت روش پیشنهادی برای تناظریابی وجود ندارد و نویسنده به نمایش مدل‌های ساخته شده از اسکنر بسنده کرده است. لین [13] در سال 2013 با استفاده از سیستم استریو و لیزر خطی که قابلیت حرکت آزادانه بر روی جسم را دارد، اسکنری ارائه داده است که

وجود می‌آورند. اسکنرهای سه‌بعدی را در یک دسته‌بندی کلی می‌توان به دو دسته تماسی و غیرتماسی تقسیم کرد [1].

اندازه‌گیری غیرتماسی را می‌توان به دو گروه اصلی روش زمان پرواز¹ و روش مثلث‌سازی² تقسیم کرد [2]. روش مثلث‌سازی می‌تواند به صورت فعال یا غیرفعال باشد. اسکنرهای غیرفعال هیچ پرتویی از خود ساطع نمی‌کنند و عملکرد آن‌ها تنها براساس انعکاس نور محیطی است. از معروف ترین و کاربردی‌ترین روش‌های غیرفعال، روش استریو است. سیستم استریو معمولاً دو دوربین که با فاصله کمی از هم قرار می‌گیرند را به کار می‌گیرد. بعد از عکسبرداری همزمان دوربین‌ها از جسم یا صحنه با بررسی تغییرات جزئی بین دو تصویر، امکان محاسبه فاصله دو نقطه متناظر در تصاویر و محاسبه عمق بر اساس تکنیک مثلث‌سازی وجود دارد. این روش اگرچه در بعضی کاربردها مثل هدایت ربات و کنترل کیفیت محصولات مفید می‌باشد ولی برای کاربردهای مهندسی معکوس و اندازه‌گیری قطعات صنعتی مناسب نمی‌باشد. اصلی‌ترین عیب این روش، مشکل در ایجاد تناظر بین نقاط تصویر دو دوربین می‌باشد [3].

اسکنرهای فعال برای جستجوی جسم یا محیط، بعضی پرتوها مثل x-ray یا آلتراسونیک و یا نور ساطع می‌کنند و انعکاس آن یا پرتوهای گذرنده از جسم را جستجو می‌کنند. یکی از کاربردی‌ترین وسایل اندازه‌گیری فعال، اسکنرهای لیزری هستند. اجزا این سیستم شامل یک دوربین و لیزر می‌باشد و از روش مثلث‌سازی برای ارزیابی اطلاعات سه‌بعدی جسم استفاده می‌کند. در واقع این اسکنرها از همان ساختار استریو غیرفعال تشکیل شده‌اند، تنها با این تفاوت که یک دوربین با لیزر جایگزین شده است. معمولاً در مهندسی معکوس و کنترل کیفیت از این روش استفاده می‌گردد [4].

در روش غیرفعال اگر سطح بدون بافت باشد نتایج دقیقی به دست نمی‌آید، به علاوه در شرایط محیطی کم‌نور امکان ایجاد خطا به علت نویز وجود دارد [5]. در اکثر موارد برای اندازه‌گیری روش فعال به غیرفعال ترجیح داده می‌شود. از طرف دیگر اگرچه روش‌های فعال دقت بسیار بالایی دارند اما کالیبراسیون پیچیده‌ای دارند و نیازمند تنظیمات دقیق سنسورها و منبع نوری هستند [6]. در این روش در اکثر موارد، دوربین و لیزر هر دو حرکت می‌کنند و کالیبراسیون این سیستم یک مشکل اساسی است. اجزا متحرک باعث ایجاد مشکل در تکرارپذیری و مدل‌سازی خطای سیستم می‌شوند [7]. همچنین در روش فعال

¹ Time of flight² Triangulation³ Occlusion

بررسی اثر فاصله نسبت به اسکنر این قطعات از دو فاصله 400 و 850 میلی‌متری مورد اسکن قرار گرفته‌اند. همچنین بعد از اسکن قطعات، از دو روش متفاوت برای رجیستر کردن ابر نقاط به‌دست آمده، استفاده شده است. در نهایت با مقایسه اندازه‌های به‌دست آمده از اسکنر با اندازه گرفته شده به وسیله CMM، به بررسی خطای حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف پرداخته است. در این تحقیق هیچ روشی برای محاسبه دقت کلی اسکنر بیان نشده است.

هدف از این تحقیق در مرحله اول آن است که با به‌کارگیری ساده‌ترین ابزار متشکل از دوربین‌های دیجیتال معمولی و یک لیزر خطی ارزان قیمت و بکارگیری الگوریتم‌های مناسب، یک اسکنر فعال استریویی طراحی شود که دقت قابل قبولی برای اندازه‌گیری قطعات کوچک صنعتی داشته باشد. از آنجا که تناظریابی مهم‌ترین بخش دقت در فرایند استریو است، در این تحقیق از یک الگوریتم ساده و دقیق برای تناظریابی استفاده شده است، که بر اساس تقاطع خطوط اپیپولار¹ با خط لیزر در مقیاس پیکسلی عمل می‌کند. دقت به دست آمده با این روش مستقل از شکل و رنگ تصویر و کمتر از یک پیکسل است.

ساخت یک ابزار اندازه‌گیری بدون ارائه پارامترهای اندازه‌گیری کامل نیست به ویژه هنگامی که برای کاربردهای مترولوژیک به کار رود. چنانچه در تحقیقات گذشته دیده می‌شود، هیچ محققى به فاکتورهای سیستم برای کاربردهای عملی اشاره نکرده است. در موارد زیادی حتی دقت سیستم ارزیابی نشده و فقط به ارائه نمایش قطعه اسکن شده یا نتایج گرافیکی اکتفا شده است. در تحقیقات دیگر که دقت سیستم گزارش شده است، روش تعیین آن وجود ندارد. به این دلیل در این تحقیق سعی بر آن بوده است که پس از طراحی سیستم آزمون‌هایی برای صحت‌سنجی نتایج ارائه شود. روش تعیین دقت، تکرارپذیری و تجدیدپذیری آورده شده است و با ارائه روشی برای تخمین عدم قطعیت، به جبران خطای به‌وجود آمده از این سیستم در شرایط مختلف اندازه‌گیری پرداخته شده است. برای اینکار با تحلیل آماری داده‌های حاصل از اسکنر که در طی چند ماه به‌دست آمده است، نتایج به‌صورت کمی آورده شده است. روش ارائه شده در مورد تعیین شاخص‌های اندازه‌گیری، برای تمام سیستم‌های مشابه قابل اجرا است.

2- اصول استریو

استریو روشی برای تولید مدل سه‌بعدی از داده‌های دوبعدی

برای اجسام با سطوحی از جنس‌های مختلف عملکرد مناسبی جهت نمایش جزئیات سطح دارد. هدف نویسنده استفاده از قابلیت سیستم استریو و لیزر برای اسکن قطعات با هندسه خاص بوده است ولی هیچ تحلیل و حتی گزارشی از دقت سیستم به‌صورت کمی وجود ندارد. آرس و همکاران [14] در سال 2014 با ترکیب بینایی استریو و الگوهایی از نور ساختاریافته، یک سیستم برای اندازه‌گیری شکل سه‌بعدی اجسام در حدود $0/5 \times 0/5$ متر ارائه داده‌اند. دقت و تکرارپذیری سیستم با یک جسم مرجع مستطیل شکل بررسی شده است. دقت سیستم حدود $0/3$ میلی‌متر و واریانس تکرارپذیری $0/007$ میلی‌متر بیان شده است. روشی برای چگونگی ارزیابی این شاخص‌ها بیان نشده است. لاس و همکاران [9] در سال 2016 با یک خط لیزر و استفاده از الگوریتم‌های تناظریابی استریو غیرفعال، یک سیستم سه‌بعدی طراحی کرده‌اند که علاوه بر حل مشکلات تناظریابی، به علت سادگی می‌تواند یکی از اپلیکشن‌های گوشی‌های هوشمند باشد. نتایج این تحقیق با تصاویر قطعات اسکن شده و بدون گزارش عددی نمایش داده شده است.

هرجوکو و همکاران [15] در سال 2017 با استفاده از دوربین‌های استریو و نور ساختاریافته، یک اسکنر استریویی ساخته‌اند، که برای اشیاء کوچک کاربرد دارد. آن‌ها سپس به بررسی اثر عوامل مختلف از جمله کالیبراسیون دوربین‌ها و شرایط نورپردازی بر فرایند اسکن پرداخته‌اند. در این تحقیق نیز نتایج تنها با تصاویری از جسم اسکن شده نمایش داده شده است.

بارون و همکاران [16] با ترکیب تجهیزات استریو با پروژکتور و یک آینه کروی، یک اسکنر استریویی فعال ساخته‌اند که برای اندازه‌گیری سطح داخلی قطعات حفره‌ای شکل با هر هندسه‌ای قابل استفاده است. برای ساخت این اسکنر ابتدا دوربین‌های استریو و سپس آینه کالیبره می‌شوند تا شعاع و موقعیت آن برای دوربین‌ها شناخته شود. در این تحقیق اثر کالیبراسیون آینه و تناظریابی تصاویر استریو به وسیله پروژکتور بر دقت سیستم بررسی شده است و موقعیت قرارگیری آینه برای کمترین خطا و بهترین دقت به‌دست آمده است.

مارتینز-پلترو و همکاران [17] آزمایش‌های عملی برای بررسی عملکرد و قابلیت یک اسکنر استریویی فعال با تکنولوژی نور ساختاریافته آبی‌رنگ، ارائه داده‌اند. هدف از این مقاله بررسی عواملی که در ساخت اسکنرها مورد توجه قرار نگرفته است و به دست آوردن نتایج قابل اعتماد در مورد دقت اندازه‌گیری اسکنر است. برای اینکار گنج‌هایی با اشکال صفحه‌ای، استوانه‌های داخلی و خارجی، مخروط و کره مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای

¹ Epipolar lines

تصویر در تصویر دیگر، روی یک خط از آن تصویر به نام خط اپیپولار قرار می‌گیرد، در نتیجه برای پیدا کردن نقطه متناظر، بجای تمام صفحه تصویر دیگر، جستجو تنها روی این خط انجام می‌شود. در شکل 2 هندسه اپیپولار و نقاط متناظر و خط اپیپولار، نمایش داده شده‌اند. \mathbf{x} و \mathbf{x}' نقاط متناظر به ترتیب در دوربین‌های چپ و راست هستند و \mathbf{x} خط اپیپولار متناظر نقطه \mathbf{x} ، در تصویر دیگر می‌باشد.

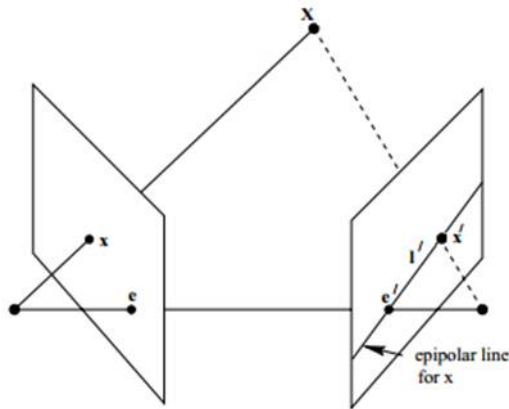


Fig. 2 Epipolar geometry [18]

شکل 2 نمایش هندسه اپیپولار [18]

این ارتباط به کمک یک انتقال ماتریسی مشخص می‌شود. این ماتریس را ماتریس اساسی⁸ می‌نامند، و با F نمایش داده می‌شود. برای تناظریابی ابتدا باید ماتریس اساسی را محاسبه کرد. ماتریس اساسی برای هر جفت نقطه متناظر $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}'$ در دو تصویر، در معادله (2) صدق می‌کند.

$$\mathbf{x}'^T F \mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

با استفاده از رابطه (2) و داشتن مختصات دو تصویر چپ و راست، ماتریس اساسی تخمین زده می‌شود. در اینجا ماتریس اساسی به روش الگوریتم 8-نقطه محاسبه شده است [18]. پس از تخمین ماتریس اساسی، خطوط اپیپولار و در نهایت نقاط متناظر به دست می‌آیند.

بعد از شناسایی نقاط متناظر دو تصویر و دانستن ماتریس کالیبراسیون دوربین‌ها، مختصات جهانی نقاط تصاویر با قاعده مثلث‌سازی به دست می‌آیند. در هر کدام از تصاویر، نقاط متناظر اندازه‌گیری شده مطابق رابطه (1) در معادلات $\mathbf{x} = P\mathbf{X}$ و $\mathbf{x}' = P'\mathbf{X}$ صدق می‌کنند، که P و P' به ترتیب ماتریس کالیبراسیون دوربین چپ و راست و \mathbf{X} مختصات سه‌بعدی نقطه جهانی است. صدق $\mathbf{x}' = (x', y', 1)^T$ و $\mathbf{x} = (x, y, 1)^T$ تصویر نقطه

تصاویر می‌باشد. تصویر یک جسم در دوربین مدل pinhole، حاصل یک انتقال اقلیدسی از سیستم مختصات جهانی¹ به سیستم مختصات دوربین²، مطابق شکل 1 می‌باشد. ارتباط بین مختصات جهانی \mathbf{X} و مختصات پیکسلی این نقطه در تصویر \mathbf{x} ، با رابطه (1) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= P\mathbf{X} \\ P &= K[R \ t] \\ \mathbf{x} &\in \mathbb{R}^2, \mathbf{X} \in \mathbb{R}^3 \\ K &= \begin{bmatrix} f & 0 & p_x \\ 0 & f & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

در این رابطه P را ماتریس کالیبراسیون دوربین³ می‌نامند. K ماتریس درونی⁴ دوربین نامیده می‌شود. f فاصله کانونی دوربین و (p_x, p_y) مختصات نقطه مرکز تصویر (نقطه اصلی⁵) می‌باشند. همچنین $[R \ t]$ را ماتریس بیرونی⁶ دوربین می‌نامند. R یک ماتریس 3×3 می‌باشد، که نمایش‌دهنده چرخش و جهت بین مختصات جهانی و مختصات تصویر می‌باشد و t بردار انتقال از سیستم مختصات جهانی به مختصات تصویر می‌باشد.

در روش استریو که از دو دوربین استفاده می‌شود، اصلی‌ترین پارامتر بر دقت فرایند، تناظریابی است. هدف از تناظریابی، پیدا کردن نقاط متناظر یک نقطه از جسم یا صحنه در دو تصویر است. تناظریابی با استفاده از هندسه اپیپولار⁷ انجام می‌شود. هندسه اپیپولار در واقع همان ارتباط ذاتی بین دو تصویر استریو می‌باشد. این ارتباط مستقل از ساختار صحنه است و تنها وابسته به پارامترهای داخلی دوربین‌ها و موقعیت آن‌ها نسبت به هم می‌باشد.

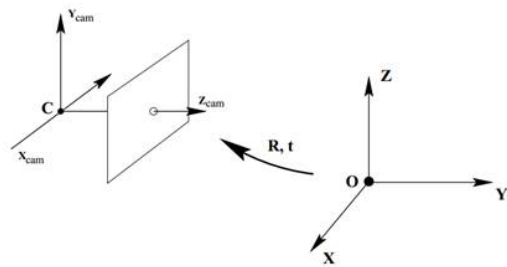


Fig. 1 The Euclidean transformation between the world and camera coordinate frames [18]

شکل 1 انتقال اقلیدسی بین سیستم مختصات جهانی و سیستم مختصات دوربین [18]

به کمک هندسه اپیپولار، مشخص می‌شود که نقطه متناظر یک

¹ World coordinate system

² Camera coordinate system

³ Camera calibration matrix

⁴ Intrinsic parameter

⁵ Principal point

⁶ Extrinsic parameters

⁷ Epipolar geometry

⁸ Fundamental matrix

عکس‌برداری واقع شود.

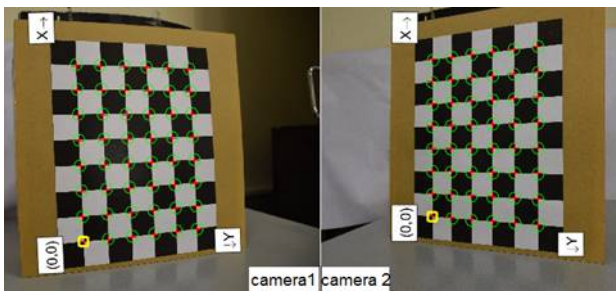


Fig. 3 Corner point extraction

شکل 3 استخراج نقاط گوشه صفحه شطرنجی

در اینجا در بیست موقعیت عکس‌برداری صورت گرفته است. پس از استخراج نقاط گوشه صفحه شطرنجی، ماتریس کالیبراسیون دوربین با داشتن این نقاط معلوم، طبق رابطه (1) به دست می‌آید.

در سیستم استریو، هر دو دوربین همزمان کالیبره می‌شوند تا انتقال بین مختصات تصاویر و جهت‌های آن‌ها نسبت به مراکز دوربین‌ها شناخته شود، زیرا برای جستجوی نقاط متناظر، اطلاعات مربوط به چرخش و انتقال بین دو دوربین لازم می‌باشد. در این سیستم لیزر کالیبره نمی‌شود و قادر به حرکت آزادانه در تمام جهات است. این یکی از اصلی‌ترین مزایای آن نسبت به اسکنرهای تک دوربینه است.

4- تناظریابی و بازسازی مختصات سه‌بعدی

پس از کالیبراسیون دوربین‌ها و مشخص شدن پارامترهای مربوط به آن، جسم مورد اسکن قرار می‌گیرد. بعد از عکس‌برداری و تناظریابی تصاویر استریو، مختصات سه‌بعدی جسم به دست می‌آید. در روش استریو غیرفعال که هیچ منبع نوری بر جسم تابیده نمی‌شود بعد از محاسبه ماتریس اساسی، تعیین خطوط اپیپولار و یکسوسازی تصاویر استریو از الگوریتم‌هایی مبتنی بر ویژگی‌های تصویر برای پیدا کردن نقاط متناظر استفاده می‌شود. با این روش در مناطقی از تصویر که بافت کمی وجود دارد یا جایی که بافت تصویر خیلی پیچیده و تکراری است، الگوریتم قادر به تشخیص نمی‌باشد و به همین علت در تناظریابی خطا ایجاد می‌شود. در این سیستم از یک لیزر خطی برای رفع این مشکل استفاده شده است. به کمک لیزر، نقطه متناظر یک نقطه از تصویر در تصویر دیگر، روی تقاطع خط اپیپولار و خط لیزر قرار می‌گیرد. شکل 4 تعدادی از خطوط اپیپولار که از نقاط متناظر در جفت تصاویر چپ و راست عبور می‌کنند را نشان می‌دهد.

جهانی X به ترتیب در دوربین‌های چپ و راست هستند. این دو معادله را می‌توان به شکل معادله (3) ترکیب کرد [18].

$$AX=0 \quad (3)$$

که یک معادله خطی از X است و:

$$A = \begin{bmatrix} xp^{3T} - p^{1T} \\ yp^{3T} - p^{2T} \\ x'p'^{3T} - p'^{1T} \\ y'p'^{3T} - p'^{2T} \end{bmatrix}$$

$$X = (X, Y, Z, 1)^T \quad (4)$$

نتیجه مثلث‌سازی ابر نقاط است که به نرم‌افزارهای CAD

فرستاده می‌شود و تبدیل به سطح می‌گردد.

3- کالیبراسیون دوربین‌ها

کالیبراسیون دوربین در چارچوب بازسازی سه‌بعدی، فرایندی برای تخمین هندسه داخلی و ویژگی‌های نوری دوربین (پارامترهای درونی) و موقعیت سه‌بعدی دوربین نسبت به یک سیستم مختصات جهانی مشخص (پارامترهای بیرونی) است [18]. پارامترهای درونی شامل مختصات فاصله کانونی، نقاط اصلی و اعوجاج شعاعی و مماسی لنز دوربین و پارامترهای بیرونی شامل موقعیت و جهت دوربین نسبت به سیستم مختصات مرجع است.

برای تعیین این پارامترها از صفحه کالیبراسیون استفاده می‌شود که اغلب شامل الگوی شطرنجی می‌باشد. این صفحات از مربع‌های سیاه و سفید تشکیل شده‌اند که موقعیت گوشه این مربع‌ها نسبت به یک نقطه مرجع روی صفحه معلوم است. گوشه یک ویژگی مفید از تصویر است زیرا آن‌ها به راحتی از پیکسل‌های همسایه‌شان قابل تشخیص هستند. الگوریتم‌های زیادی برای جستجوی نقاط گوشه وجود دارد. الگوریتم جستجوی گوشه هریس¹، یک الگوریتم استاندارد در بینایی ماشین است [19]. در این تحقیق این الگوریتم برای جستجوی نقاط گوشه صفحه شطرنجی اعمال شده است. شکل 3، جستجوی نقاط گوشه حاصل از الگوریتم هریس را برای دوربین‌های چپ و راست نشان می‌دهد. دقت به دست آمده از این الگوریتم حدود 0.7-0.8 پیکسل بوده است که با توجه به غیرصنعتی بودن دوربین‌ها، مناسب می‌باشد.

برای کالیبراسیون این سیستم صفحه شطرنجی در فاصله حدود 350-400 میلی‌متر نسبت به دوربین‌ها قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن بهترین نتایج باید صفحه شطرنجی در موقعیت‌های مختلف نسبت به دوربین‌ها قرار گرفته و مورد

¹ Harris corner detection

می‌توان نقاط متناظر در دو تصویر را با دقت بالا شناسایی کرد. پس از شناسایی نقاط متناظر و دانستن ماتریس کالیبراسیون دوربین‌ها طبق رابطه (3)، مختصات سه‌بعدی نقاط به دست می‌آید. شکل 6 ابر نقاط و سطح حاصل از قطعه شکل 4 را برای قطعه اسکن شده با این روش نشان می‌دهد.

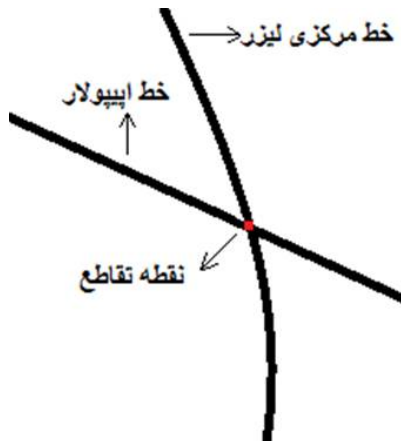
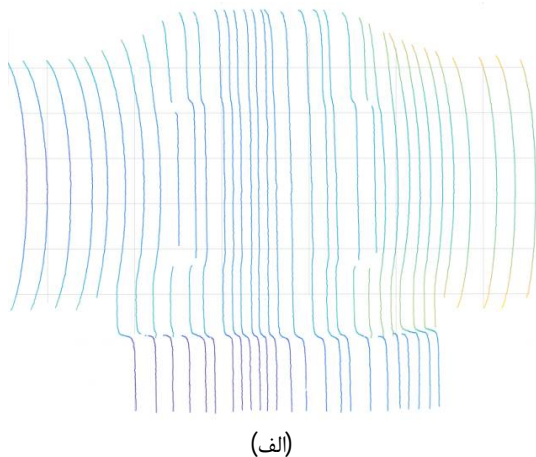
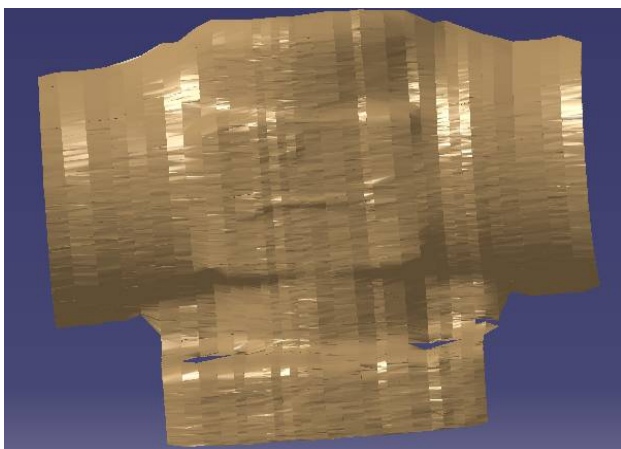


Fig. 5 Intersection of epipolar line and laser center line

شکل 5 تقاطع خط اپیپولار و خط لیزر



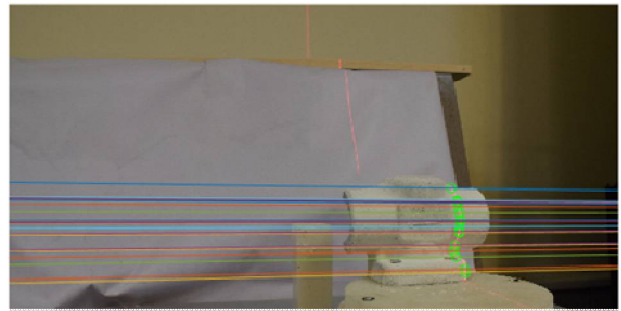
(الف)



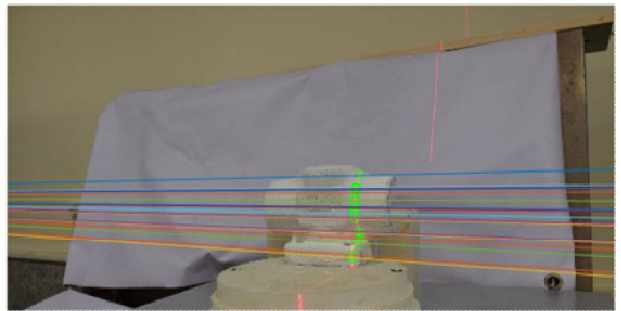
(ب)

Fig. 6 a) Point cloud, b) Surface of scanned object

شکل 6 الف) ابر نقاط، ب) سطح جسم مورد اسکن



(الف)



(ب)

Fig. 4 Epipolar lines. a) the left camera b) the right camera

شکل 4 نمایش خطوط اپیپولار. الف) دوربین راست ب) دوربین چپ

در این تحقیق با یک روش ساده و دقیق با توجه به معادله خطوط اپیپولار و خط مرکزی لیزر، تقاطع این خطوط حاصل شده است. در این روش ابتدا خط مرکزی¹ لیزر برای هر دو تصویر جستجو می‌شود. سپس خطوط اپیپولار متناظر با هر یک از نقاط لیزر در تصویر سمت چپ را بر اساس رابطه (4) محاسبه کرده و معادله این خطوط تشکیل داده می‌شود.

$$l' = F x \quad (5)$$

در این رابطه، x تصویر یک نقطه در دوربین سمت چپ و l' خط اپیپولار متناظر با نقطه x در تصویر راست می‌باشد و F ماتریس اساسی است. پس از تشکیل معادله خطوط اپیپولار، مقدار این خطوط را در صفحه تصویر سمت راست به‌ازای پیکسل‌های آن و به‌صورت گسسته پیدا کرده و در با جستجوی نقطه مشترک این خطوط و خط مرکزی لیزر در تصویر سمت راست که از قبل به‌صورت آرایه‌ای از پیکسل‌های گسسته مشخص شده بود، نقاط تقاطع آن‌ها که همان نقاط متناظر هستند، مانند شکل 5 معلوم می‌شود. سرعت و دقت این روش وابسته به شکل قطعه و پروفایل لیزر نیست و دقتی کمتر از یک پیکسل دارد. برای اینکار با تنظیم لیزر بر روی جسم طوری که کل سطح جسم را جاروب کند، از آن عکس گرفته می‌شود. با الگوریتم‌های فیلترینگ و لبه-یابی، خط مرکزی لیزر جستجو می‌شود.

با معلوم بودن خطوط اپیپولار و خط لیزر برای دو تصویر،

¹ Center line

از دقت در اینجا، نزدیکی مقدار اندازه‌گیری شده به مقدار واقعی یا مقدار مرجع پذیرفته شده است. تکرارپذیری نتایج بین اندازه‌گیری‌های مختلف از یک جسم یکسان با روش اندازه‌گیری یکسان، در شرایط مشابه را بررسی می‌کند. تجدیدپذیری نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف از یک جسم یکسان با روش اندازه‌گیری یکسان، تحت شرایط متفاوت را بررسی می‌کند. عدم قطعیت محدوده احتمالی است که کمیت تحت اندازه‌گیری در آن قرار دارد [20].

در این تحقیق برای بررسی دقت، تکرارپذیری و تجدیدپذیری سیستم، استاندارد ISO 5725-2 [21] بکار برده شده است. روش تحلیل در این استاندارد، شامل برآورد مقدار میانگین (m)، واریانس تکرارپذیری (s_p^2)، واریانس بین‌آزمایشگاهی (s_B^2)، واریانس تجدیدپذیری (s_R^2)، و دقت برای هر سطح به‌طور جداگانه است.

بررسی دقت این سیستم در پنج سطح و سه آزمایشگاه طراحی شده است. منظور از هر سطح یک شعاع مشخص از قطعه شکل 8 است. مقادیر این شعاع‌ها به وسیله دیجیتالیزر سه‌بعدی COMET5 ساخت شرکت Steinbichler آلمان، با دقت ± 10 میکرون اندازه‌گیری شده است و به عنوان مقدار مرجع پذیرفته شده است.

ترکیب هر آزمایشگاه با هر سطح، یک سلول نامیده می‌شود. در حالت کلی، یک آزمایش با p آزمایشگاه و q سطح، جدولی pq سلول را تشکیل می‌دهد که هر سلول دارای n تکرار از نتایج آزمون است.



Fig. 8 Sample used in accuracy test

شکل 8 نمونه استفاده شده در آزمایش دقت

بعد از پنج بار اندازه‌گیری از هر سطح نمونه شکل 8، در سه نوبت آزمایشگاه صبح، ظهر و شب و میانگین‌گیری از داده‌ها،

5- ساختار اسکنر پیشنهادی

این سیستم از دو دوربین دیجیتال معمولی Nikon D5300 با حسگر نوع CMOS با اندازه $23/5 \times 15/6$ میلی‌متر و رزولوشن $24/2$ مگاپیکسل، که در طول فرایند اسکن به طور ثابت قرار گرفته‌اند و یک لیزر گوسی با نور قرمز رنگ و الگوی تابش خط با طول موج 645-655 نانومتر، که به صورت دستی و یا اتومات بر روی جسم قابل تنظیم است، ساخته شده است. لیزر بر روی جسم تابیده می‌شود و همزمان که سطح جسم را جاروب می‌کند، به وسیله دوربین‌ها از جسم عکس گرفته می‌شود. با جستجوی خط لیزر در دو تصویر و تناظریابی بر اساس اصول استریو، مختصات سه‌بعدی آن به دست می‌آید. اجزا ساخت‌افزاری سیستم پیشنهادی و موقعیت تقریبی اجزا در شکل 7 نمایش داده شده است. محیط نرم‌افزاری نیز شامل نرم‌افزار Camera control pro جهت تصویربرداری، متلب جهت کالیبراسیون و تشکیل ابرنقاط جسم، کتیا جهت ایجاد سطح از ابرنقاط و نرم‌افزار rapid form برای اندازه‌گیری دقیق سطح به دست آمده، است.

6- آزمایش‌های تجربی و تعیین شاخص‌های اندازه‌گیری

در این پژوهش سعی بر این بوده است که برای ارزیابی سیستم ارائه شده با این روش، تعداد زیادی آزمایش طراحی و انجام شود تا صحت و پایداری نتایج حاصل از این اسکنر مورد بررسی و تایید قرار گیرد. برای اینکار شاخص‌های اندازه‌گیری ایجاد شده از اسکنر به کمک استانداردهای مربوطه تعیین و مستند شده است.

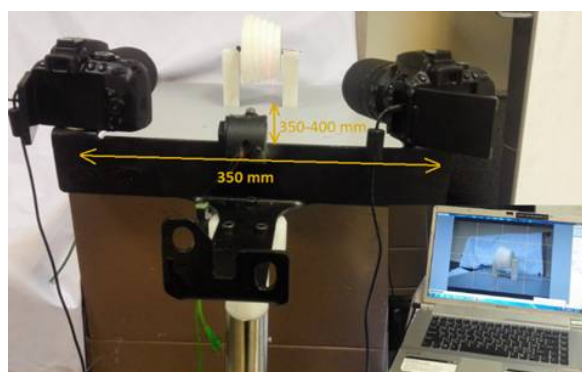


Fig. 7 Hardware components in the workspace

شکل 7 اجزای ساخت‌افزاری اسکنر پیشنهادی و موقعیت اجزا در فضای کاری

برای بررسی اسکنر فوق شاخص‌های دقت¹، تکرارپذیری²، تجدیدپذیری³ و عدم قطعیت⁴ مورد تحلیل واقع شده‌اند. منظور

¹ Accuracy

² Repeatability

³ Reproducibility

⁴ Uncertainty

بررسی عدم قطعیت این سیستم مانند آنچه در شکل 9 دیده می‌شود، در دو دوره کاری با فاصله زمانی حدود دوماهه انجام شده است. در هر دوره سه روز متوالی، اندازه‌گیری‌ها انجام گرفت. هر روز در چهار نوبت و با فاصله زمانی مساوی در طول روز، اندازه‌گیری‌ها تکرار شد. در هر نوبت نیز چهاربار متوالی اندازه‌گیری‌ها تکرار شد، که میانگین هر نوبت به عنوان یک تکرار پذیرفته شده است.

بعد از محاسبه عدم قطعیت برای هر عامل به طور جداگانه و ترکیب آن‌ها، عدم قطعیت بسط یافته در سطح اطمینان 95 درصد طبق استاندارد مربوط محاسبه شده است، که برای این سیستم $\pm 0/1647$ میلی‌متر تخمین زده شده است.

در پایان بهترین محدوده اندازه‌گیری اسکنر طراحی شده، برای قطعات استوانه‌ای با شعاع حدود 100-10 میلی‌متر بررسی شده است. هر شعاع مشخص از استوانه‌های موجود در شکل 10، چهار بار مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و میانگین آن به عنوان مقدار اندازه‌گیری شده، پذیرفته شده است و خطای آن محاسبه شده است.

بهترین نتایج برای شعاع‌های 15-35 میلی‌متر به دست آمد و تا شعاع حدود 80 میلی‌متر میانگین خطا کمتر از 0/2 میلی‌متر بوده است.

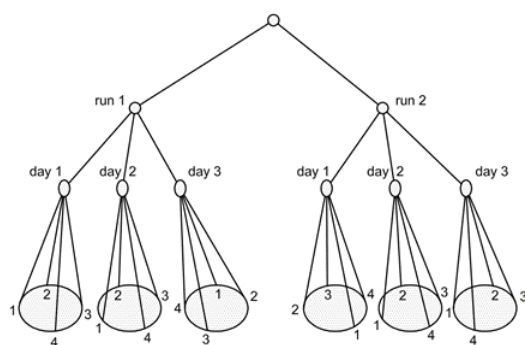


Fig. 9 Three level nested design to evaluate uncertainty [22]

شکل 9 طراحی آشیانه سه‌سطحی برای بررسی عدم قطعیت [22]



Fig. 10 The samples used in measurement range test

شکل 10 نمونه‌های استفاده شده در تست محدوده اندازه‌گیری

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با تلفیق هر دو تکنولوژی استریو و اسکنرهای

خطای سیستم برای هر سطح مطابق جدول 1 به دست می‌آید. تکرارپذیری و تجدیدپذیری سیستم نیز برطبق استاندارد ISO 5725-2 محاسبه شده و در جدول 2 گزارش شده است. طبق استاندارد مربوطه برای محاسبه واریانس تجدیدپذیری به واریانس تکرارپذیری و واریانس بین‌آزمایشگاهی نیاز است.

$$s_R^2 = s_r^2 + s_l^2 \quad (6)$$

در این رابطه اگر مقدار s_l^2 منفی شود، باید صفر منظور شود، که در این آزمایش برای هر پنج سطح طبق محاسبات مقدار منفی به دست آمد و در نتیجه صفر در نظر گرفته شده است.

برای بررسی عدم قطعیت از استاندارد ISO/TS 21749 [22] استفاده شده است. به علت قابل تکرار بودن اندازه‌گیری با این روش، عدم قطعیت نوع A اعمال شده است. در ارزیابی نوع A، بررسی عدم قطعیت بر اساس آنالیز آماری مشاهدات می‌باشد. این ارزیابی هم خطاهای تصادفی و هم خطاهای سیستماتیک را می‌تواند اعمال کند.

برای ارزیابی عدم قطعیت، ابتدا باید منابع عدم قطعیت سیستم شناسایی گردد. عوامل تاثیرگذار عدم قطعیت این سیستم، شرایط محیطی مانند نور، دما و ... (که در قالب نقش زمان در عدم قطعیت بیان شده است) و همچنین تغییر مکان و فاصله نسبت به اسکنر (که در قالب خطای بایاس پیکربندی بیان شده است) برآورد شده است. برای تعیین و جبران عدم قطعیت ناشی از این عوامل یک آزمایش آشیانی سه‌سطحی طراحی شده است.

جدول 1 مقدار میانگین و خطا برای هر سطح

Table 1 the average value and error for each level

سطح آزمایش	میانگین کل	مقدار مرجع	مقدار خطا
1	55/1303	54/9700	0/1603
2	60/1663	60/0500	0/1163
3	65/2356	65/0500	0/1856
4	70/2083	70/0000	0/2083
5	75/1817	75/0000	0/1817

جدول 2 مقدار واریانس تکرارپذیری و تجدیدپذیری برای هر سطح

Table 2 repeatability and reproducibility variance for each level

سطح آزمایش	واریانس تکرارپذیری	واریانس بین آزمایشگاهی	واریانس تجدیدپذیری
1	0/0462	0	0/0462
2	0/0812	0	0/0812
3	0/0750	0	0/0750
4	0/0886	0	0/0886
5	0/0429	0	0/0429

- Stereo Vision System for HD resolution disparity map, *Proceedings of the British Machine Vision Conference. BMVA Press*, September 2014.
- [6] B. Sandro, B. Andrea, Stereo Vision and Laser Stripers for Three- Dimensional Surface Measurement. *XVI Congreso internacinal de ingenieria grafica*, 2004.
- [7] M. Levoy, The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues , *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 131-144, 2000.
- [8] J. Vilaca, J. Fonseca, A. Pinho, Calibration Procedure for 3D Measurements using Stereo Vision and Laser Stripe, *IECON 2006- 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2006.
- [9] M. Lelas, T. Pribanić, Accurate stereo matching using pixel normalized cross correlation in time domain, *Automatika, Journal for control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, pp. 46-57, 2017.
- [10] F. Blais, Review of 20 years of range sensor development. *Journal of electronic imaging* 13(1), pp. 231-240, January 2004.
- [11] J. Aguilar, F. Torres, M. Lope, Stereo vision for 3D measurement: accuracy analysis, calibration and industrial applications. *Elsevier Science Ltd, Measurement*, Vol. 18, No. 4, pp. 193-200, 1996.
- [12] Z. Lv, Z. Zhang, Build 3D Scanner System based on Binocular Stereo Vision, *Jornal of Computers*, 7, NO. 2, pp. 399-404, February 2012.
- [13] T. Lin, Resolution adjustable 3D scanner based on using stereo cameras, *IEEE 2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association (APSIPA)*, 2013.
- [14] M. Ares, S. Royo, Low-cost 3D Scanning Technology Based on Active Stereo vision, *Proceedings of the Colour and Space in Cultural Heritage session at the Denkmäler 3D Conference*, 2014.
- [15] A. Harjoko, R. Muhammad Hujja, L. Awaludin, Low-Cost 3D Surface Reconstruction using Stereo Camera for Small Object, *IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, 2017.
- [16] S. Barone, P. Neri, A. Paoli, A.V. Rationale, structured light stereo catadioptric scanner based on spherical mirror, *Optics and Laser in Engineerig*, Vol. 107, pp. 1-12, August 2018.
- [17] S. Martínez-Pellitero, E. Cuesta, S. Giganto, J. Barreiro, New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge, *Optics and Laser in Engineerig*, Vol. 110 pp. 193-206, November 2018.
- [18] R. Hartly, A. Zisserman, *Multiple view geometry in*
- لیزری، یک اسکنر استریویی فعال برنامه‌ریزی و طراحی شده است که از خط لیزر برای یک تناظریابی دقیق بهره می‌برد. مهم‌ترین مزایای این اسکنر در مقایسه با اسکنرهای قدیمی‌تر را می‌توان به سادگی، انعطاف‌پذیری، رفع مشکلات نقاط انسداد، ارزان‌قیمت بودن و دقت بالا اشاره کرد.
- با تحلیل آماری اندازه‌های به دست آمده از دستگاه، شاخص‌های استاندارد آن برای اندازه‌گیری تعیین شده است. در محدوده اندازه‌گیری نمونه‌هایی به شعاع 10-100 میلی‌متر، برای نمونه‌های با شعاع کمتر از 80 میلی‌متر، میانگین خطا کمتر از 0/2 میلی‌متر است. بررسی دقت و تکرارپذیری و تجدیدپذیری برای پنج سطح استوانه‌ای به شعاع 55-75 بررسی شده است که ماکزیمم خطای سیستم برای این سطوح 0/2083 میلی‌متر است، همچنین بدترین واریانس تکرارپذیری و تجدیدپذیری از میان پنج سطح آزمایش، 0/0886 میلی‌متر می‌باشد. عدم قطعیت این سیستم نیز $\pm 0/1647$ در سطح اطمینان 95 درصد، تخمین زده شده است.
- با توجه به میانگین خطا کمتر از 0/2 میلی‌متر در اندازه‌گیری انجام‌شده با سیستم پیشنهادی، نتایج گویای دقت قابل قبول برای استخراج ابعاد قطعات کوچک صنعتی می‌باشد.
- برای ادامه کار توصیه می‌شود از دوربین‌های صنعتی به جای دوربین‌های معمولی استفاده شود، که قطعاً باعث افزایش دقت کالیبراسیون و دقت نهایی اسکن خواهد شد. استفاده از پروژکتور به جای لیزر خطی، می‌تواند تعداد عکس‌ها و زمان اسکن را کاهش دهد. همچنین اسکن 360 درجه قطعات مورد بررسی قرار گیرد و اثرات رجیستر کردن ابرنقاط بر روی دقت و دیگر شاخص‌های سیستم، لحاظ گردد.

8- مراجع

- [1] *Reverse Engineering of Physical Objects-Teaching Manual*. www.creaform3d.com, March 2014.
- [2] J. Davis, X. Chen, A laser range scanner designed for minimum calibration complexity, *IEEE International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 9198, 2001.
- [3] V. Raja, K. Fernands, *Reverse Engineering An Industrial Springer Series in Advanced Manufacturing*, London 2008.
- [4] C. Bender, K. Denker, M. Friedrich, K. Hirt, G. Umlauf, A Hand- held Laser Scanner based on Multi-camera Stereo-matching, *Visualization of Large and Unstructured Data Sets Workshop 2011*, pp. 123-133, 2011.
- [5] J. Chang, J. Jeong, D. Hwang, Real-time Hybrid

- [21] *ISO, Implementation of ISO 5725-2, Accuracy (trueness and precision) of : rmeasurement :methods and results*, ISO 1994.
- [22] *ISO, Measurement and uncertainty for metrological applications - Repeated measurements and nested experiments*, ISO/TS 21749,2005(E).
- computer vision*, Cambridge University Press, Second Edition, 2004.
- [19] www.Wikipedia.org. Chessboard detection.
- [20] *NPL, A Beginner's Guide to Measurement Good Practice Guide No. 118*, Queen's Printer and Controller of HMSO, 2010.