

بازیابی مدل سه بعدی محصولات پیوسته با استفاده از تکنیک پردازش تصویر

خلیل خلیلی* (استادیار)

سید محمد امام (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

مهندسی مکانیک شریف
دربی ۳-۴۹، شماری ۱، ص. ۱۱۳-۱۲۴، (پادداشت شریف)

khkhalili@yahoo.com
s.m.emam@yahoo.com

یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های اسکن سه بعدی اجسام و بازیابی مدل سه بعدی آن‌ها روش مثلث بندی با استفاده از نور ساختاریافته است. در این نوشتار برای انجام عملیات اسکن سه بعدی با استفاده از نور لیزر، از توزیع گوسی استفاده شده است. سپس برای اندازه گیری داده های عمق، یک دوربین CCD تصاویر را می گیرد. ابتدا عملیات بهبوددهی و پردازش تصویر دریافتی در دو بخش مهم انجام می شود: ۱. پارامترهای مربوط به جسم و شرایط نورپردازی مثل رنگ و لیهایی، کنترل و اصلاح می شود؛ ۲. پارامترهای مربوط به کالیبراسیون دوربین مثل انحراف محوری دوربین و ایجاد تصویری با اختلاف نسبت به محور افقی، به صورت نرم افزاری و با دقت خوبی اصلاح می شود. بعد از پردازش تصویر، جسم اسکن می شود و پروفیل دوبعدی آن استخراج می گردد. با گرفتن تصاویر متوالی از جسم، مدل سه بعدی به صورت مدل CAD بازیابی و انجام تحلیل های مختلف روی مدل جسم امکان پذیر می شود.

واژگان کلیدی: اسکن سه بعدی، روش مثلث بندی، مدل سه بعدی، بازیابی مدل.

۱. مقدمه

امروزه در پی پیشرفت های چشمگیر در صنعت و نیز به دنبال رقابت شدید در بازار موضوع کاهش زمان تولید، بهبود کیفیت و دقت محصولات تولیدی اهمیت بیشتری یافته است. کنترل کیفیت ابعادی از طریق اندازه گیری و کنترل قطعه در حین فرایند تولید به کاهش تعداد قطعات معیوب و عملیات دوباره کاری می انجامد. با پیشرفت فناوری های نورشناسی و بینایی در بازرسی و کنترل کیفیت محصولات تولیدی، دستیابی به اطلاعات ابعادی اجسام با استفاده از سیستم های بینایی بسیار متداول است. در ایستگاه های بازرسی و کنترل کیفیت برای مقایسه ی محصول مورد بازرسی با محصول طراحی شده، از سیستم های بینایی استفاده می شود که علاوه بر مقایسه ی محصول با طرح و اندازه، محل بروز خطا را مشخص می کنند. این گونه سیستم ها به علت انعطاف پذیری و سرعت بیشتر نسبت به سیستم های مکانیکی برتری دارند. سیستم های بینایی قابل دسترس تجاری را، براساس تجهیزاتی که برای به دست آوردن مختصات جسم به کار می گیرند، می توان به دو دسته ی فعال و غیرفعال طبقه بندی کرد.^[۱] سیستم بینایی فعال بر سطح شیء نور خاصی را تصویر می کند در حالی که سیستم بینایی غیرفعال چنین نیست. امروزه سیستم های اندازه گیری سه بعدی، نمایش عددی از شکل قطعات را از میان دسته داده های سه بعدی، ارائه می کنند.^[۲] کیفیت مدل سطوح بازسازی شده به صحت نقاط داده ی اندازه گیری شده و همچنین به نوع وسایل اندازه گیری بستگی دارد.^[۳] اندازه گیری و کنترل فوری، یکی از راه های مؤثر برای بازرسی ابعاد هندسی قطعه کار (workpiece) به منظور بهبود کیفیت تولیدات است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۸/۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۴/۱۵، پذیرش ۱۳۹۰/۶/۵.

سنسورها برای تصویربرداری غیرتماسی، روی ماشین کنترل عددی و CMM ها سوار می‌شوند تا سرعت اندازه‌گیری بسیار بهبود یابد. [7] روش‌های مبتنی بر نور ساختاریافته برای استخراج اطلاعات سه‌بعدی، از دهه‌ی هفتاد اتخاذ شده است. [8] تکنیک‌های اندازه‌گیری پروفیل سه‌بعدی بر مبنای نور ساختاریافته در بسیاری از زمینه‌ها کاربرد دارد زیرا این روش‌ها از امتیاز غیرتماسی بودن و دقت بالا و کنترل ساده برخوردارند. روش مثلث‌بندی یکی از این تکنیک‌هاست که در آن از نور کنترل‌شده یا اصطلاحاً نور ساختاریافته، که با ارتباط بین نورپردازی و مشاهدات تعریف شده، استفاده می‌کند. در فاصله‌های مناسب سیستم مثلث‌بندی اندازه‌گیری سریع و دقیقی را انجام می‌دهد. [9] همچنین رایج‌ترین قاعده برای اندازه‌گیری فاصله روش مثلث‌بندی لیزری است و دلیل آن سادگی، توانمندی و دقت این روش است. [10] [11] براساس اصل مثلث‌بندی، سنسور نور ساختاریافته شامل یک دوربین و یک پروژکتور لیزری است. در این نوشتار با استفاده از روش مثلث‌بندی، مدل سه‌بعدی جسم بازایی شده و انجام محاسبات و تحلیل‌های بعدی روی مدل میسر می‌شود.

۲. روش مثلث‌بندی لیزری

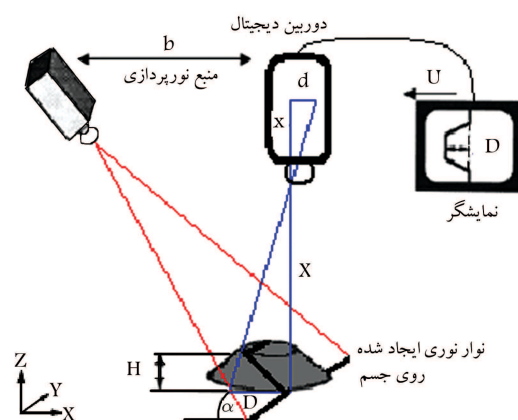
رایج‌ترین قاعده برای اندازه‌گیری فاصله -- به دلیل سادگی و توانمندی -- مثلث‌بندی است. روش مثلث‌بندی همچنین دقت و کارایی بالایی دارد. در این روش پرتو نور باید به سطح مبنا (سطحی که ارتفاع قطعه مورد اندازه‌گیری نسبت به آن سنجیده می‌شود) و سطح مورد اندازه‌گیری برخورد کند و انعکاس آن توسط دوربین CCD دریافت شود. در این روش با توجه به شکل ۱ با داشتن فاصله‌ی لنز نسبت به دوربین و همچنین فاصله‌ی سطح مبنا نسبت به محل دوربین می‌توان ارتفاع جسم (H) را در تک‌تک نقاط به دست آورد؛ مثلاً چنانچه فاصله‌ی سطح مبنا تا لنز دوربین برابر X ، فاصله‌ی لنز تا CCD برابر x ، و اندازه تصویر در CCD نیز برابر d باشد، مقدار D طبق فرمول ۱ محاسبه می‌شود.

$$\frac{D}{X} = \frac{d}{x} \Rightarrow D = \frac{Xd}{x} \quad (1)$$

حال با به دست آوردن مقدار D ، با توجه به شکل و هندسه‌ی سیستم مقدار ارتفاع (ضخامت) از فرمول ۲ محاسبه می‌شود:

$$H = D \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

که در آن، H ارتفاع قطعه و α زاویه تابش لیزر نسبت به افق است.



شکل ۱. اندازه‌گیری ارتفاع به روش مثلث‌بندی.

در سیستم‌های مثلث‌بندی پارامترهایی همچون الگوی نورپردازی، نوع نور به‌کاررفته در سیستم، سنسور و تکنیک‌های پردازش داده در کارایی سیستم مؤثرند. از جمله پارامترهایی که باعث اختلاف در ساختار مثلث‌بندی نوری می‌شوند عبارت‌اند از:

۱. نوع اپتیک به‌کاررفته در سیستم؛
۲. الگوی نورپردازی؛
۳. نوع سنسور مورد استفاده (یک‌بعدی یا دوبعدی)؛
۴. روش اسکن (تجهیزات ثابت یا تجهیزات متحرک)؛
۵. واحد تولید‌کننده الگوی نوری.

در نورپردازی ساختاریافته، نور به‌صورت پرتوهای نورانی و با الگوی خاصی از منبع به شیء می‌تابد. در اسکن‌های مثلث‌بندی فعال، فاصله توسط نور تابیده شده از یک منبع نور لیزر به جسم و تصویربرداری از الگوی روشنایی حاصله تعیین می‌شود. الگوی روشنایی با توجه به ساختار نورپردازی ممکن است تغییر کند؛ همچنین ساختار نورپردازی ممکن است اشکال مختلفی داشته باشد. در واقع برای تشکیل این ساختار، پرتو نور لیزر را از لنزهای مخصوص عبور می‌دهند تا ساختار مورد نظر شکل بگیرد. با استفاده از تکنیک نورپردازی ساختاریافته علاوه بر به دست آوردن فواصل افقی، عمق قطعه‌کار را می‌توان به دست آورد.

۳. اجزاء سیستم مورد استفاده

سیستم مورد استفاده شامل دو بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری است. بخش سخت‌افزاری سیستم به قسمت‌هایی اطلاق می‌شود که کارهایی چون حرکت جسم، تنظیمات مربوط به لیزر و دوربین، گرفتن تصویر و انتقال آن به رایانه را انجام می‌دهد. به‌طور کلی اجزاء سخت‌افزاری عبارت‌اند از (شکل ۲): ۱. واحد اپتوالکترونیکی (منبع نور لیزری با لنز استوانه‌ای)؛ ۲. واحد تصویربرداری (دوربین دیجیتال)، ۳. ربات؛ ۴. نوار نقاله؛ ۵. پایه‌ی دوربین؛ ۶. رایانه.



ب) ربات؛



الف) دوربین؛



د) لیزر.



ج) نوار نقاله؛

شکل ۲. اجزاء سخت‌افزاری سیستم مورد استفاده.

متوالی تهیه کند. سپس تصاویر مربوط به مقاطع مورد نیاز جداسازی و استخراج می‌شوند.

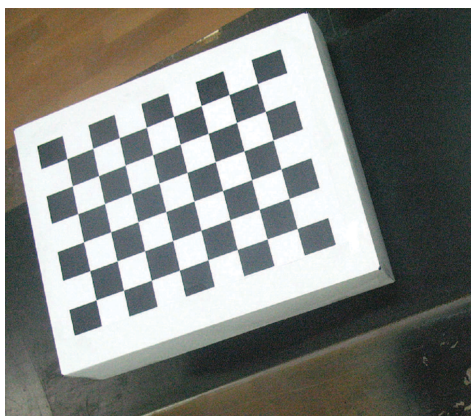
۵. کالیبراسیون

قبل از استخراج ابعاد جسم توسط روش مثلث‌بندی باید فرایند کالیبراسیون انجام شود. این فرایند شامل تشخیص محل و موقعیت دوربین و همچنین منبع مولد نور (لیزر) است. در نهایت باید موقعیت دوربین و لیزر نسبت به هم نیز مشخص و تنظیم شود.

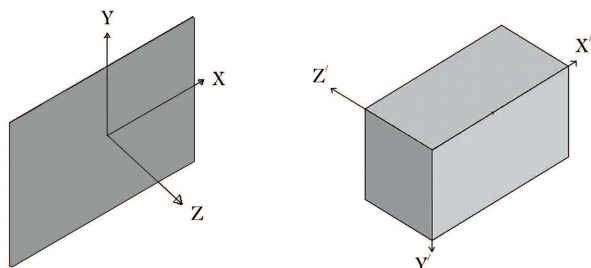
۱.۵. کالیبراسیون دوربین

فرایند ساده‌ی کالیبراسیون را می‌توان با استفاده از موقعیت چند نقطه‌ی موضوع که مختصات‌شان مشخص است و تابش آن‌ها بر صفحه‌ی تصویر طراحی کرد. پارامترهایی که در کالیبراسیون دوربین باید محاسبه شوند به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: ۱. پارامترهای بیرونی، شامل عناصر بردار انتقال مبدأ مختصات از دستگاه مختصات مرجع به دستگاه مختصات دوربین، و ماتریس چرخش متناظر آن؛ ۲. پارامترهای درونی که موجب انتقال مختصات سه‌بعدی جسم در دستگاه مختصات یک دوربین خاص به دستگاه مختصات دوبعدی صفحه‌ی تصویر آن می‌شوند. برای به دست آوردن پارامترهای ماتریس کالیبراسیون، از جسمی با اندازه معلوم استفاده می‌شود (شکل ۵).

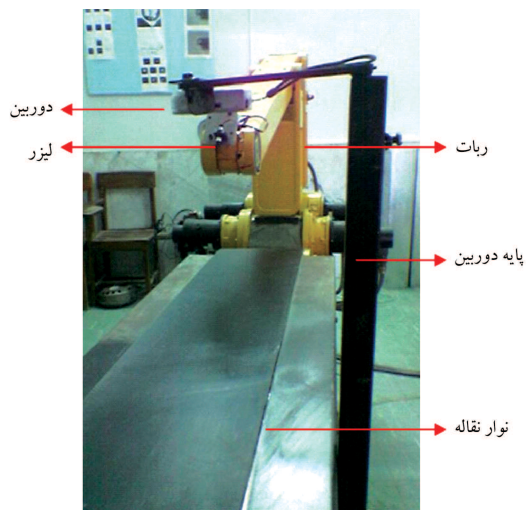
مطابق شکل ۶ دستگاه مختصات روی جسم با $X'Y'Z'$ و دستگاه مختصات روی دوربین با XYZ نشان داده شده است. سپس مطابق شکل ۷ سه نقطه، که باید روی یک خط راست باشند، در نظر



شکل ۵. صفحه کالیبراسیون (اندازه هر مربع $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$).



شکل ۶. سیستم مختصات تعریف شده روی جسم و تصویر.



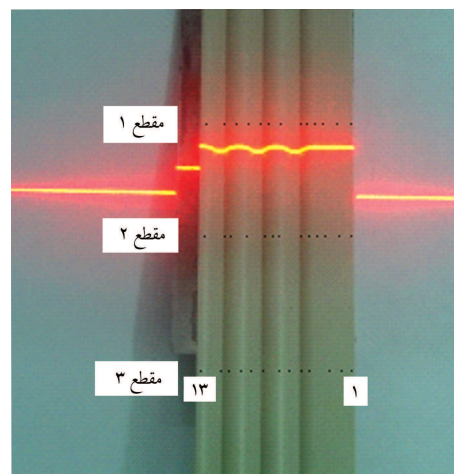
شکل ۳. نحوه اتصال اجزاء سخت‌افزاری سیستم.

بخش نرم‌افزاری سیستم نیز شامل پردازش تصویر، به دست آوردن پروفیل جسم، ایجاد مدل CAD و در نهایت تحلیل و به دست آوردن ضریب اطمینان طراحی قطعه، با توجه به کاربرد خاص هر قطعه است.

۴. تصویربرداری

با توجه به سیستم سخت‌افزاری مورد استفاده و روش مثلث‌بندی لیزری، برای انجام مراحل پردازش و بازیابی مدل، گرفتن تصویری از جسم متحرک ضروری است. در شکل ۳ نحوه‌ی اتصال اجزای سخت‌افزاری سیستم نشان داده شده است.

در این مرحله برای راحتی تنظیمات مربوط به لیزر، آن را به دست ربات متصل و سپس در مکان و زاویه‌ی مناسبی از جسم موقعیت‌دهی می‌شود. برای به حرکت درآوردن جسم از سیستم نوار نقاله استفاده شده است. دوربین دیجیتال از نوع CCD با وضوح (رزولوشن) ۵ مگاپیکسل انتخاب شده که در بالای جسم توسط پایه به نوار نقاله ثابت می‌شود و در زمان‌های تعیین‌شده از جسم متحرک تصویر می‌گیرد. در شکل ۴ شاهد تصویر جسم هستیم که نور لیزر به آن تابیده شده است. دوربین باید از این جسم، هنگامی که از زیر آن عبور می‌کند تصاویر



شکل ۴. جسم متحرک در حال تصویربرداری.

ماتریس چرخش به اندازه‌ی زاویه‌ی δ حول محور Z

$$R = R_x \times R_y \times R_z$$

ماتریس انتقال T که جابه‌جایی نسبت به مبدا مختصات است نیز طبق فرمول ۶ بیان می‌شود.

$$T = \begin{bmatrix} d_X \\ d_Y \\ d_Z \end{bmatrix} \quad (۶)$$

با ترکیب کردن R و T ماتریس $[R \ T]$ به دست می‌آید. تصویری که از هر منظره گرفته می‌شود به دلایل مختلفی مثل شکست نور در هوا، عدم دقت ساخت و مونتاژ قطعات دوربین و انحناء، ضخامت لنز دوربین و دقت ساخت آن یک تصویر واقعی نیست. به همین منظور ماتریسی تعریف می‌شود که با ضرب کردن این ماتریس در مختصات نقاط مختلف تصویر، نقاط واقعی حاصل می‌شوند. این ماتریس به صورت فرمول ۷ بیان می‌شود و «ماتریس خطای انحراف» نامیده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} a & b & m \\ c & d & n \\ o & o & l \end{bmatrix} \quad (۷)$$

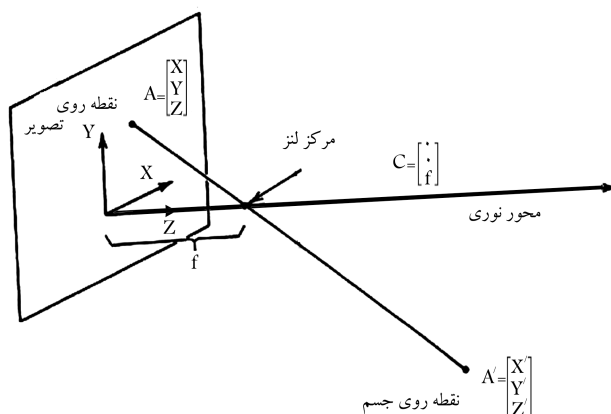
مختصات واقعی تصویر نیز با ضرب ماتریس خطای انحراف در مختصات به دست آمده در تصویر محاسبه می‌شود. چون مختصات Z نقاط تصویر صفر است، به جای پارامترهای m, n و l ماتریس خطای انحراف هر عددی می‌توان قرار داد. لذا به منظور پرهیز از نمایش مؤلفه‌های اضافی، این پارامترها صفر در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به شکل ۷ مختصات مرکز لنز دوربین نیز عبارت‌است از: $[0 \ 0 \ f]^T$. بنابراین با جایگذاری هریک از اجزاء فرمول ۳ به فرمول ۸ می‌رسیم. با توجه به روابط ذکر شده، فرمول ۸ شامل 10° مجهول، $\alpha, \beta, \delta, d_x, d_y, d_z, a, b, c, d$ است. پس برای حل آن احتیاج به 10° معادله است. از آنجا که از هر نقطه دو معادله به دست می‌آید، برای مشخص کردن مجهولات، داشتن دست‌کم مختصات ۵ نقطه و تصویر آن‌ها ضروری است. با حل این معادلات پارامترهای کالیبراسیون -- فاصله بین دو دستگاه مختصات و چرخش آن‌ها نسبت به هم، و نیز پارامترهای ماتریس خطای انحراف -- به دست می‌آید. برای کم کردن خطای پارامترهای کالیبراسیون می‌توان جسم را در حالات مختلف قرار داد و از پارامترهای به دست آمده میانگین گرفت.

$$K \times \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ c & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} R & T \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f \end{bmatrix}$$

۲.۵. نتایج و پارامترهای حاصل از کالیبراسیون دوربین

برای بررسی دقت کالیبراسیون دو مدل استفاده شده که یکی از آن‌ها به شکل مکعبی با ابعاد $5^\circ \times 5^\circ \times 5^\circ$ میلی‌متر و دیگری به شکل مکعب مستطیلی با ابعاد $10^\circ \times 5^\circ \times 2^\circ$ میلی‌متر است (شکل ۸).



شکل ۷. سه نقطه روی یک خط راست مربوط به فرمول ۳.

گرفته می‌شود. یک نقطه بر روی جسم، یک نقطه مرکز لنز دوربین و یک نقطه هم تصویر متناظر نقطه روی جسم. چون این سه نقطه روی یک خط راست قرار دارند، باید در فرمول ۳ صدق کنند.

$$\text{مختصات مرکز لنز - مختصات نقطه روی جسم} = \text{مختصات تصویر - مختصات مرکز لنز} \times K \quad (۳)$$

ضرب K در فرمول ۳ با توجه به مختصات سه نقطه‌ی مورد نظر و با استفاده از فرمول ۴ قابل محاسبه است.

$$K = \frac{|A'C|}{|AC|} = \frac{X_{A'C}}{X_{AC}} = \frac{Y_{A'C}}{Y_{AC}} = \frac{Z_{A'C}}{Z_{AC}} \quad (۴)$$

دستگاه مختصات روی تصویر به عنوان دستگاه مختصات مرجع در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای تبدیل مختصات نقطه‌ی روی جسم به تصویر باید ماتریس دوران و انتقال دستگاه مختصات جسم نسبت به دستگاه مختصات تصویر را در مختصات نقطه‌ی روی جسم ضرب کرد. این ماتریس به صورت $[R \ T]$ نمایش داده می‌شود که در آن R مربوط به دوران و T مربوط به انتقال است. با ضرب ماتریس‌های دوران حول سه محور مختصات، R به دست می‌آید. در فرمول ۵ ماتریس دوران حول محور X, Y و Z نشان داده شده است.

$$R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (۵)$$

ماتریس چرخش به اندازه‌ی زاویه‌ی α حول محور X

$$R_Y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

ماتریس چرخش به اندازه‌ی زاویه‌ی β حول محور Y

$$R_Z = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

جدول ۱. پارامترهای کالیبراسیون برای مدل اول و دوم.

پارامتر	مدل اول	مدل دوم
α	-۰٫۴۳۴۲۳	-۰٫۴۳۲۳۶
β	۰٫۴۰۹۱۶۵	۰٫۴۰۸۱۷۷
δ	-۰٫۰۴۷۲۷	-۰٫۰۴۶۲۶
d_x	۲۸٫۷۳۵۷۱	۳۰٫۹۲۸۸۱
d_y	۱۳٫۱۸۸۵۲	-۴٫۶۳۵۰۷
d_z	۱۷۶٫۱۷۸۶۲	۱۶۸٫۴۶۴۹۵
a	۱	۱
b	۷٫۲۲E-۰٫۸	۷٫۲۲E-۰٫۸
c	۷٫۱۹E-۰٫۸	۷٫۱۹E-۰٫۸
d	۱	۱
f	۷٫۹	۷٫۹

جدول ۲. بررسی دقت کالیبراسیون دوربین.

مدل اول			
فاصله نقاط	فاصله محاسبه شده (mm)	فاصله واقعی (mm)	خطای نسبی
۱٫۲	۴۹٫۶۴۷۶۸	۴۹٫۶	۰٫۰۰۰۹۶
۲٫۳	۴۹٫۴۶۵۱۴	۴۹٫۹	۰٫۰۰۸۷۹
۳٫۴	۵۰٫۰۱۱۴۷	۵۰	۰٫۰۰۰۲۲
۴٫۱	۴۹٫۰۴۸۳۸	۴۹٫۸	۰٫۰۱۵۳۲
۵٫۶	۴۹٫۰۵۱۹۲	۴۹٫۶	۰٫۰۱۱۱۷
۵٫۷	۴۹٫۳۵۳۷۴	۵۰٫۱	۰٫۰۱۵۱۲
۷٫۴	۴۹٫۹۹۴۴۴	۴۹٫۸	۰٫۰۰۳۸۸
۱۰٫۵	۵۰٫۰۸۴۶۲	۵۰	۰٫۰۰۱۶۹
۲۰٫۶	۴۹٫۳۱۰۶۸	۴۹٫۹	۰٫۰۱۱۹۵
مدل دوم			
۱٫۲	۱۰۰٫۹۴۷	۱۰۰٫۵	۰٫۰۰۴۴۲
۲٫۳	۴۸٫۹۱۴۹۶	۵۰	۰٫۰۲۲۱۸
۳٫۴	۱۰۱٫۱۵۵۶	۱۰۰٫۳	۰٫۰۰۸۴۵
۴٫۱	۵۰٫۰۵۱۲۴	۵۰	۰٫۰۰۱۰۲
۵٫۶	۹۹٫۴۲۴۴۱	۱۰۰٫۲	۰٫۰۰۷۸۰
۵٫۷	۴۹٫۶۵۹۳۴	۴۹٫۹۵	۰٫۰۰۵۸۵
۷٫۴	۱۹٫۲۹۲۸۷	۱۹٫۸	۰٫۰۲۶۲۸
۱۰٫۵	۲۰٫۸۴۴۹۸	۱۹٫۹	۰٫۰۴۵۳۳
۲۰٫۶	۱۹٫۱۱۴۹۴	۱۹٫۹	۰٫۰۴۱۰۷

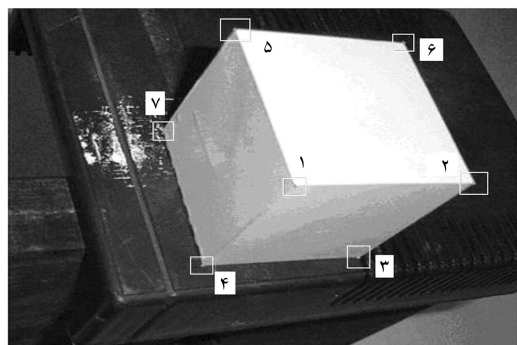
در این پروژه وسیله‌ی ساده‌ی مطابق شکل ۱۰ برای تنظیم زاویه‌ی لیزر ساخته شد. دقت ساخت زاویه‌ی قائمه‌ی صفحه‌ی L (با توجه به اندازه‌گیری مطابق شکل ۱۰) ۹۰ درجه و ۵ دقیقه است. همچنین از این وسیله برای بهبود موقعیت لیزر نسبت به جسم نیز استفاده می‌شود که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. با استفاده از قوانین ساده فیزیکی، می‌توان زاویه‌ی نور لیزر را تعیین کرد. روش



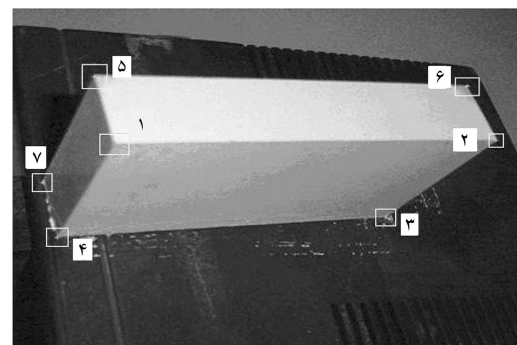
(ب) مدل دوم.

(الف) مدل اول؛

شکل ۸. بررسی دقت کالیبراسیون توسط دو جسم با اندازه‌ی معلوم.



(الف) مدل اول؛



(ب) مدل دوم.

شکل ۹. نقاط گوشه‌ی متناظر.

با پردازش تصویر و استخراج مختصات هفت گوشه‌ی مدل‌ها و با توجه به معین بودن ابعاد واقعی آن‌ها، مقدار پارامترهای کالیبراسیون دوربین قابل محاسبه است. در شکل ۹ گوشه‌های تشخیص داده شده توسط پردازش تصویر نشان داده شده است. با توجه به محاسبات توضیح داده شده در قسمت کالیبراسیون پارامترهای استخراج شده برای مدل‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. با استفاده از نتایج به دست آمده در جدول ۱ و همچنین معادلات بیان شده در بخش کالیبراسیون، میزان خطا برای استخراج ابعاد دو مدل در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳.۵. کالیبراسیون لیزر

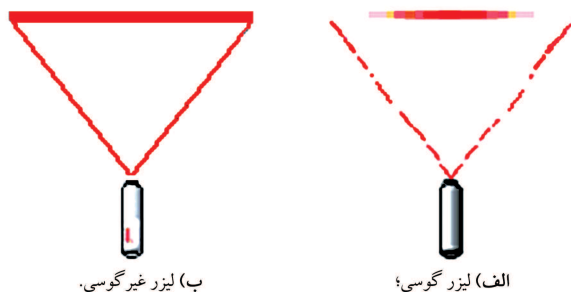
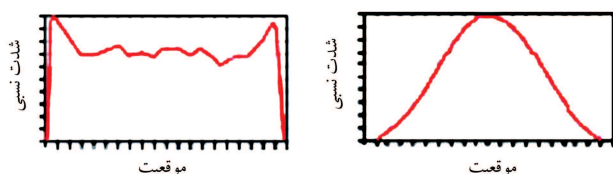
برای کالیبراسیون واحد نوری سیستم اندازه‌گیری، باید موقعیت لیزر تنظیم و راستای دقیق پرتو نوری تعیین شود. کالیبراسیون لیزر شامل دو مرحله است:

(الف) تعیین موقعیت و زاویه‌ی محور نوری لیزر با افق

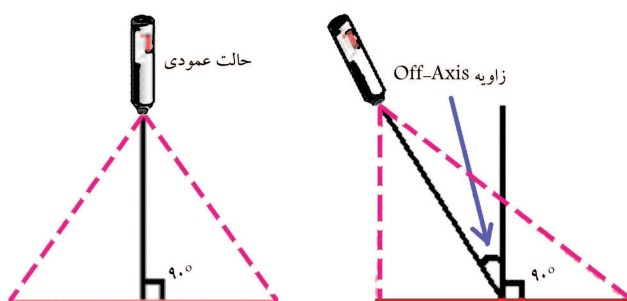
با توجه به این که استفاده از تجهیزات مکانیکی برای تعیین زاویه‌ی محور اپتیکی لیزر با راستای افق، علاوه بر مشکلات ساخت با خطای قابل ملاحظه‌ی همراه است.

جدول ۳. محاسبه‌ی زاویه تابش لیزر.

شماره تکرار	Z (mm)	Y (mm)	θ°	θ° میانگین
۱	۳۰۵٫۷۶۵	۱۹۸٫۴۵۰	۳۲٫۹۸۵	
۲	۲۹۸٫۷۶۰	۱۸۶٫۲۱۰	۳۱٫۹۳۴	
۳	۲۵۴٫۷۸۶	۱۶۲٫۹۸۶	۳۲٫۶۰۷	۳۲٫۳۱۳
۴	۲۰۴٫۹۰۰	۱۲۷٫۰۹۸	۳۱٫۸۱۱	
۵	۱۱۰٫۷۳۱	۶۹٫۸۰۲	۳۲٫۲۲۶	



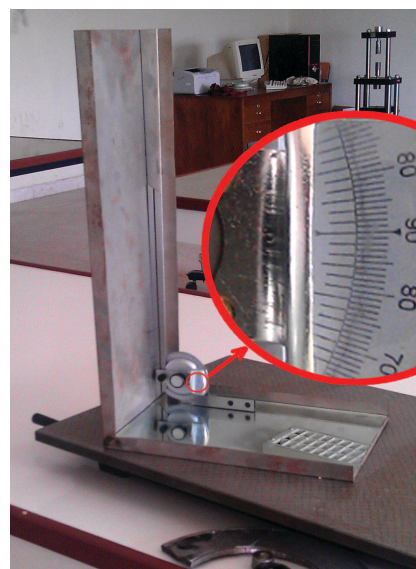
شکل ۱۲. توزیع شدت روشنایی.



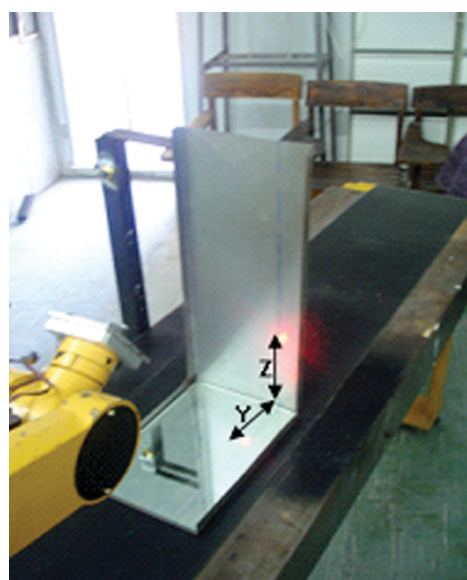
شکل ۱۳. تصویر کردن نور لیزر به صورت عمودی و زاویه دار.

ب) استقرار محور اپتیکی لیزر دیود در صفحه‌ی عمود بر سطح نوار نقاله واحد تولیدکننده‌ی الگوی نوار نوری می‌تواند دارای دو نوع توزیع شدت روشنایی گوسی و غیرگوسی باشد. در این نوشتار با توجه به امکانات آزمایشگاهی از لیزر با شدت روشنایی گوسی استفاده شده است. چنان‌که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در توزیع گوسی شدت روشنایی نور در مرکز خط بیشتر از طرفین آن (نقاط انتهایی خط) است در صورتی که در توزیع غیرگوسی، شدت روشنایی نور به صورت یکنواخت در طول خط لیزر پخش شده است.

به‌طور کلی نور لیزر به دو صورت روی سطح موضوع تابیده می‌شود (شکل ۱۳). به زاویه‌یی که محور اپتیکی لیزر با راستای عمود بر سطح موضوع داشته باشد، زاویه‌ی Off-Axis می‌گویند. با توجه به شکل ۱۴ این زاویه در لیزرهای غیرگوسی تأثیر



شکل ۱۰. اندازه‌گیری زاویه صفحه‌ی L شکل.

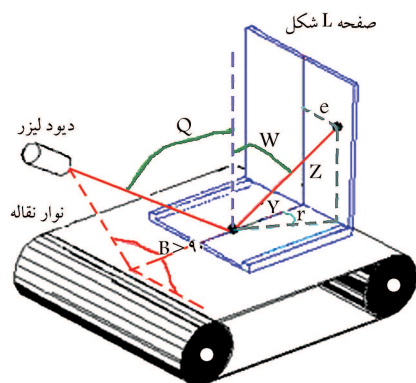


شکل ۱۱. کالیبراسیون لیزر با استفاده از آینه‌ی L شکل.

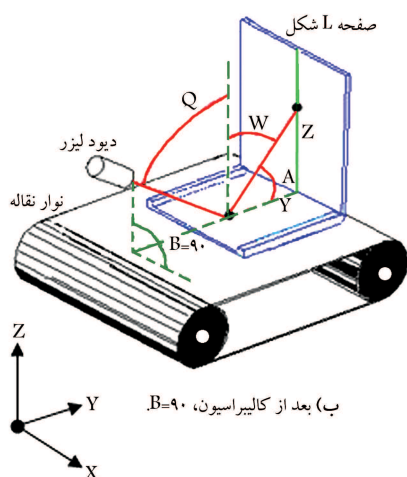
کالیبراسیون بدین صورت است که با توجه به شکل ۱۱ واحد اپتیکی (لیزر) را بر روی ربات سوار کرده سپس با دوران دیود لیزر توسط میج ربات زاویه‌ی تابش لیزر بر سطح قطعه‌کار تنظیم می‌شود. سپس با قراردادن صفحه فلزی L شکل که در وجه پایینی آن یک آینه قرار داده شده، لنز استوانه‌یی از دیود لیزر جدا می‌شود. با تاباندن لیزر با نور نقطه‌یی به سطح آینه، و با توجه به این که زاویه‌ی تابش برابر زاویه‌ی بازتابش است، و نیز با به‌کارگیری فرمول ۹ محور اپتیکی نسبت به افق (زاویه‌ی تابش) به دست می‌آید.

$$\tan(\text{زاویه تابش}) = \tan(\text{زاویه بازتابش}) = \frac{Z}{Y} \quad (9)$$

فواصل Z و Y با استفاده از میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود. برای بالا بردن دقت با جابه‌جایی صفحه‌ی L شکل در راستای حرکت نوار نقاله، و پنج‌بار تکرار اندازه‌گیری مطابق جدول ۳، مقدار زاویه محاسبه می‌شود.

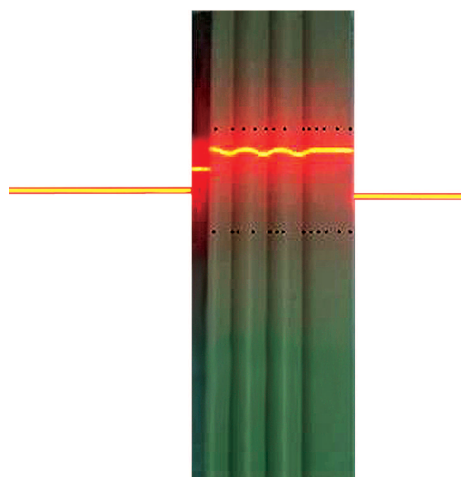


الف) قبل از کالیبراسیون، $B \neq 90^\circ$



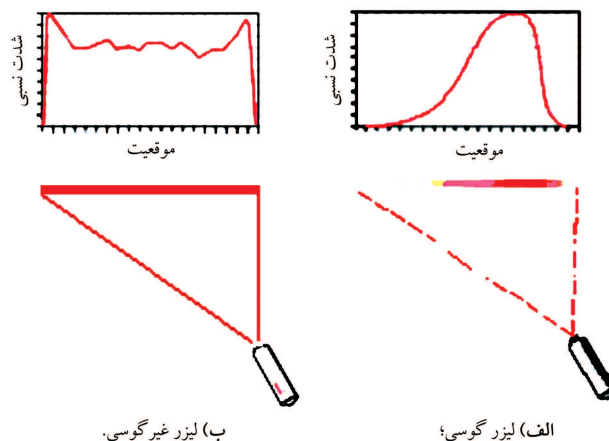
ب) بعد از کالیبراسیون، $B = 90^\circ$

شکل ۱۵. نحوه‌ی برقراری شرط استقرار محور اپتیکی لیزر دیود در صفحه‌ی عمود بر سطح نوار نقاله.



شکل ۱۶. تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر.

نسبت به بقیه تصویر بیشتر می‌شود. سپس با اعمال فیلتر مناسب هموارسازی و لیه‌یابی، تصویر برای عملیات بعدی بهبود و آماده می‌شود (شکل ۱۷). در نهایت برای ارسال تصویر به بخش محاسبات و استخراج پروفیل جسم باید تصویر دودویی و نوار نوری لیزر با توجه به اختلاف در سطح خاکستری آن از بقیه تصویر جدا شود. در شکل ۱۸ تصویر نهایی پس از اتمام مراحل پردازش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. توزیع شدت روشنایی در لیزرهای گوسی و غیرگوسی، بر اثر زاویه Off-Axis.

زیادی در تغییرات شدت روشنایی خط لیزر ندارد، ولی در لیزرهای گوسی ایجاد زاویه‌ی Off-Axis باعث جابه‌جایی پیک شدت روشنایی لیزر در طول خط لیزر می‌شود. در این نوشتار، مقدار این زاویه به صفر رسانده شده تا محور اپتیکی لیزر دقیقاً در وسط حوزه‌ی دید دوربین و قطعه‌کار قرار گیرد. این کار باعث می‌شود شدت روشنایی به صورت یکنواخت، با حرکت از مرکز حوزه‌ی دید دوربین به سمت طرفین آن کاهش یابد و خطای اندازه‌گیری در حد قابل ملاحظه‌ی کاهش یابد.

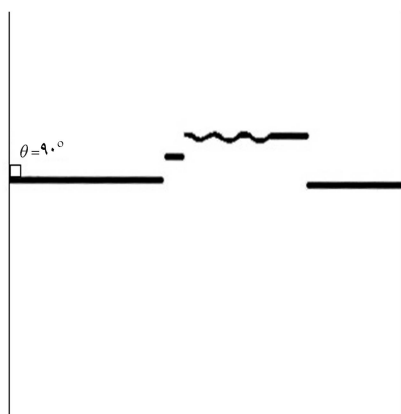
بنابراین با توجه به شکل ۱۴ الف شدت روشنایی در لیزرهای گوسی با تغییرات زاویه، باعث حرکت پیک روشنایی از نقاط مرکزی به سمت نقاط انتهایی می‌شود و در نتیجه شدت روشنایی در محدوده‌ی دید دوربین کم‌تر از سطح آستانه آشکارسازی خواهد بود و برای سیستم غیر قابل رؤیت می‌شود.

برای برقراری شرط استقرار محور اپتیکی در صفحه‌ی عمود بر سطح نوار نقاله که یکی از پارامترهای مهم در یکنواختی روشنایی خط لیزر نسبت به نقطه مرکزی خط گوسی است، باز هم با استفاده از صفحه‌ی L شکل و با توجه به این که پرتو تابش و پرتو بازتابش و خط عمود بر سطح تابش، هر سه در یک صفحه قرار دارند، با تغییر زاویه‌ی میج ربات، انحراف جانبی پرتو نور به صفر می‌رسد ($e = 0$). این موضوع باعث می‌شود نقطه‌ی برخورد لیزر تابشی به آینه و نقطه‌ی اثر پرتو بازتابش بر روی بال دیگر صفحه‌ی L شکل در صفحه‌ی عمود بر دو بال صفحه‌ی L شکل (عمود مشترک دو بال) قرار گیرند. در شکل ۱۵ نحوه‌ی کالیبراسیون نشان داده شده است.

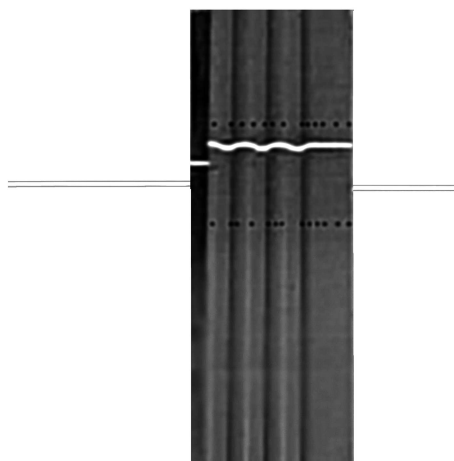
۶. پردازش تصویر

ابتدا باید تصاویر گرفته‌شده از نظر رنگ و لبه بهبوددهی شوند و موارد اضافی مثل نویز زمینه (که حاصل شرایط نورپردازی است) حذف شود. برای این منظور از نرم‌افزار قدرت‌مند پردازش تصویر (۱/۲/۸۷ vision national instruments) استفاده شده است. در ادامه به توضیح مراحل پردازش می‌پردازیم.

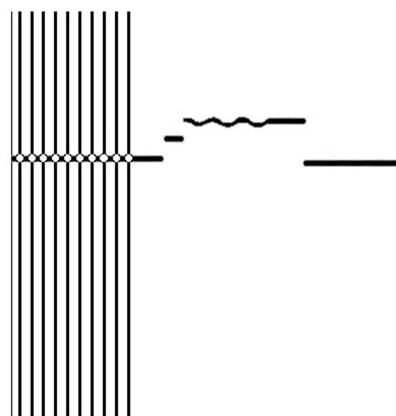
در شکل ۱۶ عکس اولیه و ورودی به نرم‌افزار، قبل از انجام هرگونه پردازشی نشان داده شده است. پس از انجام تکنیک‌های بهبوددهی، تصویر خروجی از این مرحله به صورت دودویی تبدیل شده و به عنوان ورودی به بخش محاسبات فرستاده می‌شود. ابتدا با حذف رنگ قرمز، تصویر به سطح خاکستری تبدیل می‌شود. به دلیل نزدیکی نور لیزر به رنگ قرمز با این عمل اختلاف سطح نوار نوری موجود در تصویر



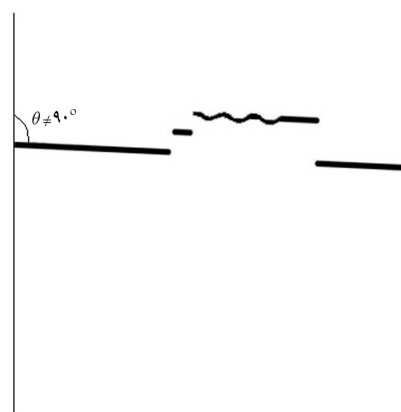
شکل ۱۹. تصویر جسم پس از چرخش و هم‌محوری با افق.



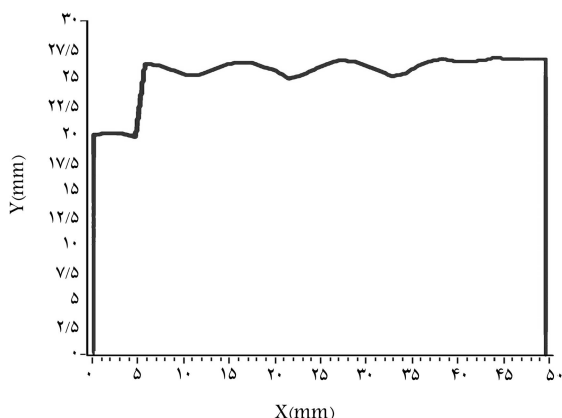
شکل ۱۷. تصویر پس از حذف رنگ و فیلتر بهبوددهی تصویر.



شکل ۲۰. تصویر جسم در حال اسکن و استخراج نقاط.



شکل ۱۸. تصویر نهایی پس از اعمال پردازش تصویر.



شکل ۲۱. پروفیل دوبعدی جسم.

۷. استخراج عمق و پروفیل دوبعدی جسم

برای استخراج پروفیل دوبعدی جسم و محاسبه‌ی عمق یا ضخامت جسم از نرم‌افزار v۸.۲.۱ national instruments labview استفاده شده است. یکی از مشکلات در تصویر گرفته‌شده خطای ناشی از کالیبراسیون دوربین است که باعث به وجود آمدن انحراف زاویه‌ی نسبت به افق است. با استفاده از تصحیح نرم‌افزاری این خطا برطرف می‌شود. با عبور خط مبنا از جسم، مشخص شدن زاویه با محور افقی، و دوران معکوس تصحیح انجام می‌شود. شکل ۱۹ تصویر جسم بعد از انجام این تصحیح است.

در مرحله‌ی بعد جسم تصویربرداری می‌شود و نقاط مرکزی باند نوری استخراج می‌گردد. با به دست آمدن این نقاط پروفیل دوبعدی جسم قابل بازیابی است. در شکل ۲۰ تصویر جسم در حال تصویربرداری نشان داده شده است. برای انجام این مرحله پس از تشخیص لبه‌های چپ و راست جسم، با توجه به دقت مورد نظر، تصویر از لبه‌ی سمت چپ شروع به اسکن و تا رسیدن به لبه‌ی مقابل ادامه پیدا می‌کند. با استخراج نقاط پروفیل دوبعدی جسم قابل بازیابی است (شکل ۲۱).

چنان که بیان شد با استفاده از تکنیک مثلث‌بندی می‌توان عمق یا ضخامت را در نقاط مختلف استخراج کرد. برای محاسبه‌ی خطا، مقادیر استخراج شده از طریق روش پیشنهادی با مقادیر حاصل از دستگاه CMM، تا چهار رقم اعشار مقایسه شده است. یادآور می‌شود ضخامت نقاط نسبت به سطح نوارنقاله مطابق شکل ۲۲

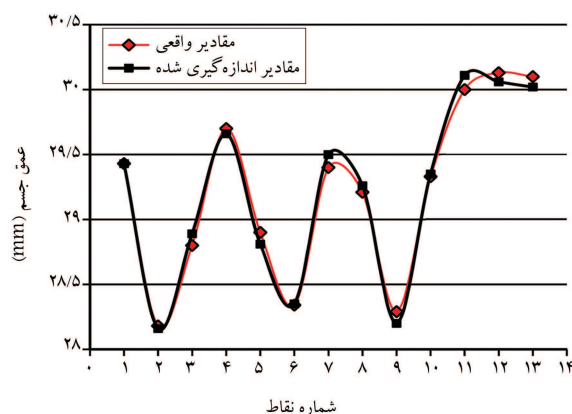
انجام گرفته است. در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ مقادیر واقعی و اندازه‌گیری‌شده توسط روش مثلث‌بندی برای ۱۳ نقطه و در سه مقطع براساس شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۳ مقدار انحراف معیار، بیشینه خطا و میانگین خطا برای مقطع شماره ۱ عبارت است از:

انحراف معیار استاندارد (σ): 0.054842 mm

3σ : 0.164526 mm

بیشینه خطا: 0.13 mm

میانگین خطا: 0.042 mm



شکل ۲۵. مقادیر واقعی و اندازه گیری شده در مقطع ۳.

انحراف معیار استاندارد (σ): 0.07228 mm

3σ : 0.21684 mm

بیشینه خطا: 0.11 mm

میانگین خطا: 0.059 mm

برای به دست آوردن مدل سه بعدی از جسم متحرک باید دوربین به طور متوالی از قطعه عکس برداری کند. همچنین می توان با فیلم برداری از قطعه ی متحرک، از فیلم تصاویر دلخواه گرفت. گرفتن عکس از فیلم، توسط نرم افزار معرفی شده در این بخش امکان پذیر است.

۸. استخراج پروفیل سه بعدی و مدل CAD

برای بازیابی مدل سه بعدی جسم باید از پروفیل های دوبعدی که در قسمت قبل استخراج شد استفاده کرد. برای بازیابی مدل CAD در این مرحله از نرم افزار مدل سازی Mechanical Desktop و محیط برنامه نویسی اتولیسپ استفاده شده است. زبان برنامه نویسی اتولیسپ در واقع انتقال دهنده ی اطلاعات از نرم افزار national instruments labview به Mechanical Desktop است. مراحل کار در اتولیسپ بدین صورت است که ابتدا مختصات نقاط استخراج شده در قسمت قبل برای هر تصویر به عنوان ورودی دریافت شده و با عبور منحنی مناسب شکل دوبعدی از پروفیل ها تهیه می شود. نهایتاً با استفاده از عملگرهای CAD مدل سه بعدی از جسم ایجاد می شود. در نرم افزارهای CAD از مدل های چندضلعی، Spline و pline برای تولید منحنی ها و سطوح استفاده می شود؛ در اینجا با توجه به داشتن لبه های شکسته و تیز از pline برای ایجاد پروفیل دوبعدی استفاده شده است. در شکل ۲۶ مدل سه بعدی جسم که از سه مقطع توضیح داده شده عبور می کند، نشان داده شده است.

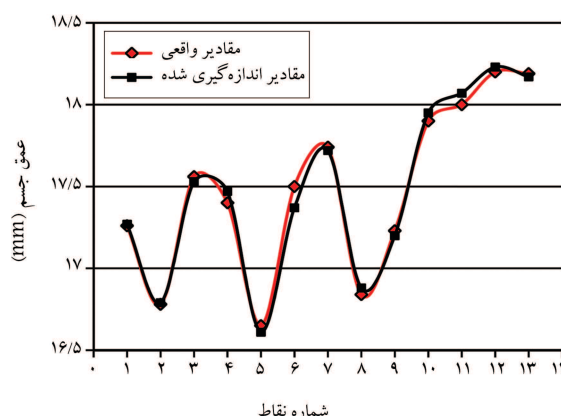
با انتخاب جنس ماده (در اینجا فولاد)، خواص قطعه از قبیل وزن، حجم و دیگر پارامترها قابل استخراج است (شکل ۲۷).

۹. تحلیل قطعه ی مدل شده

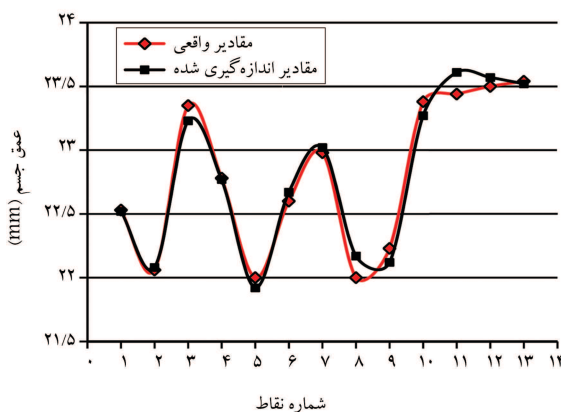
پس از بازیابی مدل سه بعدی امکان انجام تحلیل های مختلف و درحقیقت کنترل کیفیت محصول تولیدی امکان پذیر است. به عنوان مثال اگر قرار است قطعه ی تولیدی تحت تأثیر نیروهای مختلفی قرار گیرد با انتقال مدل ایجاد شده به نرم افزارهای اجزاء



شکل ۲۲. اندازه گیری عمق نقاط نسبت به سطح نوار نقاله.



شکل ۲۳. مقادیر واقعی و اندازه گیری شده در مقطع ۱.



شکل ۲۴. مقادیر واقعی و اندازه گیری شده در مقطع ۲.

با توجه به شکل ۲۴ مقدار انحراف معیار، بیشینه خطا و میانگین خطا برای مقطع شماره ۲ عبارت است از:

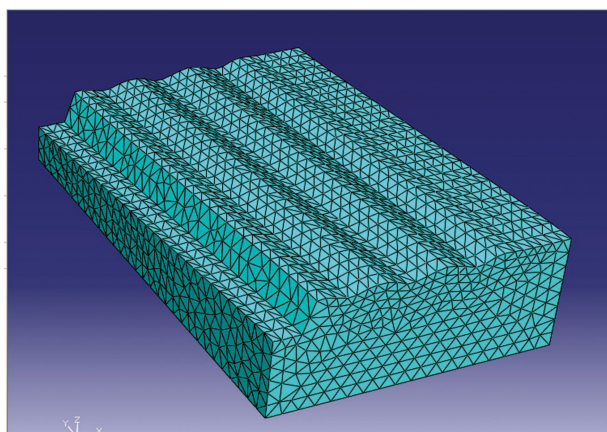
انحراف معیار استاندارد (σ): 0.005385 mm

3σ : 0.016155 mm

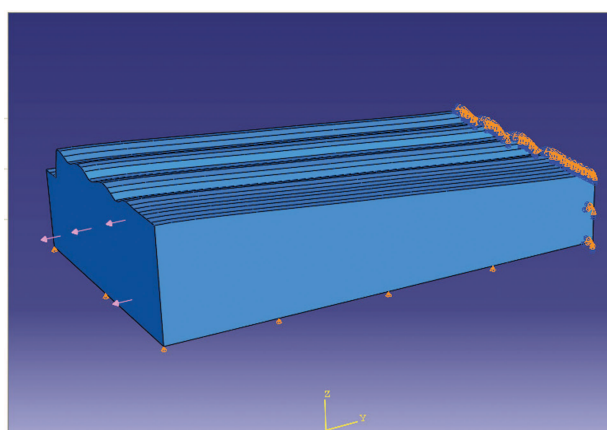
بیشینه خطا: 0.17 mm

میانگین خطا: 0.066 mm

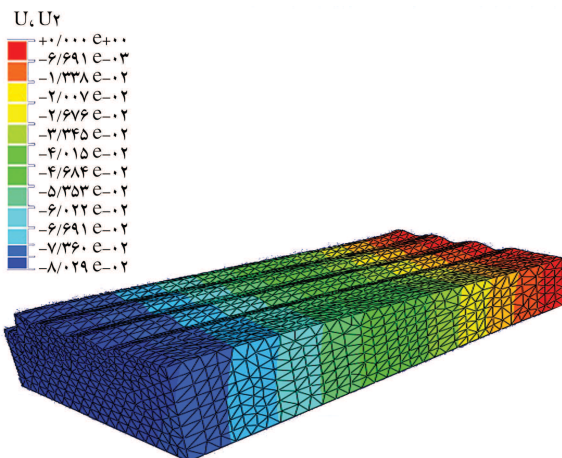
با توجه به شکل ۲۵ مقدار انحراف معیار، ماکسیمم خطا و میانگین خطا برای مقطع شماره ۳ به صورت زیر است:



شکل ۲۸. مدل سه بعدی و مش بندی شده ی جسم منتقل شده به نرم افزار ABAQUS.

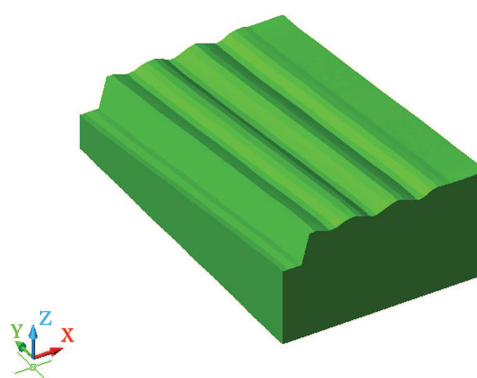


شکل ۲۹. مدل سه بعدی و بارگذاری شده ی جسم منتقل شده به نرم افزار ABAQUS.

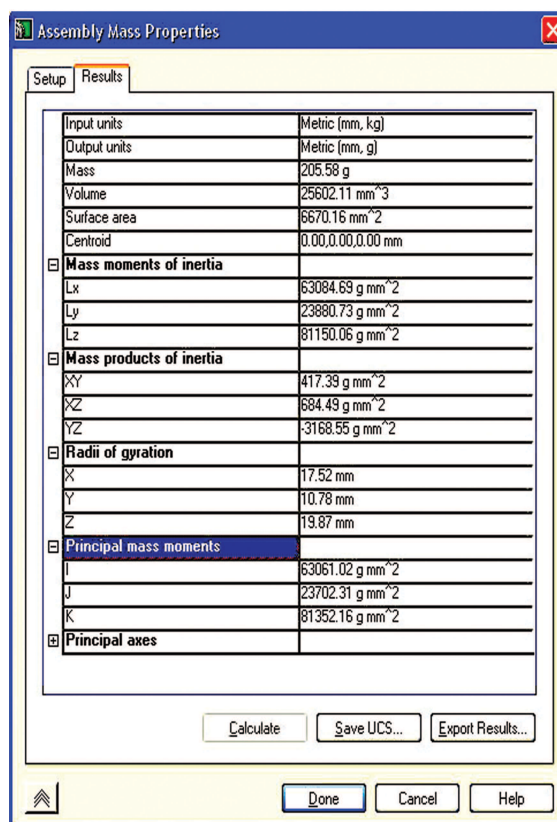


شکل ۳۰. کانتور جابه جایی جسم بعد از اعمال بار در نرم افزار ABAQUS.

و بررسی صحت عملکرد مدل سازی انجام شده است. برای اعمال شرایط مرزی صفحه ای از جسم که در مقابل محل اعمال بار قرار دارد در تمام جهات بدون حرکت، و صفحه ای زیری جسم نیز در جهت قائم محدود شده است. در شکل ۲۹ مدل سه بعدی و بارگذاری شده قابل مشاهده است. پس از اعمال بار نوبت به استخراج نتایج می رسد؛ برای مثال در شکل ۳۰ میزان جابه جایی جسم پس از اعمال بار نشان داده شده است. با تحلیل مدل و بررسی نتایج حاصل از این بار می توان تصحیحات لازم را قبل از کاربرد عملی قطعه انجام داد.



شکل ۲۶. مدل سه بعدی جسم.



شکل ۲۷. خواص قطعه ی مدل شده.

محدود و تحلیل تنش قابلیت اطمینان محصول واقعی و نه محصول طراحی شده را می توان کنترل کرد.

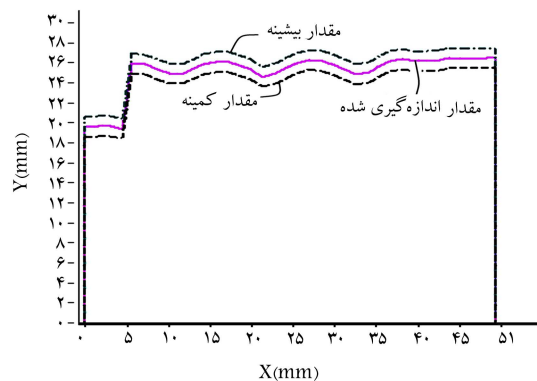
برای انتقال از نرم افزارهای CAD به نرم افزارهای تحلیلی مثل اجزاء محدود باید مدل ایجاد شده به فرمت های استاندارد ذخیره و بازیابی شود. نمونه ای از این فرمت ها عبارت اند از STEP، IGES و STL. در اینجا برای تحلیل قطعه از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS استفاده شده است، این نرم افزار قابلیت تحلیل تنش و ارائه ی خواص قطعه پس از اعمال شرایط بارگذاری تحت نیروهای مشخص را دارد. برای انتقال مدل از نرم افزار CAD و برای حفظ پارامترهای کامل هندسی از فرمت STEP استفاده شده است. شکل ۲۸ مدل سه بعدی جسم پس از انتقال به نرم افزار ABAQUS را نشان می دهد. با اعمال یک بار کششی محوری فرضی ۲۰۰ Mpa، قطعه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در واقع اعمال بار برای مشاهده

است یا باید از خط تولید خارج شود. نحوه‌ی کار بدین صورت است که در گراف حاصل از پروفیل دوبعدی (شکل ۳۱)، مقدار پیشینه و کمینه‌ی تعریف شده در تولرانس نیز ترسیم می‌شود و مقایسه به راحتی امکان پذیر است. مزیت استفاده از گراف‌ها در نمایش داده‌ها علاوه بر افزایش سرعت تصمیم‌گیری اپراتور، افزایش دقت اپراتور، کاهش زمان بررسی اندازه داده‌ها، خسته‌کننده نبودن عملیات برای اپراتور به دلیل عدم نیاز به کنترل تک تک داده‌ها با محدوده‌ی اندازه‌گیری تعریف شده‌شان است. با توجه به گراف موجود امکان تشخیص محل خطا نیز وجود دارد. در شکل ۳۱ گراف قطعه‌ی مورد نظر همراه با محدوده‌ی تولرانس فرضی نشان داده شده است.

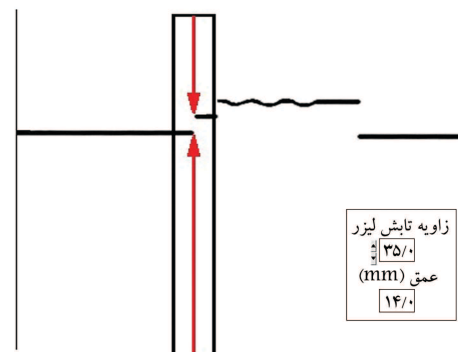
همچنین می‌توان ضخامت در هر نقطه از پروفیل را اندازه‌گیری کرد؛ برای نمونه در شکل ۳۲ ضخامت در یک نقطه‌ی دلخواه محاسبه شده است. برای محاسبه‌ی ارتفاع باید زاویه‌ی نور لیزر را وارد و سپس با مشخص کردن محدوده‌ی مورد نظر این پارامتر را محاسبه کرد.

۱۱. نتیجه‌گیری

سیستم طراحی و پیاده‌سازی شده در این پروژه اسکنر لیزری از نوع تجهیزات ثابت است. هدف این پروژه دستیابی به دقت بالا در استخراج ابعاد جسم و همچنین استخراج مدل سه‌بعدی جسم است. با توجه به انتخاب سیستم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری و همچنین عملیات کالیبراسیون توضیح داده شده، دوربین با دقت بسیار خوبی کالیبره و میانگین خطای نسبی 0.001 بود. دقت سیستم اسکنر و مدل ایجاد شده در حد 0.055 میلی‌متر است. با بهبود قطعات سخت‌افزاری، به عنوان مثال لیزر با شدت نور یکنواخت، می‌توان به دقت‌های بالاتری رسید. از دیگر مزایای این سیستم تهیه‌ی مدل CAD واقعی از جسم تولید شده است، بدین ترتیب امکان تحلیل‌های مهندسی روی جسم واقعی و نه جسم طراحی شده امکان پذیر می‌شود. این تحلیل‌ها را می‌توان به صورت فوری انجام داد.



شکل ۳۱. پروفیل دوبعدی قطعه همراه با محدوده تولرانس قابل قبول.



شکل ۳۲. محاسبه‌ی ضخامت در یک نقطه‌ی دلخواه.

۱۰. کنترل کیفیت

از دیگر قابلیت‌های نرم‌افزار کنترل ارتفاع، تعیین ضخامت قطعه و مقایسه‌ی آن با مقدار تولرانس است برای این که مشخص شود قطعه‌ی تولیدی قابل قبول

منابع (References)

1. Stjepan, J. and Nenad, D. "The assessment of structured light and laser scanning methods in 3D shape measurements", *4th I. Congress of Croatian Society of Mechanics*, pp. 237-244 (2003).
2. Lartigue, C., Contri, A. and Bourdet, P. "Digitised point quality in relation with point exploitation", *Measurement*, **32**, pp. 193-203 (2002).
3. Son, S., Park, H. and Lee, K.H. "Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection", *I. J. of Machine Tools & Manufacture*, **42**, pp. 889-897 (2002).
4. Song, L., Qu, X., Yang, Y., Chen, Y. and Ye, S. "Application of structured lighting sensor for online measurement", *Optics and Lasers in Engineering*, **43**, pp. 1118-1126 (2005).
5. Stjepan, J. and Nenad, D. "3D Shape measurement influencing factors", *NDT-Competence & Safety*, pp. 109-116 (2004).
6. Paakkari, J. "On-line flatness measurement of large steel plates using moiré topography", *Technical Re-*

- search Center of Finland Espoo Publications*, **350**, pp. 88 (1998).
7. Xie, Z., Wang, J. and Zhang, Q. "Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system", *I. J. of Machine Tools & Manufacture*, **45**, pp. 1474-1486 (2005).
8. Wong, A.K.C., Niu, P. and He. X. "Fast acquisition of dense depth data by a new structured light scheme", *Computer Vision and Image Understanding*, **98**, pp. 398-422 (2005).
9. Lombardo, V., Marzulli, T., Pappalettere, C. and Sforza, P. "A time-of- scan laser triangulation technique for distance measurements", *Optics and Lasers in Engineering*, **39**, pp. 247-254 (2003).
10. Khalili, K. and Nazemsadat, S.M. "Improved accuracy of on-line tire profile measurement using a novel on-line calibration", *Proceeding of Seventh IASTED I. Conference*, pp. 59-63 (2007).
11. Zolfaghari, H. and Khalili, K. "On-line 3D geometric model reconstruction", *Lecture Notes in Computer Science, Computational Science ICCS, Part II, LNCS5102*, pp 146-152 (2008).