



طراحی و ساخت ضخامت سنج لیزری و بررسی تأثیر تغییرات عمق اسکن و شدت نور محیط بر دقت ابرنقاط خروجی

سیدرضا حمزه لو^{1*}، امیر رفاهی اسکویی¹، مصطفی ورمزیار¹

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

*تهران، صندوق پستی 1678815811، rehazeloo@sru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 5 آذر 1397 پذیرش: 20 خرداد 1398 ارائه در سایت: بهمن 1398	در این تحقیق، با ارائه و تشریح روشی مبتنی بر تکنیک مثلث‌بندی در روش نورساختار یافته، گزارشی از طراحی و ساخت یک دستگاه ضخامت سنج غیرتماسی اپتیکی ارزان قیمت با استفاده از منبع نور لیزر با الگوی خطی و با دقت اندازه‌گیری قابل قبول $\pm 0/1$ mm ارائه شده است. بمنظور ارزیابی نحوه تأثیر تغییرات پارامترهای عمق اسکن و شدت نور محیط بر فرایند اندازه‌گیری و دقت ابرنقاط خروجی دستگاه و تعیین مقادیر بهینه آن، آزمون‌های لازم طراحی و اجرا گردیده شد. تجهیزات سخت افزاری مورد استفاده شامل یک منبع نورخطی لیزر 5 میلی وات و یک دوربین وب کم و میکروکنترلر برد Arduino به همراه سنسور سنجش شدت نور محیط GY-30 بوده و بخش پردازش تصویر و محاسبات تولید و بازسازی ابرنقاط تحت نرم‌افزار متلب و ارزیابی دقت ابعادی مدل ابرنقاط حاصله از عملیات اسکن و مقایسه با قطعه مرجع در نرم‌افزار Geomagic Qualify صورت پذیرفته است.
کلیدواژگان: ابرنقاط اندازه‌گیری ابعادی پردازش تصویر عمق اسکن لیزر	

Design and construction of laser thickness measurement device and analysis the effect of variation of the scanning depth of field and ambient light intensity on the accuracy of point cloud

Seyed Reza Hamzeloo^{1*}, Amir Refahi Oskoui¹, Mostafa Varmazyar¹

1- Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1678815811, Tehran, Iran, rehazeloo@sru.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 26 November 2018
Accepted 10 June 2019
Available February 2020

Keywords:

Point Cloud
Dimensional Measurement
Laser
Image Processing
Scanning Depth of Field

Abstract

In this paper design and construction of a low-budget non-contact optical measuring device by laser light source with acceptable accuracy of ± 0.1 mm based on optical triangulation method in structure light technique is presented. Essential tests for analyzing the effect of variation in scanning depth of field and ambient light intensity on the resulted point-cloud accuracy and recognition of the optimum values were carried out. The applied hardware equipment consists of an Arduino board microcontroller, web camera, 5mW laser light source with linear pattern and light intensity measuring sensor GY-30. Also Matlab software is used for proposed technique implementation, as an analyzer for captured data from microcontroller, image processing, point-cloud generation in VRML format. Assessing the accuracy of point cloud models and comparison with reference object is done in Geomagic Qualify software. Results showed the direct impact of studied parameters on final accuracy in thickness measurement, and the necessity of determination of the optimal values.

1- مقدمه

بعدی اپتیکی با دستیابی به ابرنقاط¹ حاصل از عملیات اسکن قطعه مورد نظر و محاسبه موقعیت میان این نقاط و بازسازی آنها قابل انجام است.
بطور کلی ابزارهای اندازه‌گیری مختصات² به دو گروه تماسی

بدیهی است که انجام عملیات اندازه‌گیری بصورت خودکار، غیرتماسی و درعین حال با هزینه پایین، کاربرد وسیعی در اتوماسیون صنعتی، عملیات مهندسی معکوس، کنترل کیفی محصول، بازرسی عیوب، طراحی، هنر، مستندسازی اشیاء و ... خواهد داشت. این عملیات توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری سه

¹ PointCloud

² Coordinate Mesuring

Please cite this article using:

S. R. Hamzeloo, A. Refahi Oskoui, M. Varmazyar, Design and construction of laser thickness measurement device and analysis the effect of variation of the scanning depth of field and ambient light intensity on the accuracy of point cloud, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 9, pp. 37- 44, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از اسکنر لیزری داشتند. اسکنر آنها نیز از تکنیک مثلث سازی جهت ثبت تصاویر لایه‌ای و تجمع و تبدیل به سطح سه بعدی بهره می‌برد و آنها الگوریتم خود را با استفاده از رگرسیون خطی شبیه سازی نمودند و با کالیبراسیون و جابجایی لیزر و دوربین خود در جهت بهبود دقت تصویر بررسی نمودند [5].

رشیدی زاده و رحیمی یک اسکنر با تکنیک نور ساختار³ یافته ساختند که با استفاده از تابش نور با کمک یک پروژکتور مخصوص بر روی جسم و ایجاد فرینج‌ها⁴ و با کمک انتقال کد خاکستری⁵ و پردازش تصویر به دقت ابعادی $0/05 \pm$ میلی‌متر رسیده است [6]. آنها همچنین به بررسی عمق تصویر و اثر آن بر دقت تصویر اسکن در این روش پرداختند [7]. آنها با بررسی تیزی تصویر الگوی تابانده شده بر روی جسم و اندازه‌گیری نویز تولید شده و تکرار مراحل اندازه‌گیری با تغییر فوکوس دوربین توانستند حجم داده‌های دریافتی را کاهش داده و عمق تصویر بهینه کمتر از 60 سانتی‌متر را برای اسکنر خود پیشنهاد دادند. ژیونگ و همکاران تکنیک بازسازی 3 بعدی تصویر بر اساس استریوگرافی با 4 دوربین با استفاده از یک الگوی شطرنجی را ارائه دادند. آنها از یک سیستم اندازه‌گیری 4 دوربینی برای ارائه تصاویر بیشتر و توانایی اعمال قیود بیشتر بر روی تصویر استفاده نمودند تا ناسازگاری در داده‌های ابر نقاط را کاهش و دقت اندازه‌گیری تصویر سه بعدی را افزایش دهند [8].

همان‌طور که در بررسی تحقیقات گذشته مشاهده می‌شود در اغلب دستگاههای اسکن از تجهیزات گران قیمت نظیر لیزرها، دوربین‌ها، آینه و نیم آینه، پروژکتورهای خاص و ... استفاده می‌شود. بعلاوه روش‌های متنوعی به منظور بررسی عوامل مؤثر نظیر کیفیت تجهیزات و عوامل محیطی و کاهش تأثیر آنها صورت می‌پذیرد.

در این مقاله طراحی و ساخت یک دستگاه ضخامت سنج لیزری کاربردی با هزینه پایین شامل فقط یک لیزر ارزان قیمت و یک دوربین وب، و با بهره‌گیری از تکنیک مثلث‌سازی و پردازش تصویر ابر نقاط برای رسیدن به دقت مناسب $0/1 \text{ mm} \pm$ ارائه شده است. از سوی دیگر بررسی تأثیر پارامترهای محیطی عمق اسکن و شدت نور بر دقت ابرنقاط خروجی از مهم‌ترین موضوعات قابل طرح در تعریف شرایط بهینه عملکرد دستگاه محسوب می‌گردد که با بررسی تأثیر آنها بر میزان خطای اندازه‌گیری، محدوده مناسب آنها پیشنهاد

و غیرتماسی و براساس ضرورت تماس پراب¹ با قطعه مورد نظر جهت جمع‌آوری داده تقسیم‌بندی می‌شوند. باوجود مزیت نسبی اندازه‌گیری نوع تماسی (نظیر ماشین‌های CMM) در دقت بالای ابرنقاط تولیدی، محدودیت‌هایی نظیر سرعت پایین عملیات اسکن، هزینه بالای ساخت و نگهداری و آنکه سطوح اجسام نرم به راحتی در تماس با پراب دستگاه تغییرشکل داده که این خود موجب بروز خطا در عملیات خواهد شد، در این نوع اسکنرها به چشم می‌خورد. از سوی دیگر، سرعت بالای عملیات جمع‌آوری داده، رزولوشن بالا، امکان اندازه‌گیری در ابعاد بزرگتر و در عین حال قابل حمل بودن دستگاه از مزیت‌های نوع غیرتماسی محسوب می‌شود، به گونه‌ای که عملیات اندازه‌گیری در آنها بدون تماس فیزیکی پراب با قطعه صورت می‌پذیرد.

دستگاه‌های نوع غیرتماسی به دو نوع فعال و غیرفعال² بر اساس امکان و عدم امکان تابش و یا پرتوافکنی از ناحیه خود دستگاه تقسیم‌بندی شده و دو تکنیک مثلث‌بندی و نور ساختاریافته از روش‌های پرکاربرد اندازه‌گیری به کمک نور در نوع فعال محسوب می‌گردند [1].

تاکنون طرح‌ها و روش‌های متنوعی برای اسکن دو و سه‌بعدی قطعات و اجسام مختلف ارائه شده و تلاش‌های زیادی در جهت بهبود کیفیت تصاویر در این سیستمها صورت گرفته است [2].

دیویس و همکاران از یک روش با دو دوربین دقیق و دو آینه به‌همراه یک لیزر ارزان قیمت در اسکنر خود بهره بردند و ادعا نمودند که حداقل میزان کالیبراسیون با این روش بدست آمده است. آنها با این سیستم توانستند در محدوده وسیعی اسکن کرده و فقط موقعیت آینه‌ها و دوربین را با حداقل کالیبراسیون تغییر دهند [3]. تائو و همکاران با ارائه یک روش ساده و کاربردی میزان خطای اسکنر خود را با اندازه‌گیری یک گیج بلوک استاندارد بدست آوردند. اسکنر لیزری آنها شامل یک لیزر و دو دوربین CCD بوده و از تکنیک مثلث‌سازی ابر نقاط را بدست آورده و از روی آن مدل‌سازی کردند. با مقایسه داده‌های مدل ساخته شده در نرم‌افزار Geomagic Qualify با مدل یک بلوک دقیق کالیبره شده، خطای اسکنر خود را براساس مدل کنترل کیفی 2s محاسبه نمودند و 95/7% از داده‌ها در محدوده خطای $0/04 \pm$ قرار گرفت [4]. امام و خلیلی با اعمال تکنیک نویز نرم‌افزاری سعی در بهبود مدل سطح سه‌بعدی ساخته شده

³ Structured Light⁴ Fringes⁵ Grey Code¹ Probe² Active/Passive

خواهد شد.

معادله (2) بصورت ضمنی تعریف نمود.

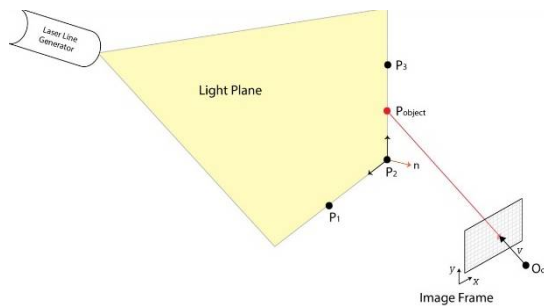


Fig. 1 The generation of point by intersecting scan line and light plane [10]

شکل 1 ایجاد نقطه در اثر برخورد پرتو اسکن با صفحه نور [10]

هرچند که با داشتن مختصات سه نقطه از صفحه، می توان با تشکیل دو بردار و محاسبه حاصلضرب خارجی آنها مطابق رابطه (3) به بردار نرمال صفحه نیز دست یافت. این عملیات طی فرایند کالیبراسیون سنسورهای اسکنر انجام خواهد گرفت [11].

$$Plane = \{P : n'(p_{Object} - p_i)\} \quad (2)$$

صفحه لیزر

$$n = (p_1 - p_2) \times (p_2 - p_3) \quad (3)$$

بردار نرمال صفحه

حال با قرار دادن معادله خط عبوری از فریم دوربین در معادله صفحه نور مطابق معادله زیر می توان مقدار لاندا را بدست آورد [12].

$$n'(\lambda v + o_c - p_i) = 0 \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{n'(p_i - o_c)}{n'v} \quad (5)$$

2-1- دستگاه های مختصات و کالیبراسیون سیستم

موقعیت هر سه جزء مستقل دوربین دیجیتال، منبع نور و موضوع تحت اسکن، ابتدا در دستگاه های مختصات محلی متعلق به خود تعریف می شوند. محاسبه و تولید ابرنقاط مدل سه بعدی مستلزم یکپارچه سازی و مرتبط نمودن دستگاه های مختصات است. بطور مثال بدون ارتباط برقرار کردن معادله صفحه نور تابانده شده از سوی منبع لیزر با معادله پرتو دریافتی در فریم دوربین، دستیابی به محل تقاطع صفحه و خط، بمنظور تعیین مختصات ابرنقاط، قابل محاسبه نخواهد بود.

یکپارچه سازی دستگاه های مختصات بطور کلی با منطبق سازی دستگاه ها بوسیله دو عملیات انتقال و دوران صورت می پذیرد (شکل 2). این امر با دستیابی به پارامترهای بردار

2- مبانی ریاضی

در اغلب روش های اشاره شده از ابر نقاط برداشت و پردازش شده جهت بدست آوردن داده های مورد نیاز استفاده می شود. نقاط، مواد تشکیل دهنده ابرنقاط مدل سه بعدی می باشند. از منظر ریاضیات و هندسه، نقطه می تواند از تقاطع خط و صفحه و یا تقاطع دو خط بوجود آید. و این امر، شاکله اصلی روش مثلث بندی در تکنیک نورساختاریافته است. از این رو بهره گیری از منابع نور جهت ایجاد ستون یا صفحه نور می تواند در پیاده سازی روش مثلث بندی بمنظور تشکیل نقاط بکار گرفته شود. آنچنان که در زمان استفاده از صفحه نور، از منظر فریم دوربین برای هر یک از پیکسل های متعلق به آن صفحه، پرتویی تخمین زده و محل تقاطع آن با صفحه نور، تعیین کننده مختصات نقطه ایجاد شده می باشد. بسته به نوع پیکربندی سنسورهای ضخامت سنج اپتیکی (منبع نور و دوربین دیجیتال) که بنا به شرایط کاربردی می توانند نسبت به هم موقعیت ثابت و یا احیاناً متحرکی داشته باشند، مسئله تعیین و کشف معادلات خط و صفحه تاحدودی متنوع می باشد [9].

بکارگیری اصل تشکیل یک نقطه با استفاده از تقاطع خط و صفحه، ایده اصلی و کاربردی مورد استفاده در طراحی فرایند اندازه گیری سه بعدی و ایجاد ابرنقاط است. هر نقطه سه بعدی قابل رویت از منظر فریم دوربین، توسط یک بردار منحصر به فرد عبوری از مرکز کانونی دوربین و یک پیکسل از صفحه تصویر تشخیص داده می شود. حال برای تعیین دقیق مختصات آن نقطه سه بعدی می بایست محل تقاطع این بردار را با صفحه ای که شامل آن نقطه نیز می شود بدست آید. با فرض استفاده از منبع نور لیزر جهت ایجاد یک صفحه نور، می توان با قرار دادن صفحه نور بر روی سطح موضوع مورد اندازه گیری، این ایده را پیاده سازی نمود [10].

مطابق شکل 1، با داشتن مختصات نقطه کانونی و مرکزی دوربین (Oc) و همچنین بردار یکه متعلق به پیکسل مشاهده شده از موضوع اسکن در فریم دوربین (v)، می توان معادله خط عبوری را تعیین نمود. با توضیح آنکه مسئله اصلی، تعیین مقدار دقیق ضریب لاندا جهت محاسبه طول بردار می باشد.

$$Line = \{p_{Object} = o_c + \lambda v : \lambda \in R\} \quad (1)$$

خط عبوری از فریم دوربین

از سوی دیگر با بدست آوردن مختصات دو نقطه متعلق به صفحه نور و بردار نرمال آن، می توان معادله صفحه را مطابق

هدف از انجام عملیات کالیبراسیون دوربین، دسترسی به پارامترهایی است که در بخش مدل عمومی پین‌هل طرح شده است [14]. این پارامترها شامل پارامترهای ذاتی² : فاصله کانونی³، نقطه اصلی⁴ و ضرائب مقیاس⁵ و همچنین پارامترهای عارضی⁶ : ماتریس دوران و بردار انتقال نگاشت بین دستگاه‌های مختصات عمومی و دوربین می‌باشند. در کل، 11 پارامتر (5 پارامتر ذاتی و 6 پارامتر عارضی) می‌بایست جهت تخمین صحیح اعوجاج لنز دوربین در فرایند کالیبراسیون بدست آید. جهت انجام عملیات کالیبراسیون اولیه وقیل از بررسی پارامترها، مطابق با روش ژانگ، یک صفحه الگوی شطرنجی به ابعاد هریک از مربع‌های سیاه و سفید آن 2 سانتی‌متر بعنوان موضوع کالیبراسیون مطابق شکل 3 استفاده شد و بر طبق روش ژانگ مطابق شکل 4 در 25 زاویه و جهت مختلف قرار گرفته و عکس‌برداری از آنها توسط دوربین صورت گرفت.

به‌منظور بررسی پارامترها نیز در جعبه ایزوله ساخته شده کالیبراسیون مجزایی با صفحات مرجع متعامد صورت می‌پذیرد. پس از طی مراحل پردازش تصاویر فوق، گوشه مربع‌های شطرنجی سیاه و سفید مطابق شکل 5 در صفحه تصویر و یا فریم دوربین تشخیص داده می‌شوند. این مرحله به‌منظور آن است که نحوه نگاشت مختصات سه‌بعدی نقاط متعلق به یک صفحه تخت با ابعاد معین، در زوایا و جهات مختلف به مختصات صفحه تصویر تشخیص داده شود.

حال با داشتن اطلاعات جدول 1 مختصات سه‌بعدی هر نقطه متعلق به صفحه لیزر تابنده شده بر روی صفحات مرجع متعامد در دستگاه مختصات دوربین بر طبق روابط (7) و (8) محاسبه شده است.

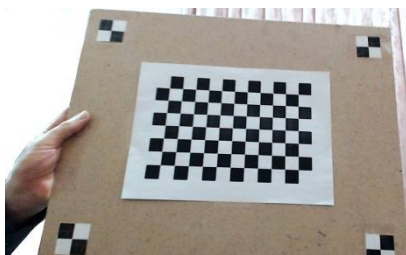


Fig. 4 Laser calibration plane

شکل 3 صفحه کالیبراسیون لیزر

انتقال و ماتریس دوران نسبت به دستگاه مرجع انجام می‌گیرد. با توجه به روش‌های متنوع توسعه داده شده جهت کالیبراسیون دوربین (نظیر روش ژانگ¹) می‌باشد [13]، که به موجب آن می‌توان به ماتریس‌های انتقال (T) و دوران (R) نسبت به صفحات کالیبراسیون دست‌یافت، معادله (6). انتخاب دستگاه مختصات دوربین به عنوان دستگاه مرجع، گزینه مناسب و کارآمدی جهت تجمیع سایر دستگاه‌ها نسبت به آن می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T \quad (6)$$

در صورتی که دو سنسور اسکنر (منبع لیزر و دوربین) نسبت به یکدیگر دارای موقعیتی ثابت باشند، می‌توان در یک مرحله عملیات کالیبراسیون، معادلات صفحه و خط مربوطه را محاسبه و استخراج و سپس آنها را در یک دستگاه مرجع تعریف نمود، و در صورتی که از منبع نور متحرک استفاده شود، بدیهی است که لازم است در طول عملیات اندازه‌گیری، برای تک‌تک موقعیت‌های صفحه نور تابانده شده، محاسبه معادله صفحه در دستگاه مرجع انجام گیرد. در این تحقیق، بمنظور تأمین امکان حمل آسان دستگاه ساخته شده، پیکربندی استاتیک مورد استفاده قرار گرفت.

بدین منظور با انجام عملیات کالیبراسیون دوربین نسبت به دو صفحه مرجع عمود بر هم که پرتوی لیزر بر روی آنها تابانده شده است، بردارهای انتقال و دوران متعلق به آن صفحات نسبت به دستگاه مختصات دوربین بدست می‌آید، که به موجب آن معادلات صفحات مرجع را در دستگاه دوربین تعریف شده و کالیبراسیون منبع نور لیزر به انجام رسیده است [14].

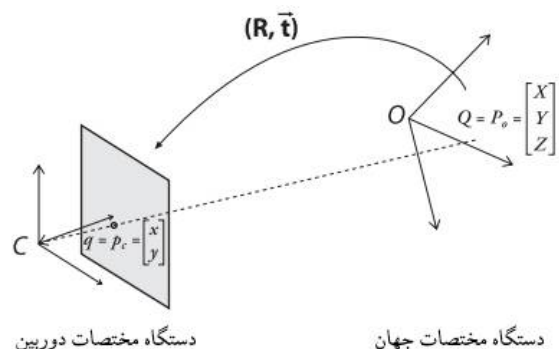


Fig. 2 Coincidence of coordinate systems

شکل 2 انطباق دستگاه‌های مختصات

² Intrinsic parameters

³ Focal length

⁴ Principal point

⁵ Scale factors

⁶ Extrinsic parameters

¹ Z. Zhang

افزای گران قیمت وجود نداشته و مطابق شکل 6 تجهیزات مورد استفاده شامل یک منبع نور لیزر ارزان قیمت 5 میلی وات با طول موج 650 نانومتر و یک دستگاه وب کم مدل Microsoft LifeCam Cinema HD می باشد. هرچند که جهت بهینه سازی نتایج بنا به شرایط کاربردی می توان انتخاب های متنوعی را اعمال نمود.

همان طور که در بخش مبانی ریاضی توضیح داده شد، کشف معادله صفحه لیزر با تشخیص چند نقطه متعلق به صفحه نور که بر روی صفحات مرجع قرار گرفته انجام شده است. از این رو مطابق شکل 7، منبع لیزر صفحه نوری را بر روی سطح صفحات مرجع متعامد می تاباند. محل تلاقی بردار پرتو دریافتی توسط دوربین و صفحه نور لیزر، بر روی صفحات مرجع قرار گرفته است. از آنجا که معادله این صفحات مرجع بدست آمده، می توان مختصات دقیق چند نقطه متعلق به صفحه نور $(P1, P2, P3, P4)$ تعیین شده است. با توجه به پیکربندی مورد استفاده در ساخت دستگاه حاضر، مبتنی بر موقعیت ثابت دوربین و منبع لیزر نسبت به یکدیگر، تعیین معادله صفحه لیزر برای یک بار کافی و با استفاده از نقاط مذکور مورد نیاز بوده است.

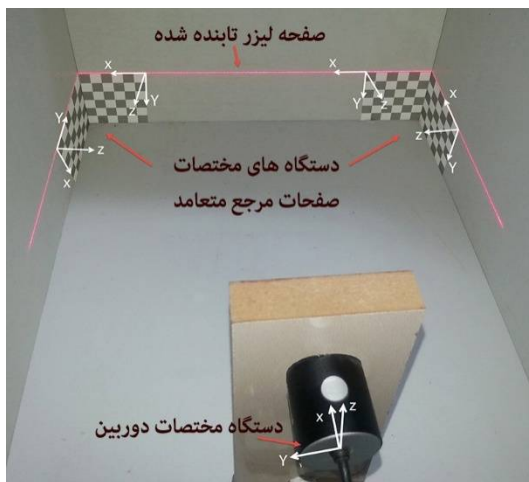


Fig. 5 Laser calibration procedure in box

شکل 5 فرایند کالیبراسیون لیزر در جعبه



Fig. 6 The equipment and view of the device

شکل 6 تجهیزات و نمایی از دستگاه ساخته شده

هدف از انجام عملیات پردازش تصویر در واقع تهیه ابزار حل

$$p_{Camera_cs} = R_1(p_{on_ref1}) + T_1 \quad (7)$$

$$p_{Camera_cs} = R_2(p_{on_ref2}) + T_2 \quad (8)$$

پس از تعریف معادله صفحه لیزر در دستگاه صفحات مرجع متعامد، امکان کشف معادله صفحه نور لیزر تابنده شده نیز ممکن شده است.

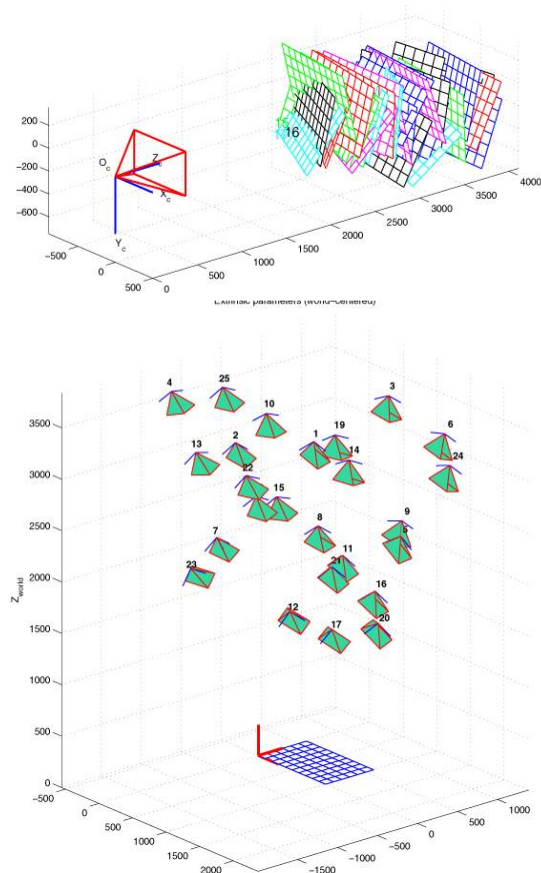


Fig. 2 Calibrating the Camera with Jang method [13]

شکل 4 کالیبراسیون دوربین با استفاده از روش ژانگ [13]

جدول 1 کالیبراسیون صفحات مرجع متعامد

Table 1 Calibration matrix for orthogonal datum planes

سطح مرجع	ماتریس دوران	بردار انتقال	
صفحه مرجع عمودی	$\begin{bmatrix} -0.0175 & 0.9995 & 0.0264 \\ 0.9052 & 0.0046 & 0.4249 \\ 0.4245 & 0.0313 & -0.9049 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -66.3916 \\ -46.6423 \\ 426.3038 \end{bmatrix}$	
	صفحه مرجع افقی	$\begin{bmatrix} 0.0376 & 0.9990 & 0.0255 \\ 0.4231 & 0.0072 & -0.9060 \\ -0.9053 & 0.0448 & -0.4224 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -68.3155 \\ 71.6296 \\ 455.3289 \end{bmatrix}$

3- پیاده سازی تکنیک

با توجه به روش معرفی شده، برای پیاده سازی تکنیک و ساخت دستگاه ضخامت سنج لیزری، ضرورتی به تأمین تجهیزات سخت

اندازه‌گیری بدست‌آمده و در این مقاله فقط به ذکر خطای اندازه‌گیری در روش ارائه شده با اندازه اصلی قطعه کار پرداخته شده است.

4-1- آزمون عمق اسکن

مطابق شکل 9 جهت انجام این آزمون لازم است قطعه در فواصل مختلفی نسبت به دستگاه، تحت اندازه‌گیری قرار گیرد [16]. در ابتدا جابجایی قطعه آزمون با گام‌های 10 سانتی‌متری تا به عمق 60 سانتی‌متر انجام شده، نمودار شکل 10 و سپس با توجه به کشف محدوده بهترین خروجی، این آزمون مطابق نمودار شکل 11، در عمق 24 الی 30 سانتی‌متری با گام‌های یک سانتی‌متری با تأمین خطای اندازه‌گیری 0/1 mm تکرار شد. مطابق انتظار و همچنین دیگر پژوهش‌های صورت گرفته [16]، با افزایش عمق اسکن به دلیل کاهش زاویه مثلث‌بندی و بروز خطای تقریب‌زنی محل تقاطع پرتوی دریافتی توسط دوربین با صفحه نور تابانده شده و همچنین محدودیت میزان تفکیک‌پذیری دوربین (پیکسل‌ها)، دقت اندازه‌گیری کاهش خواهد یافت.

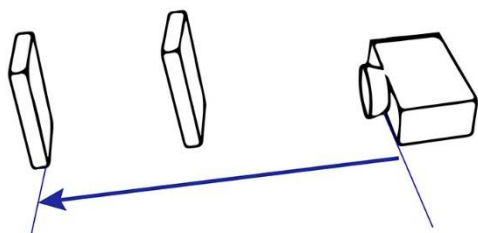


Fig. 9 Depth of scan test

شکل 9 آزمون عمق اسکن

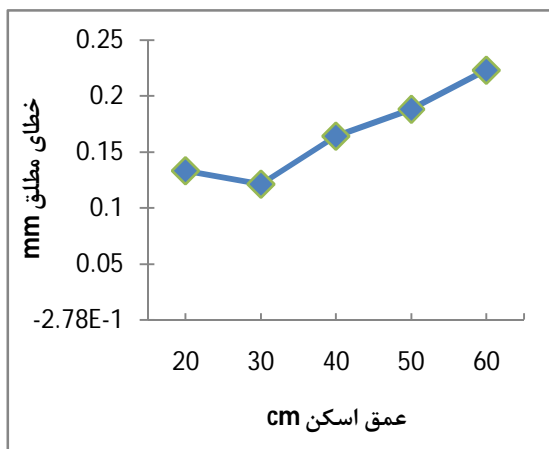


Fig. 10 The effect of various scan depths on measurement accuracy (10cm steps)

شکل 10 نمودار تأثیر تغییرات عمق اسکن بر دقت اندازه‌گیری (گام 10 سانتی‌متر)

دو مسئله کشف معادله صفحه نور تابانده شده، و معادله بردارهای متعلق به نقاط سطح قطعه تحت اندازه‌گیری توسط دوربین می‌باشد. این امر با تشخیص نقاط و یا پیکسل‌های کلیدی روی سطح قطعه طی عملیات پردازش تصویر براساس روش تشخیص پیکسل‌های مرزی (نظیر روش J CANNY) [15] مطابق شکل 8 صورت پذیرفته است.

4- آزمون تأثیر پارامترها بر عملکرد دستگاه

برای ارزیابی عملکرد دستگاه ساخته شده و همچنین تعیین شرایط بهینه کاربردی آن، بررسی تأثیر تغییرات عمق اسکن (فاصله قطعه از دستگاه) و همچنین شدت نور محیط بر ابرنقاط خروجی از دستگاه، طی این مرحله از پژوهش در یک جعبه ایزوله و با کالیبراسیون صفحات مرجع متعامد به انجام رسید. کلیه مراحل محاسباتی توسط نرم‌افزار متلب انجام گرفته و عملیات اصلاح و ویرایش ابرنقاط بدست آمده (کاهش نویز، انطباق‌دهی، و تجمیع مدل‌های ابرنقطه بدست آمده در هر مرحله از اسکن و مش‌بندی سطح) توسط نرم‌افزار Geomagic Studio و اندازه‌گیری و مقایسه ابعادی مدل ابرنقاط با ابعاد واقعی موضوع در نرم‌افزار Geomagic Qualify صورت پذیرفت.

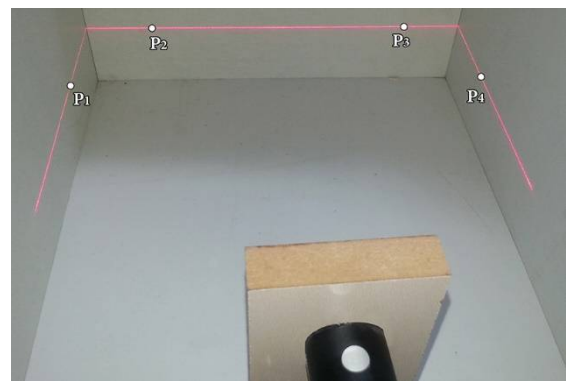


Fig. 7 Selecting 4 points of Laser plane

شکل 7 انتخاب چهار نقطه متعلق به صفحه نور لیزر



Fig. 8 Processing the image of extracted boundary pixels [15]

شکل 8 عملیات پردازش تصویر استخراج پیکسل‌های مرزی [15]

لازم به ذکر است که اندازه اصلی ضخامت قطعه مورد اندازه‌گیری در ابتدا با میکرومتر با دقت 0/01 میلی‌متر و با سه بار

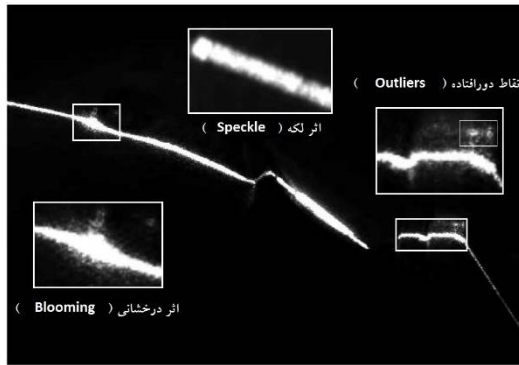


Fig. 12 Visual light error samples

شکل 12 نمونه اثرات نوری ایجاد خطا [2]

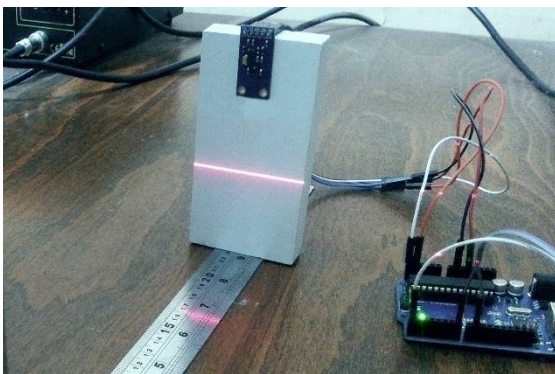


Fig. 13 Applying light intensity sensor to investigate lux effect on accuracy

شکل 13 بکارگیری سنسور سنجش شدت نور محیط جهت ارزیابی تأثیر آن بر دقت اندازه گیری

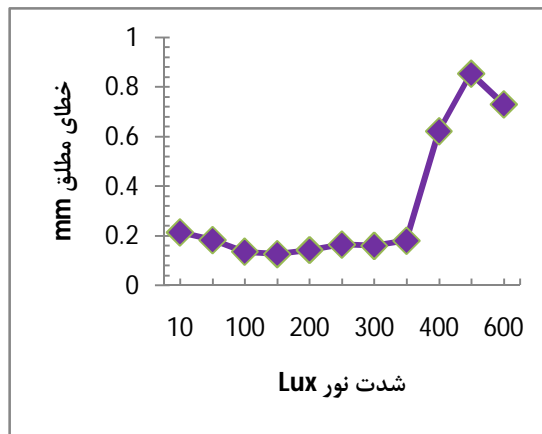


Fig. 14 The effect of Variation of ambient light intensity on measurement accuracy

شکل 14 نمودار تأثیر تغییرات شدت نور محیط بر دقت اندازه گیری

5- نتیجه گیری

در این مقاله نحوه عملکرد دستگاه ضخامت سنج لیزری ساخته شده متشکل از منبع نور لیزر به عنوان منبع نور خطی، دوربین جهت ضبط داده‌ها، میکروکنترلر برد Arduino تشریح شد. پس

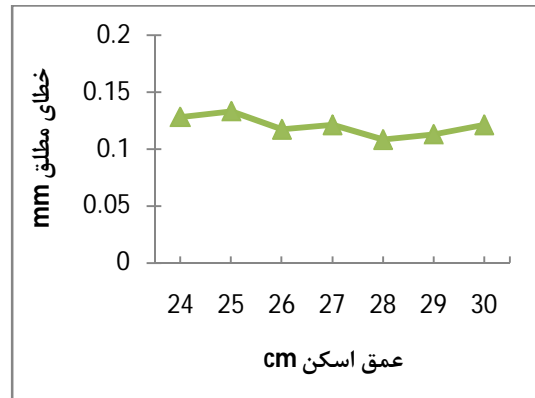


Fig. 11 The effect of various scan depths on measurement accuracy (1cm steps)

شکل 11 نمودار تأثیر تغییرات عمق اسکن بر دقت اندازه گیری (گام 1 سانتی متر)

بعلاوه در فواصل خیلی نزدیک نیز اندازه گیری دارای خطا می باشد. بهترین عمق اسکن از لحاظ استخراج خطای کمتر بر طبق شکل 10 مابین 20 تا 30 سانتی متر و بر طبق شکل 11 که رزولوشن گامها دقیق تر می باشد در فاصله 28 تا 30 سانتی متر با خطای اندازه گیری کمی کمتر از 0/1 mm بدست آمد.

4-2- آزمون شدت نور محیط

با توجه به اهمیت به حداقل رسانی میزان اثرات نوری ایجاد خطا (نویز) در تصاویر دریافتی توسط دوربین (نظیر اثر speckle, blooming و ...) (شکل 12) لازم است پیش از انجام عملیات پردازش تصویر و استخراج خطوط مرزی تصویر نور تابانده شده بر روی قطعه، شرایط بهینه تعیین گردد [2].

بدین منظور مطابق با شکل 13 با استفاده از سنسور اندازه گیری شدت نور محیط و طراحی مدار مناسب تحت میکروکنترلر برد Arduino، و استفاده از ویدیوپروژکتور به عنوان منبع نور محیطی قابل کنترل، آزمون ارزیابی تأثیر این پارامتر بر دقت ابرنقاط خروجی دستگاه انجام گرفت.

این بررسی طی 11 گام از شدت نور 10 لوکس تا 600 لوکس با اختلافهای 50 لوکس در عمق بهینه بدست آمده از بخش قبل (آزمون عمق اسکن) صورت پذیرفت. مطابق نمودار شکل 14 با افزایش شدت نور محیط و غلبه بر پرتوی نور لیزر و بروز نویزها، دقت اندازه گیری کاهش می یابد به نحوی که در شدت نور بیش از 350 لوکس، وضوح تصویر پرتوی لیزر بر روی سطح قطعه بسیار کاهش یافت. بدین منظور شدت نور مناسب کاربردی میان 100 الی 200 لوکس جهت حصول خطای کمتر تعریف شد.

- [5] *Software and Networks (ICCSN)*, Xi'an, China, 27-29 May, 2011.
- [6] S. M. Emam, K. Khalili, Improving the accuracy of laser scanning using a soft technique, *Modares Mechanical engineering Journal*, Vol. 13, No. 9, pp. 77-91, 2013 (in Persian).
- [7] H. Rashidzad, A. Rahimi, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 035001-4, 2014.
- [8] H. Rashidzad, A. Rahimi, Effect of scanning depth of field on the measurement noises of developed fringe projection 3D scanning system, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 624, pp. 322-326, 2014.
- [9] J. Xiong, S.Zhong, , Y. Liu, & L. Tu, Automatic three-dimensional reconstruction based on four-view stereo vision using checkerboard pattern. *Journal of Central South University*, Vol. 24, No. 5, pp. 1063-1072, 2017.
- [10] JY. Bouguet, *Visual methods for three-dimensional modeling*, PhD dissertation, California Institute of Technology, California, 1999.
- [11] D. Lanman, G. Taubin, Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners, *In ACM SIGGRAPH, Courses*, p.1-94, New Orleans, Louisiana, 2009.
- [12] JY. Bouguet and P. Perona, 3D photography on your desk, *Sixth IEEE International Conference on Computer Vision*, Narosa Publishing House, pp. 43-50, New Delhi, India, Jan 4, 1998.
- [13] JY. Bouguet, P. Perona, 3D photography using shadows in dual-space geometry, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 35, No. 2, pp. 129-149, Nov./Dec. 1999.
- [14] Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, pp. 1330-1334, Nov 22, 2000.
- [15] JY. Bouguet, Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.28,40,52, 2004.
- [16] J. Canny, A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, pp.679-698, Nov 6, 1986.
- [17] N. Van Gestel, S. Cuyper, P. Bley, JP. Kruth, A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 336-42, Apr 30, 2009.

از کالیبراسیون با روش ژانگ، ابرنقاط حاصل از تقاطع خط پرتو اسکن و صفحه نور بر روی قطعه با تکنیک مثلث‌سازی برداشت شده و پس از انتقال به رایانه و در نرم‌افزار، عملیات پردازش داده‌ها، انتقال و دوران در سیستم مختصات انجام گرفته و ضخامت قطعه اندازه‌گیری ارائه شده است. بنا بر نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش‌ها و با استفاده از تکنیک پردازش تصویر خطوط مرزی نور تابانده شده که در قسمت پیاده‌سازی تکنیک تشریح شده، در مورد دستگاه ضخامت‌سنج لیزری با وجود هزینه پایین سخت افزار مورد نیاز، توانایی رسیدن به دقت اندازه‌گیری مناسبی با تolerانس ابعادی در حدود $\pm 0/1 \text{ mm}$ بررسی و ارائه شد.

بعلاوه با توجه به تأثیر مستقیم تغییرات عمق اسکن و شدت نور محیط بر ایجاد نویزها و کاهش دقت ابعادی نتایج، انجام آزمون‌های لازم جهت تعیین شرایط بهینه کاربردی ضروری بوده و در این تحقیق انجام گرفت. نشان داده شد که کمترین خطای اندازه‌گیری برای این مجموعه در عمق 28 سانتی‌متر اسکن و با شدت نور مابین 100 تا 200 لوکس بدست می‌آید. محدوده مناسب پیشنهادی برای دستگاه ساخته شده در مورد پارامتر عمق اسکن، در محدوده 26 تا 30 سانتی‌متر و در مورد پارامتر شدت نور محیطی، به میزان 100 تا 350 لوکس می‌باشد.

6- مراجع

- [1] C. Teutsch, *Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners*, Otto von Guericke University Magdeburg, Germany: S haker Verlag, pp. 15-16, 2007.
- [2] F. Blais, Review of 20 years of range sensor development, *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 13, No. 1, pp. 231-240, 2004.
- [3] J. Davis, & X. Chen, A laser range scanner designed for minimum calibration complexity, *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, Quebec City, Quebec, Canada, 28 May-1 June, 2001.
- [4] C. Tao, S. Jianwei, W. Lang, Test method on precision of the 3D laser scanner, *IEEE 3rd International Conference on Communication*