



بهبود دقت اسکنر لیزری با کالیبراسیون همزمان لیزر و دوربین و استفاده از تکنیک اعمال نویز

خلیل خلیلی^{۱*}، سیامک خطیبی^۲، سید محمد امام^۳

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار مهندسی کامپیوتر، کالج تکنولوژی بلکینگ، کارلسکرونا، سوئد

۳- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، kkhali@birjand.ac.ir

چکیده- اسکنر لیزری مثلث‌بندی از مرسومترین روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد. یکی از پارامترهای موثر بر دقت اسکنر، نوع دوربین (سنسور) به کار برده شده می‌باشد. خطای حاصل از کوانتیزه کردن (نمونه‌برداری) باعث ایجاد خطای بعدی در بازیابی عمق خواهد شد. بنابراین خطای مدل‌سازی رابطه مستقیم با اندازه پیکسل دارد. با کاهش اندازه پیکسل دوربین امکان کاهش خطای کوانتیزه کردن وجود دارد ولی به دلیل کاهش نسبت سیگنال به نویز، کیفیت تصویر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. با توجه به محدودیت در اندازه پیکسل، در این مقاله جهت استخراج تصویر با کیفیت بالا از تکنیک اعمال نویز و روش بدیع ایجاد جابه‌جایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین در حین فرایند تصویربرداری استفاده شده است. اندازه‌گیری زاویه تابش لیزر جهت استفاده از روش مثلث‌بندی، از دیگر منابع مهم خطا می‌باشد. در این مقاله کالیبراسیون لیزر و دوربین به صورت همزمان و بدون نیاز به وسیله مکانیکی اضافی انجام گرفته است. مقاله حاضر ضمن بیان اصول روش ارائه شده به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند اعمال نویز پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر بهبود قابل توجه دقت اندازه‌گیری می‌باشد. تکنیک ارائه شده به صورت تجربی پیاده‌سازی و مطالعه تجربی صحت تکنیک و نتایج را تایید می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی گزارش شده‌اند.

کلیدواژه‌گان: اسکن لیزری، تکنیک مثلث‌بندی، اعمال نویز، تحلیل خطا

Improving the accuracy of laser scanning using dithering technique and simultaneous laser and camera calibration

K. Khalili^{1*}, S. Khatibi², S. M. Emam³

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran

2- Assoc. Prof., Com. Eng., Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden

3- PhD Student, Mech. Eng., Univ. of Birjand, Birjand, Iran

* P.O. B. 97175/615 Birjand, kkhali@birjand.ac.ir

Abstract- Triangulation technique is one of the most commonly techniques used in three dimensional measurements. The depth reconstruction accuracy is a direct impact of the quantization process, and so it is related to the pixel size of the sensor. By decreasing the pixel size, the accuracy can be improved however it will affect the quality of the image as it reduces the SNR. Dithering technique may be used to reduce the errors during quantization. The current study introduces a novel technique in which a relative fine movement between object and sensor is generated during picture capture. The calibration of laser and camera is another important factor affecting the accuracy of the scanner. In this study, the laser is calibrated in high precision with the camera simultaneously without any extra mechanical device. The paper firstly describes the theory of the noise introduction technique followed by modeling and simulation of the process. The results obtained from simulation show great improvement in measurement accuracy. To evaluate the result in a real world, a control rig was designed and built following which experiments were performed. The results showed considerable improvement in measurement accuracy. The result of both simulation and experiments are reported.

Keywords: Laser Scanning, Triangulation Technique, Dithering Technique, Error Analysis

۱- مقدمه

اسکن سه بعدی فرایندی است که طی آن ابر نقاط^۱ اندازه گیری شده توسط سیستم های مختلف به مختصات سه بعدی تبدیل می شود. از کاربردهای مدل سه بعدی قطعات می توان به مواردی از قبیل بازرسی قطعات، مهندسی معکوس، تجسم و انیمیشن اشاره کرد. امروزه بسیاری از قطعات تولیدی توسط ماشین های CNC تولید می شوند. اطلاعات ورودی این ماشین ها معمولا مدل CAD قطعه می باشد. بسیاری از قطعات موجود فاقد نقشه صنعتی جهت ساخت هستند. در این گذار تکنولوژی اسکن سه بعدی امکان دیجیتالی کردن دقیق قطعه و استخراج پروفایل سه بعدی آن و به دنبال آن تهیه مدل CAD را برای تولید دوباره و مهندسی معکوس فراهم می آورد.

رهیافت های متفاوتی جهت اسکن کردن سه بعدی یک موضوع وجود دارد. در این میان تکنولوژی اپتیکی (ماشین بینایی) به دلیل انعطاف پذیری و سرعت بیشتر در رقصی کردن سطوح، ترجیح داده می شود، ضمن آنکه این روش ها از دقت و قدرت تفکیک پذیری قابل قبولی برخوردار می باشند. استخراج مدل سه بعدی از تصاویر گرفته شده از جسم بر اساس نورهای ساختاریافته، یکی از متداولترین روش های مدل سازی با تکنیک ماشین بینایی است [۱-۳]. روش های بینایی با محدودیت هایی نیز مواجه هستند. کیفیت پایین و حساسیت به نور محیط از محدودیت اصلی این فناوری برای کاربردهای عملی است. یکی از تکنیک های موجود جهت بهبود دقت، استفاده از الگوهای نوری با کدبندی مخصوص برای بازسازی مدل اجسام است [۴]. در این روش از مجموعه نوارهای نوری رنگی با فواصل نوری سفید استفاده می شود که این الگو دارای طبقه بندی و ترتیب رنگ مشخصی است. این روش در مقابل نور کنترل نشده محیط و تداخل رنگ ها کارایی مناسبی دارد. اسکنرهایی با ساختار جدید برای بالا بردن دقت مدل سازی و کاهش عدم قطعیت در عمق یابی با الگوریتم استریو پیشنهاد شده اند که باعث افزایش دقت بر اساس جابه جایی بین دو عکس گرفته شده می شود [۵]. جابه جایی تصویر با تغییر زاویه همگرایی دوربین که از فیزیولوژی چشم انسان الگوبرداری شده است نیز امکان پذیر است [۶]. با استخراج نقاط متناظر در دو تصویر که موقعیت مکانی دریافتی مشابه از دو چشم دارند و همچنین زاویه

همگرایی آنها استخراج عمق با دقت بالاتری انجام می گیرد. از طرف دیگر، سخت افزار مورد استفاده در اسکنر مثل دقت لنز، رزولوشن دوربین و حافظه مورد استفاده، در تعیین دقت یک سیستم بینایی دخیل می باشند. از آنجایی که دوربین های دیجیتال، صفحه تصویر را به صورت آرایه ای از پیکسل ذخیره می کنند، بنابراین مکان هر نقطه در تصویر توسط مرکز پیکسلی که در آن واقع است تخمین زده می شود. خطای حاصل از فرایند کوانتیزه کردن^۲ باعث ایجاد خطای بعدی در مدل سازی و بازیابی عمق خواهد شد. بدلیل نسبت سیگنال به نویز بالا استفاده از پیکسل ها با اندازه بزرگ مطلوب است ولی از سوی دیگر بدلیل وضوح بالاتر تصویر و امکان بهتر بازیابی مدل، سنسورهایی با اندازه پیکسل کوچکتر ترجیح داده می شوند. با شبیه سازی دوربین برای یافتن اندازه پیکسل بهینه که بر روی سنسورهای دیجیتالی مختلفی انجام گرفته است، مشاهده شده است که اندازه پیکسل به نوع تکنولوژی ساخت سنسور بستگی دارد و کنترل این پارامتر برای بالا بردن دقت بازیابی عمق امکان پذیر نمی باشد [۷].

تکنیک اعمال نویز کاربرد فراوانی در زمینه پردازش صوت و تصویر دارد. با استفاده از این تکنیک در پردازش تصویر هنگامی که تعداد رنگ های یک تصویر کاهش می یابد، کیفیت این تصویر همچنان در حد قابل قبولی باقی خواهد ماند [۸]. این کاهش سطح و تعداد رنگ در هنگام استفاده از دستگاه های چاپ با تعداد رنگ محدود قابل اهمیت می باشد. با استفاده از این تکنیک یک نویز مشخص در هنگام کوانتیزه کردن تصویر به آن اعمال و از اعوجاج و به هم ریختگی تصویر جلوگیری می کند. بنابراین امکان بالا بردن دقت مدلسازی با استفاده از تجهیزات کم دقت، با استفاده از اعمال نویز وجود دارد [۹، ۱۰]. اعمال نویز از طریق جابه جایی دوربین یا جسم، جابه جایی منبع نوری و تغییرات روشنایی محیط در حین تصویربرداری امکان پذیر می باشد. از نظر تئوری با تعداد تکرار زیاد آزمایش برای موقعیت های مختلف سنسور و جسم (جابه جایی دوربین یا جسم)، امکان کاهش خطا به صفر وجود دارد. اگر چه تعداد دقیق مراحل آزمایش برای رسیدن به این دقت مشخص نیست ولی با انجام تعداد محدودی تکرار، دقت افزایش قابل ملاحظه ای خواهد داشت [۱۱].

1. Cloud of points

2. Quantization error

$$\frac{D}{X} = \frac{d}{f} \Rightarrow D = \frac{Xd}{f}$$

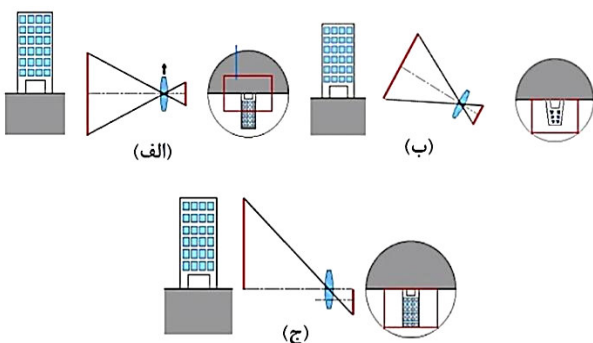
$$H = D \times \tan(\alpha) \quad (1)$$

در رابطه فوق f فاصله کانونی، α زاویه تابش لیزر نسبت به افق و d اندازه تصویر جسم (D) در سنسور دوربین می باشد.

۲-۱- اثر تغییر مکان سنسور در اسکنر لیزری

در بسیاری موارد برای گرفتن نمای جسمی که خارج از میدان دید دوربین باشد، نیاز به چرخاندن دوربین می باشد. این چرخش موجب اعوجاج جسم در تصویر گرفته شده می گردد. اگر مطابق شکل ۲ امکان ایجاد تغییر مکان کوچک میان لنز و سنسور دوربین وجود داشته باشد، مشاهده می شود که این تغییر مکان همان اثر چرخش دوربین را به وجود می آورد و نمای مورد نظر به تصویر کشیده می شود در حالی که از اعوجاج شکل نیز جلوگیری به عمل می آید.

در روش مثلث بندی نیز دوربین و لیزر باید با یک زاویه همگرایی مشخص چرخش نمایند تا قادر به گرفتن میدان دید مورد نظر باشند. با توجه به شکل ۳ بجای چرخش دوربین و لیزر می توان با اعمال یک تغییر مکان مناسب به سنسور، میدان دید مناسبی به دست آورد. محور نوری^۱ خطی است که از مرکز لنز می گذرد و بر صفحه سنسور عمود و محور اولیه^۲ به خطی گفته می شود که مرکز لنز و مرکز صفحه سنسور را به هم متصل می کند. α_c زاویه بین محور نوری دوربین با محور Z و معروف به زاویه همگرایی^۳ می باشد. زاویه تابش لیزر نسبت به محور Z با α_l نشان داده شده است.



شکل ۲ دو راه متفاوت برای گرفتن تصویر شی خارج از میدان دید، (الف) قبل از تنظیم (ب) چرخش دوربین (ج) تغییر مکان سنسور

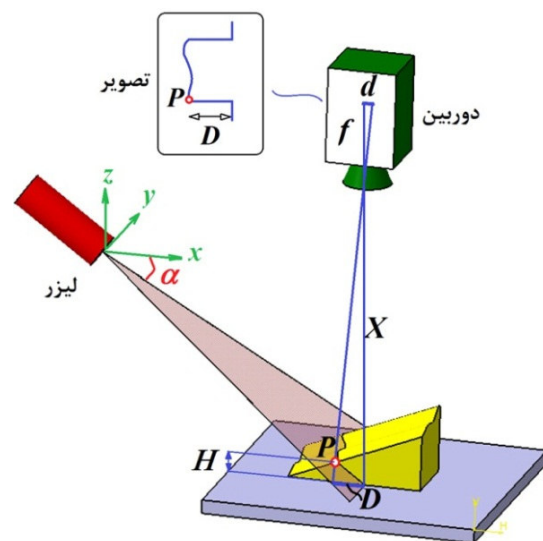
1. Optical axis
2. Primary axis
3. Convergence angle

هدف از این مقاله ارائه روشی با استفاده از اعمال نویز در حین عملیات اسکن و کالیبراسیون همزمان لیزر و دوربین جهت بهبود دقت اسکنرهای سه بعدی در دسترس می باشد که از لحاظ سخت افزاری دارای رزولوشن محدودی هستند.

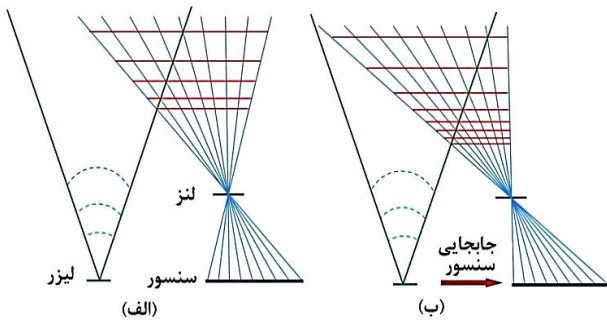
۲- اسکنر لیزری به روش مثلث بندی

در اسکنرهای نوری با تاباندن نور لیزر روی سطح قطعه و پردازش تصویر، بازیابی مدل سه بعدی از قطعه مورد نظر امکان پذیر می باشد. پس از برخورد نور با سطح قطعه، دوربین که مانند چشم انسان عمل می کند با استفاده از انعکاس نور، از جسم تصویر تهیه می کند. چشم انسان قادر به محاسبه فاصله به طور نسبی و همچنین مشخصات بافت از سطح قطعه را دارد، در حالیکه سیستم های نوری مختصات دقیق قطعه را بازیابی می کنند. در شکل ۱ ساختار کلی یک اسکنر مثلث بندی فعال با استفاده از نور ساختار یافته نشان داده شده است.

در این روش پرتو نور بایستی به سطح مبنا (سطحی که ارتفاع قطعه مورد اندازه گیری نسبت به آن سنجیده می شود) و سطح قطعه برخورد کند و انعکاس آن توسط دوربین دیجیتال دریافت شود. با توجه به شکل ۱ با داشتن فاصله کانونی دوربین و همچنین فاصله سطح مبنا نسبت به دوربین که در قسمت کالیبراسیون محاسبه می شود، می توان مقدار ارتفاع جسم (H) را در نقاط مورد نظر به دست آورد. به عنوان مثال، مقدار ارتفاع در نقطه P با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می باشد.



شکل ۱ ساختار اسکنر مثلث بندی لیزری فعال

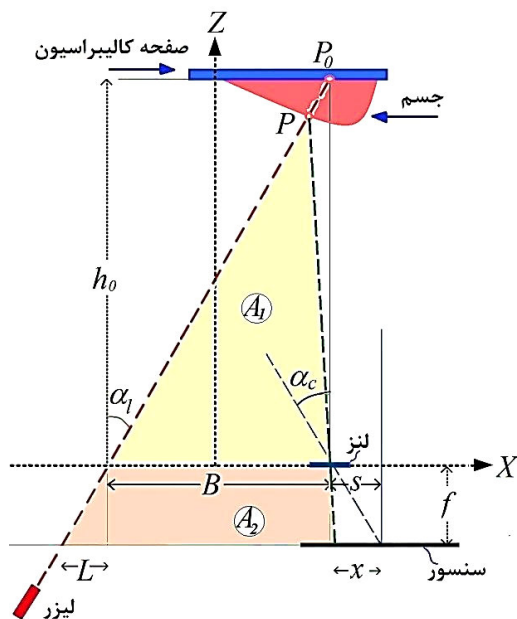


شکل ۴ اثر تغییر مکان نسبی بین سنسور و لنز روی میدان دید و دقت بازیابی مدل، الف) قبل از جابه‌جایی ب) بعد از جابه‌جایی سنسور

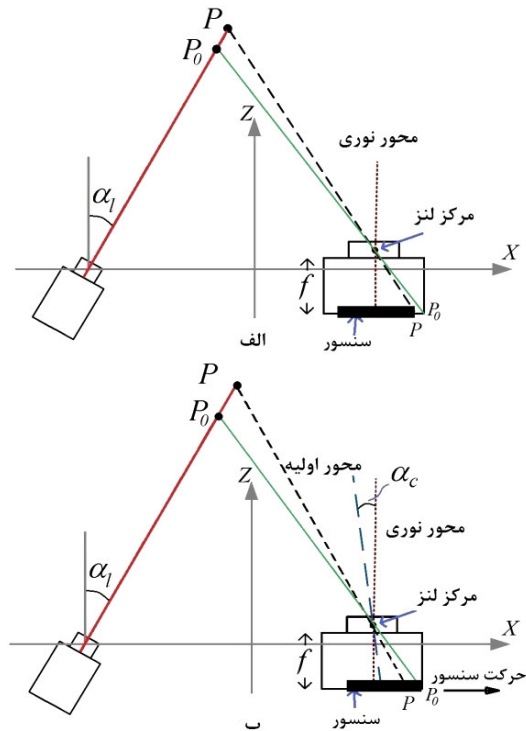
۳- مدل ریاضی استخراج عمق

شکل ۵ اسکنر مثلث‌بندی در صفحه X-Z نشان داده شده است. مبدأ مختصات بین خط تابش لیزر و لنز دوربین و در وسط آن‌ها در نظر گرفته شده است. s مقدار شیفت مرکز لنز نسبت به مرکز سنسور در راستای افق و قابل تغییر می‌باشد.

در روابط، اگر جابه‌جایی سنسور به سمت راست باشد، s مثبت و در جهت برعکس منفی است. x مختصات تصویر نقطه P در صفحه تصویر و در امتداد محور X می‌باشد. بنابراین مقدار عمق نقطه P با استفاده از رابطه بین مساحت شکل‌های A_1 و A_2 و مطابق رابطه (۲) تخمین زده می‌شود.



شکل ۵ اسکنر مثلث‌بندی در صفحه X-Z و مختصات نقاط در تصویر



شکل ۳ اسکنر لیزری، الف) زاویه همگرایی صفر ب) $\alpha_c \neq 0$

با توجه به رزولوشن اسکنر، بازیابی عمق با دقت محدودی قابل استخراج می‌باشد. هر چه نقاط موجود در فضا به اسکنر و در واقع دوربین نزدیکتر باشد مقدار خطا کمتر و امکان بازیابی عمق با دقت بالاتر امکان‌پذیر است. بنابراین می‌توان عمق یا مختصات نقاط موجود در فضا را در جهت محور نوری بر روی صفحات گسسته‌ای رقمی کرد. بنابراین نقاطی که دارای فاصله یکسانی نسبت به دوربین هستند در یک صفحه قرار می‌گیرند. همانطور که در بخش مدل ریاضی توضیح داده خواهد شد، محل قرارگیری هر یک از این صفحات در راستای محور نوری (Z) رابطه غیرخطی و معکوس با موقعیت تصویر نقاط واقع در این صفحات، در مرجع مختصات تصویر دارد و هر چه از اسکنر دور شویم، فاصله این صفحات نسبت به هم بتدریج بیشتر می‌شود. در شکل ۴ صفحات مذکور با خطوط موازی افقی نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که با حرکت نسبی بین سنسور و لنز در جهت نشان داده شده، صفحاتی که در فاصله کمتری نسبت به اسکنر واقع هستند، به یکدیگر نیز نزدیکتر می‌شوند. اگر نقطه‌ای از فضا دقیقاً بر روی یکی از این خطوط واقع شود مقدار عمق بدون خطای کوانتیزه کردن، بازیابی خواهد شد.

$$Z_t + \frac{\Delta Z_t}{2} = \frac{f h_0 \tan(\alpha_1)}{n_t \Delta D + S + L + \frac{(n_t \Delta D + S + L) \Delta D}{2(n_{t+1} \Delta D + S + L) + \Delta D}} \quad (4)$$

با مقایسه سمت راست دو رابطه (۲) و (۴) مقدار سیگنال نویز، ΔS_t ، مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود. ΔS_t نشان دهنده جابه‌جایی سنسور جهت تغییر مکان صفحات جدید به وسط دو صفحه متوالی n_t و n_{t+1} می‌باشد.

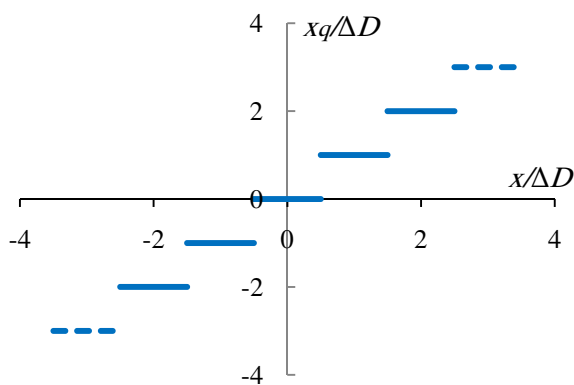
$$\Delta S_t = \frac{(n_t \Delta D + S + L) \Delta D}{2(n_{t+1} \Delta D + S + L) + \Delta D} \quad (5)$$

۴- محاسبه مقدار نویز جهت بهبود دقت

در این قسمت هدف، محاسبه مقدار نویز یا همان جابه‌جایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین جهت بهبود دقت اسکنر می‌باشد. با توجه به خطای حاصل از گرد کردن نقاط در سنسور دوربین، اگر مختصات واقعی نقاط در صفحه تصویر (x) را به عنوان ورودی تابع رقمی‌کننده در دوربین و مقادیر کوانتیزه شده (x_q)، خروجی در نظر گرفته شود، بنابراین مقدار نرمال مختصات کوانتیزه شده نقاط نسبت به مقدار نرمال مختصات واقعی نقاط با توجه به اندازه هر پیکسل (ΔD) مطابق شکل ۶ تغییر خواهد کرد، [۱۳]. رفتار تابع پله‌ای شکل فوق را می‌توان به صورت تعریف تحلیلی مطابق رابطه (۶) تبدیل نمود.

$$x_q = \left\lfloor \frac{x + \frac{\Delta D}{2}}{\Delta D} \right\rfloor \times \Delta D$$

$$q_h(x) = x_q - x = \frac{\Delta D}{2} - \left\langle \frac{x}{\Delta D} + 0.5 \right\rangle \Delta D \quad (6)$$



شکل ۶ رفتار ورودی و خروجی تابع رقمی‌کننده سنسور (دوربین)

مساحت مثلث $(A_1 + A_2)$ = مساحت مثلث A_1 + مساحت دوزنقه A_2

$$\Leftrightarrow Z(n) = \frac{fB}{n\Delta D + S + L}$$

$$L = f \tan(\alpha_1)$$

$$B = h_0 \tan(\alpha_1)$$

$$n = \left\lfloor \frac{x}{\Delta D} \right\rfloor = x_q \quad (2)$$

ΔD اندازه پیکسل دوربین CCD و نقش تعیین کننده‌ای در محاسبات مربوط به دقت سیستم اسکنر مثلث‌بندی خواهد داشت. با توجه به خطای کوانتیزه کردن، مختصات نقطه در صفحه تصویر براساس مرکز پیکسلی که در آن واقع شده است تخمین زده می‌شود که برابر با x_q (برحسب پیکسل) خواهد بود. فاصله بین لیزر و لنز دوربین در راستای محور x با B نشان داده شده است. n یک عدد صحیح است که مربوط به یکی از صفحات موازی (خطوط افقی و موازی در شکل ۴) می‌باشد. مقدار عمق رابطه معکوس با n دارد. فاصله بین صفحات مذکور نشان‌دهنده خطای کوانتیزه کردن در فرآیند بازیابی عمق و تابعی غیر خطی از n می‌باشد. در این رابطه [۰] نشان‌دهنده گرد کردن عدد به نزدیکترین عدد صحیح به آن می‌باشد.

با اعمال نویز به سیگنال ورودی هر سیستم، قبل از فرآیند کوانتیزه کردن، خروجی آن سیستم با تغییرات هموارتری در خواص آماری به دست خواهد آمد [۱۲]. در اسکنر به روش مثلث‌بندی تابع رقمی‌کننده دوربین و سیگنالی که رقمی می‌شود همان نقاط تصویر شده در صفحه سنسور (x) می‌باشد. با توجه به شکل ۵ امکان جابه‌جایی صفحات موازی با ایجاد حرکت نسبی بین سنسور و لنز وجود دارد.

به عنوان مثال برای محاسبه اینکه صفحات موازی جدید، بین هر دو صفحه قبلی ایجاد شود، ابتدا با به‌کارگیری رابطه (۲) فاصله بین دو صفحه متوالی n_t و n_{t+1} مطابق رابطه (۳) استخراج می‌شود.

$$\Delta Z_t = |Z_{t+1} - Z_t|$$

$$= \frac{h_0 \tan(\alpha_1) f \Delta D}{[n_t \Delta D + S + L][n_{t+1} \Delta D + S + L]} \quad (3)$$

اگر تمام صفحات به اندازه $\frac{\Delta Z_t}{2}$ نسبت به موقعیت خود جابه‌جا شوند سپس صفحاتی جدیدی خواهیم داشت که بین هر دو صفحه متوالی قبلی ایجاد شده است. بنابراین مقدار عمق صفحات جدید مطابق رابطه (۴) محاسبه شود.

$$\bar{q}_h = E(q_h(x+s)) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} q_h(x+s)P(s)ds \quad (10)$$

$E(\cdot)$ امید ریاضی و مقدار میانگین تابعی از متغیر رندوم را محاسبه می‌کند. $P(s)$ مقدار تابع توزیع احتمال برای نویز گسسته s می‌باشد که مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$P(s) = \frac{1}{M} \sum_{k \in K} \delta\left(s - \frac{k}{M} \Delta D\right), M \geq 2 \\ \begin{cases} K = \left[-\frac{M}{2}, \dots, -1, 1, \dots, \frac{M}{2}\right] & M = \text{زوج} \\ K = \left[-\frac{(M-1)}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{(M-1)}{2}\right] & M = \text{فرد} \end{cases} \quad (11)$$

در این رابطه $\delta(\cdot)$ تابع دلتای دیراک می‌باشد. در مقاله حاضر از دو تصویر برای استخراج تصویر استفاده خواهد شد بنابراین در رابطه فوق $M=2$ در نظر گرفته می‌شود و مقدار تابع توزیع احتمال برای نویز مورد نظر با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P(s) = \frac{1}{2} \left[\delta\left(s + \frac{\Delta D}{2}\right) + \delta\left(s - \frac{\Delta D}{2}\right) \right] \quad (12)$$

با جایگذاری روابط (۷) و (۱۲) در رابطه (۱۰)، مقدار میانگین خطای رقمی کردن با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$\bar{q}_h(q_h, s) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Delta D (-1)^{k+1}}{\pi k} \cos\left(\pi \frac{k}{\Delta D} s\right) \\ \times \sin\left(2\pi \frac{k}{\Delta D} q_h\right) \quad (13)$$

در شکل ۸ مقدار \bar{q}_h نسبت به تغییرات q_h برای چندین حالت اعمال نویز (s) نشان داده شده است. در محاسبات فوق نیز، از دوربین با اندازه پیکسل مشابه در قسمت قبل استفاده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با اعمال نویز به اندازه $\Delta D/5$ میانگین خطای کوانتیزه کردن دارای حداقل دامنه $\Delta D/5$ و مقدار آن در بازه $\pm 0.25 \Delta D$ تغییر می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال نویز مقدار دامنه و اندازه خطای کوانتیزه کردن به نصف حالت قبل از اعمال نویز کاهش پیدا کرده و مقدار دقت اندازه‌گیری دو برابر می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج این بخش، برای بهبود دقت به اندازه دو برابر لازم است از جسم مورد نظر دو تصویر با موقعیت نسبی لنز و سنسور متفاوت به اندازه $\Delta D/5$ گرفته و از میانگین عمق به دست آمده از دو تصویر استفاده شود.

نماد $\langle \cdot \rangle$ و $[\cdot]$ به ترتیب نشان‌دهنده قسمت اعشاری و قسمت صحیح عدد داخل آن‌ها می‌باشد. تابع دندانه اره‌ای شکل مربوط به رابطه (۶) را می‌توان با استفاده از سری فوریه به صورت رابطه (۷) تبدیل نمود.

$$q_h(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Delta D}{\pi k} (-1)^k \sin\left(2\pi k \frac{x}{\Delta D}\right) \quad (7)$$

در شکل ۷ مقدار تابع q_h در یک دوره تناوب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار خطای کوانتیزه کردن در بازه $\pm \frac{\Delta D}{2}$ تغییر می‌کند. در این رابطه از دوربین به کار گرفته شده در بخش آزمایش تجربی با اندازه پیکسل 0.0833×0.0833 میلی‌متر مربع استفاده شده است.

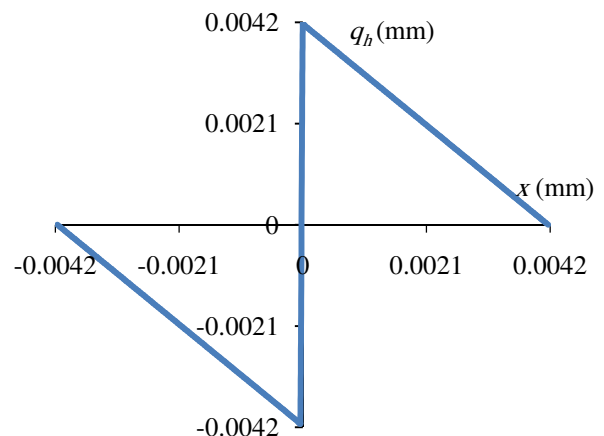
با استفاده از رابطه (۸) تابع توزیع احتمال (PDF) برای تابع خطای کوانتیزه‌شدن قابل محاسبه می‌باشد.

$$P(q_h) = \frac{1}{\Delta D} - \frac{\Delta D}{2} \leq q_h \leq \frac{\Delta D}{2} \quad (8)$$

با فاصله گرفتن از دوربین فاصله بین صفحات موازی افزایش پیدا می‌کند. فاصله بین هر دو صفحه متوالی، n_t و n_{t+1} مطابق رابطه (۹) قابل استخراج می‌باشد.

$$q_{zt} = \frac{f h_0 \tan(\alpha_t)}{n_t n_{t+1} \Delta D} \quad (9)$$

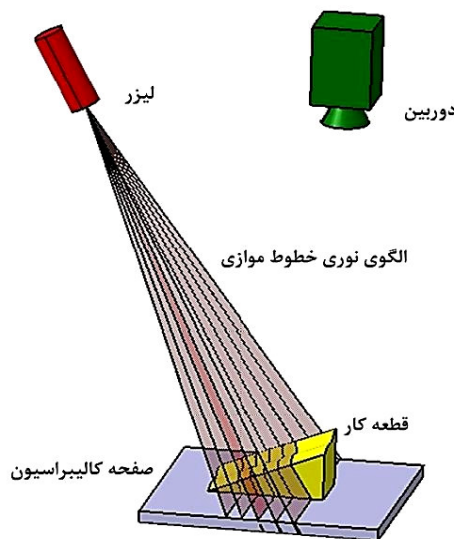
دو راه برای اعمال نویز به نقاط در صفحه تصویر قبل از رقمی کردن وجود دارد. اول تغییر مکان جسم در جهت محور x و دیگری تغییر موقعیت نسبی بین لنز و سنسور می‌باشد. مقدار میانگین خطای حاصل از رقمی کردن برای تغییر مکان‌های s در جهت محور x مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.



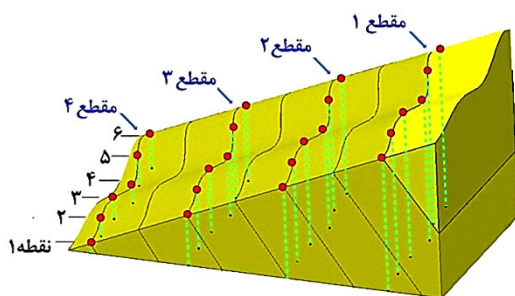
شکل ۷ مقدار عدم قطعیت در گرد کردن نقاط در یک دوره تناوب

با مدل‌سازی صفحه کالیبراسیون در نرم‌افزار مطلب پارامترهای کالیبراسیون شامل پارامترهای درونی و بیرونی استخراج می‌شود [۱۴]. در ابتدا پارامترهای کالیبراسیون (در بخش کالیبراسیون مربوطه مفصل‌تر توضیح داده خواهد شد) به عنوان ورودی به نرم‌افزار معرفی می‌شود. سپس با در نظر گرفتن صفحه کالیبراسیون مدل‌شده در مکان‌های مختلف عملیات کالیبراسیون انجام و از داده‌های کالیبراسیون جدید به دست آمده، برای انجام محاسبات استفاده می‌شود. در جدول ۱ مقادیر ورودی به نرم‌افزار برای پارامترهای درونی و همچنین پارامترهای بیرونی مربوط به دوربین و صفحه کالیبراسیون واقع در زیر جسم و مقادیر به دست آمده بعد از انجام کالیبراسیون نشان داده شده است.

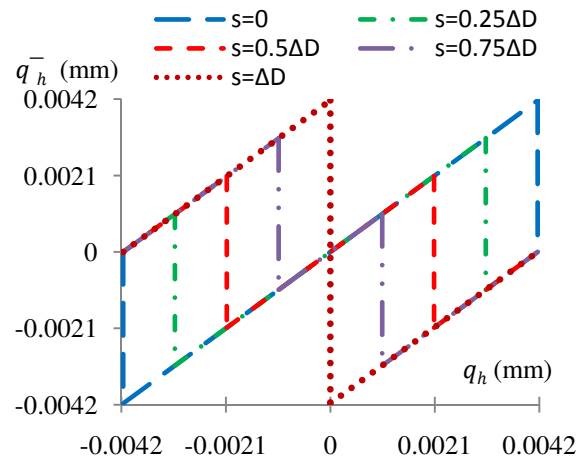
بعد از انجام کالیبراسیون، با استفاده از نرم‌افزار کتیا، نقاط انتخاب شده مطابق شکل ۱۰ روی صفحه کالیبراسیون واقع در زیر آن تصویر می‌شود (خط چین موجود در شکل).



شکل ۹ مدل‌سازی اجزا ساخت‌افزاری در کتیا



شکل ۱۰ مقاطع مورد نظر از جسم جهت بازیابی مدل



شکل ۸ مقدار میانگین خطای کوانتیزه‌کردن نسبت به تغییرات q_h

۵- شبیه‌سازی الگوریتم اعمال نويز

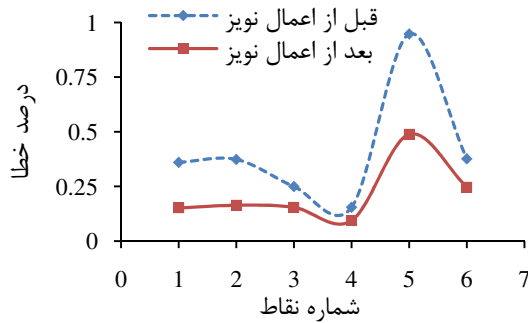
در این بخش نتایج تئوری بر روی یک سیستم اسکنر مثلث‌بندی شبیه‌سازی شده است. مدل‌سازی شماتیک اجزاء ساخت‌افزاری در شکل ۹ نشان داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار کتیا^۱ و مطلب^۲ الگوریتم اعمال نويز بر روی یک قطعه دلخواه و بدون نقشه قبلی مطابق شکل ۱۰ شبیه‌سازی شده است. شایان ذکر است که این قطعه در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی شده است و ابعاد واقعی آن با دستورات موجود در این نرم‌افزار قابل بازیابی خواهد بود. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود از برخورد صفحات تابش لیزر با قطعه‌کار، خطوطی ایجاد می‌شود که هدف از اسکنر لیزری استخراج این خطوط و در نهایت بازیابی مدل سه‌بعدی جسم از آن‌ها می‌باشد. با تغییر زاویه لیزر و یا تغییر زاویه بین صفحات تابش شده امکان تغییر تعداد سطح مقطع حاصل از برخورد نور لیزر با جسم امکان‌پذیر می‌باشد. در این شبیه‌سازی بازیابی مدل و تحلیل دقت بر روی چهار سطح مقطع ایجاد شده، صورت گرفته است.

ابتدا با تعیین زاویه لیزر به اندازه ۳۵ درجه نسبت به افق و مقدار زاویه یک درجه بین صفحات الگوی تابش مدل‌سازی در کتیا انجام می‌شود و از بین چندین سطح مقطع به دست آمده جهت تسریع در شبیه‌سازی، چهار مقطع از آن انتخاب می‌شود. سپس از هر منحنی ایجاد شده روی جسم مطابق شکل ۱۰ مختصات سه‌بعدی دقیق ۶ نقطه از آن توسط دستورات موجود در این نرم‌افزار استخراج می‌گردد.

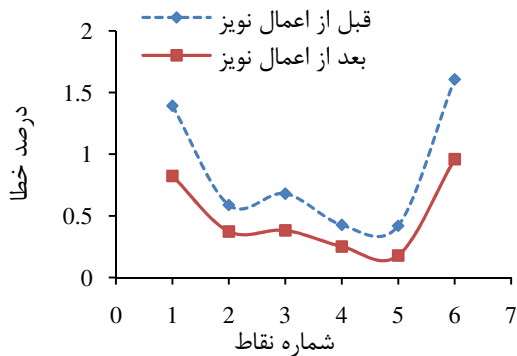
1. Catia
2. Matlab

جدول ۱ پارامترهای کالیبراسیون قبل و بعد از شبیه‌سازی

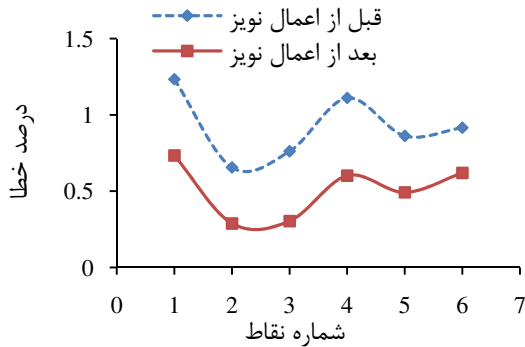
پارامتر	مقدار بعد از کالیبراسیون	مقدار ورودی	درصد خطا
فاصله کانونی	۲۵/۰۶۹ mm	۲۵mm	۰/۲۷۶
موقعیت مرکز لنز	۳۷۷(H)	۳۸۴(H) افقی	۱/۸۲
نسبت به صفحه تصویر	۲۷۸(V)	۲۸۸(V) عمودی	۳/۴۷
برحسب پیکسل			
	$T_x = ۹۴/۶mm$	$T_x = ۱۰۰mm$	۵/۴
	$T_y = ۷۸mm$	$T_y = ۸۰mm$	۲/۵
	$T_z = ۱۵۰۶/۵mm$	$T_z = ۱۵۰۰mm$	۰/۴۳
	$R_x = ۰/۰۱۵۵deg$	$R_x = ۰deg$	۱/۶
	$R_y = ۰/۰۰۵۷deg$	$R_y = ۰deg$	۰/۵۷
	$R_z = ۰/۰۰۸۴۱deg$	$R_z = ۰deg$	۰/۸۴



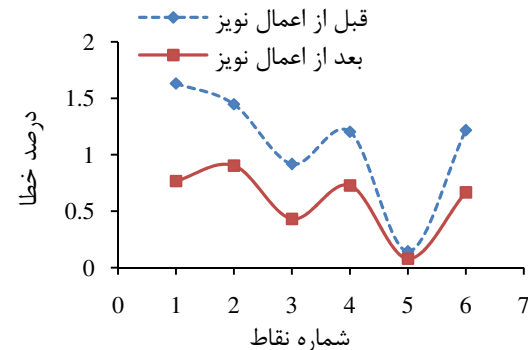
شکل ۱۲ تحلیل خطا مربوط به مقطع شماره ۱



شکل ۱۳ تحلیل خطا مربوط به مقطع شماره ۲

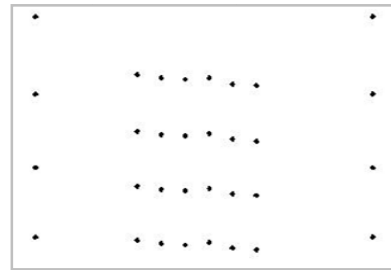


شکل ۱۴ تحلیل خطا مربوط به مقطع شماره ۳



شکل ۱۵ تحلیل خطا مربوط به مقطع شماره ۴

مطابق شکل ۱۱ از صفحه کالیبراسیون همراه با نقاط تصویر شده در آن تصاویر جدید گرفته و با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون استخراج شده مطابق جدول ۱ موقعیت نقاط در فضای سه‌بعدی با استفاده از الگوریتم مثلث‌بندی ذکر شده، استخراج می‌شود. در مرحله بعد عملیات فوق با تغییر مرکز لنز به اندازه ۰/۵ پیکسل در راستای افق دوباره تکرار می‌شود.



شکل ۱۱ نقاط میانی: نقاط روی سطح جسم تصویر شده در صفحه کالیبراسیون، نقاط کناری: نقاط واقع بر روی خطوط روی صفحه جهت انجام الگوریتم مثلث‌بندی

۶- نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۱۲ تا ۱۵ درصد خطای نقاط قبل و بعد از اعمال نویز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در اکثر موارد دقت بازیابی عمق بعد از اعمال نویز تقریباً ۲ برابر بهبود پیدا کرده است. درصد خطا با استفاده از رابطه (۱۴) استخراج شده است.

درصدخطا =

$$(۱۴) \times 100 = \frac{\left| \text{مقدار عمق با نرم‌افزار کتیا} - \text{مقدار محاسبه شده} \right|}{\text{مقدار عمق با نرم‌افزار کتیا}}$$

۷- پیاده‌سازی اسکنر مثلث‌بندی لیزری

در این قسمت مراحل آماده‌سازی یک سیستم آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش تجربی و بررسی صحت نتایج تئوری و شبیه‌سازی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در شکل ۱۶ اجزای سخت‌افزاری مشابه با اسکنر استفاده‌شده در قسمت شبیه‌سازی، نشان داده شده است. برای بررسی دقت سیستم اسکنر مورد نظر ابعاد یک موس کامپیوتری مطابق شکل ۱۷ استخراج می‌شود.

در این قسمت به بررسی اجزای اصلی سخت‌افزار استفاده شده در اسکنر شامل دوربین و لیزر پرداخته شده است.

۷-۱- دوربین

جهت اعمال نویز، می‌بایست سنسور دوربین مورد استفاده نسبت به لنز حرکت افقی داشته باشد که با جداسازی اجزای دوربین (سنسور و لنز)، که معمولاً به بدنه متصل هستند، دوربین مورد نظر ساخته می‌شود.

برای کنترل حرکت سنسور، نیاز است که بدنه دوربین به یک وسیله متحرک مکانیکی با قابلیت کنترل جابه‌جایی در حد میکرومتر متصل شود که در اینجا از یک موتور DC استفاده شده است. همچنین نیاز است که از یک تکیه‌گاه برای نزدیک نگاه داشتن لنز نسبت به دوربین استفاده گردد که این تکیه‌گاه نیز می‌بایست به ابزار متحرک مکانیکی متصل باشد. شکل ۱۸ اجزای اصلی نمونه اولیه دوربین مورد نظر را نشان می‌دهد.

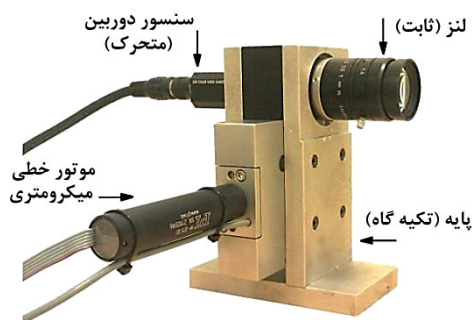
در این مقاله از دوربین سونی مدل XC-555p با ارایه سنسور CCD استفاده شده است که یک دوربین ویدیویی رنگی با سنسور ۱/۲ اینچ و اندازه $۷۵(W) \times ۲۲(D) \times ۲۲(H)$ میلی‌متر مکعب و عکس‌های گرفته شده توسط آن دارای رزولوشن $۷۶۶(V) \times ۷۶۸(H)$ می‌باشد. موتور متحرک خطی مدل PI M-125.10 دارای حداکثر جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر با رزولوشن $۰/۰۶$ میکرومتر می‌باشد. در نمونه اولیه دوربین از لنز تامرون مدل 23FM25SP استفاده شده است. این لنز از نوع C-mount با فاصله کانونی ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

۷-۲- لیزر

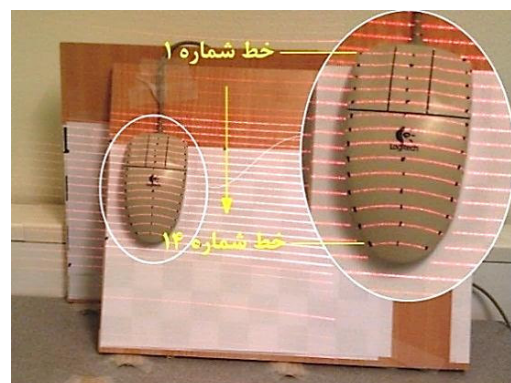
در این پروژه از یک لیزر دیود با الگوی تابش خطوط موازی با شدت روشنایی غیرگوسی استفاده شده است. لیزر دیود مورد استفاده در این پروژه، که از مدل LASNF519L0776351030 انتخاب شده است، در شکل ۱۹ نشان داده شده است. این دیود نوری دارای زاویه لنز ۳۰° درجه، طول موج ۶۳۵ nm و کلاس ایمنی آن از نوع لیزر دیود II می‌باشد. الگوی تابش شامل ۱۹ خط موازی و زاویه بین خطوط $۰/۷۷$ درجه می‌باشد. طول لیزر مذکور $۶۹/۳۴$ میلی‌متر و قطر آن $۱۸/۶۴$ میلی‌متر است و در فاصله کاری ۱ متر دارای خط اثری با طول $۰/۵۴ \text{ m}$ می‌باشد.



شکل ۱۶ اجزای سخت‌افزاری اسکنر لیزری



شکل ۱۸ اجزای دوربین جهت اعمال نویز



شکل ۱۷ قطعه کار مورد استفاده و ترتیب شماره‌گذاری خطوط

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R_c \times \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} + T_c \Rightarrow x_n = \begin{bmatrix} x_c \\ z_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (15)$$

x_n مختصات نرمال نقاط در مرجع دوربین می باشد. یکی از مهمترین منابع خطا در حین فرایند کالیبراسیون، اعوجاج لنز می باشد که باعث بروز خطای شعاعی و مماسی در حین انتقال نقاط از مرجع مختصات صفحه کالیبراسیون به صفحه تصویر می شود. در خطای شعاعی با توجه به کاهش دقت ساخت لبه های لنز نسبت به مرکز آن، نقاط تصویر در راستای شعاع لنز جابه جا خواهند شد (کشیدگی تصویر). از سوی دیگر به دلیل قرار نگرفتن محور اپتیکی دو طرف لنز در یک راستا، خطای مماسی در حین ثبت نقاط تصویر بروز خواهد داد. در این مقاله از روش ترکیبی هیکیلا و فاگراس برای کالیبراسیون استفاده شده است که ماتریس مربوط به خطای لنز، kc ، شامل ۵ درایه جهت تصحیح خطای شعاعی و مماسی می باشد، [۱۵]. بنابراین با استفاده از رابطه (۱۶) مقدار مختصات نرمال تصحیح شده نقاط، x_d ، قابل محاسبه می باشد.

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6)x_n + dx$$

$$dx = \begin{bmatrix} 2kc(3)xy + kc(4)(r^2 + 2x^2) \\ kc(3)(r^2 + 2y^2) + 2kc(4)xy \end{bmatrix}$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (16)$$

در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای درونی، مختصات نقاط طبق رابطه (۱۷) از مرجع دوربین به مرجع مختصات تصویر (u, v) انتقال می یابد.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = KK \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$KK = \begin{bmatrix} fc(1) & \theta \times fc(1) & u_o \\ 0 & fc(2) & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در رابطه فوق $fc(1)$ و $fc(2)$ مقدار فاصله کانونی در راستای افقی و عمودی است. فاصله کانونی برای سنسورهایی که پیکسل های آنها مربعی شکل نباشند دارای مقدار جزئی اختلاف در دو راستا می باشند. در این رابطه u_o و v_o مرکز مختصات صفحه تصویر با توجه به موقعیت نسبی لنز و سنسور دوربین می باشد. با توجه به شکل ۲۱، محورهای مختصات صفحه سنسور به دلیل خطای ساخت آن همیشه متعامد نیست و به اندازه θ نسبت به حالت قائمه اختلاف دارند.



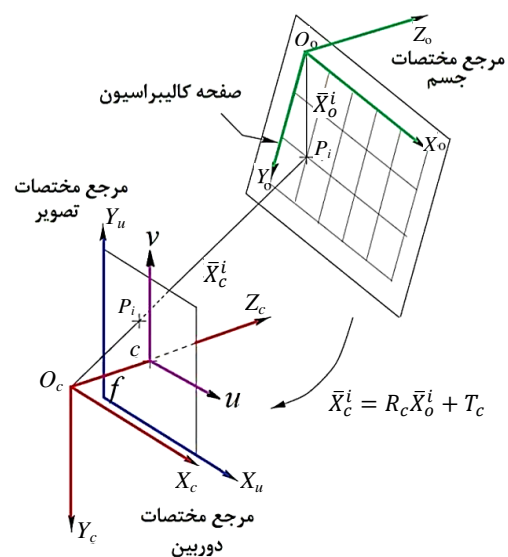
شکل ۱۹ منبع نور لیزری با لنز استوانه ای

۸- کالیبراسیون

مهمترین بخش، قبل از بازیابی مدل با استفاده از روش های اپتیکی عملیات کالیبراسیون می باشد. با انجام این مرحله امکان تبدیل مختصات جسم از واحد تصویر (پیکسل) به واحد متریک مورد نظر، امکان پذیر می باشد. کالیبراسیون شامل تشخیص و معرفی موقعیت مکانی دوربین و همچنین لیزر به سیستم و برقراری ارتباط بین آنها می باشد که در ادامه به شرح نحوه این فرایند پرداخته خواهد شد.

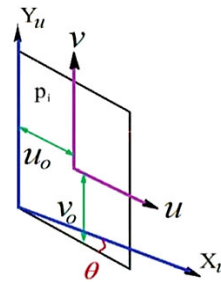
۸-۱- کالیبراسیون دوربین

یکی از متداولترین روش های کالیبراسیون، استفاده از صفحه شطرنجی مطابق شکل ۲۰ و برقراری ارتباط بین نقاط واقع در آن و نقاط متناظرشان در تصویر می باشد. با استفاده از ماتریس دوران R_c و ماتریس انتقال T_c ، نقاط واقع در صفحه شطرنجی از مرجع مختصات واقع در آن به مرجع مختصات دوربین انتقال می یابد، رابطه (۱۵).

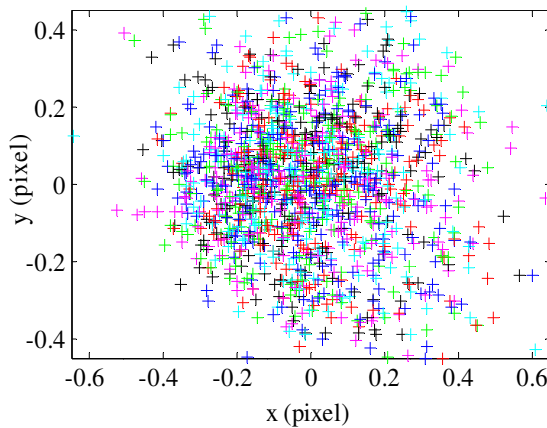


شکل ۲۰ تبدیلات پرسپکتیو در فرایند کالیبراسیون

انجام شود کالیبره خواهد شد. پس از یافتن پارامترهای کالیبراسیون و برقراری رابطه مجدد بین نقاط متناظر در صفحه کالیبراسیون و تصویر، برای تمام نقاط، مقدار خطای بین محل واقعی نقاط تصویر و نقاط استخراج شده از رابطه (۱۷) برحسب پیکسل در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مقدار ماکزیمم خطا در راستای x و y به ترتیب برابر $۰/۶۲۲۶$ پیکسل و $۰/۴۹۰۸$ پیکسل می‌باشد.



شکل ۲۱ تبدیلات پرسپکتیو در صفحه تصویر



شکل ۲۲ خطای کالیبراسیون برای نقاط صفحات کالیبراسیون

۸-۲- کالیبراسیون لیزر

هدف از کالیبراسیون لیزر یافتن موقعیت زاویه‌ای آن برای محاسبه عمق با استفاده از الگوریتم مثلث‌بندی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۶ جهت بازیابی مدل به‌جای یک صفحه کالیبراسیون از دو صفحه کالیبراسیون استفاده شده است که از برخورد صفحه تابش لیزر با هر صفحه کالیبراسیون، یک خط ایجاد می‌شود بنابراین با استفاده از هندسه صفحه‌ای که از این دو خط خواهد گذشت امکان تعیین زاویه تابش لیزر امکان‌پذیر خواهد شد. با توجه به نتایج قسمت قبل و اینکه ماکزیمم خطای کالیبراسیون برای نقاط واقع بر روی صفحه کالیبراسیون در راستای x و y به ترتیب برابر $۰/۶۲۲۶$ پیکسل و $۰/۴۹۰۸$ پیکسل می‌باشد، بنابراین استخراج خطوط روی صفحه کالیبراسیون و سپس بازیابی صفحه تابش لیزر نیز با دقت بسیار خوبی امکان‌پذیر می‌باشد.

۹- پردازش تصویر و بازیابی مدل

ابتدا باید تصاویر گرفته شده از نظر رنگ و لبه بهبوددهی و موارد اضافی مثل نویز زمینه که حاصل شرایط نورپردازی است،

برای استخراج پارامترهای کالیبراسیون، با استفاده از رابطه (۱۵) و (۱۷) ابتدا انتقال خطی از مرجع مختصات جسم به مرجع مختصات تصویر در نظر گرفته می‌شود، رابطه (۱۸).

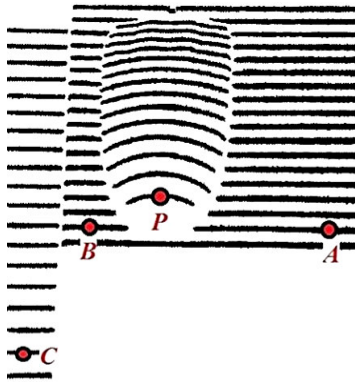
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = KK \times R_c [I_3 \quad -T_c] \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{o i} \\ y_{o i} \\ z_{o i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

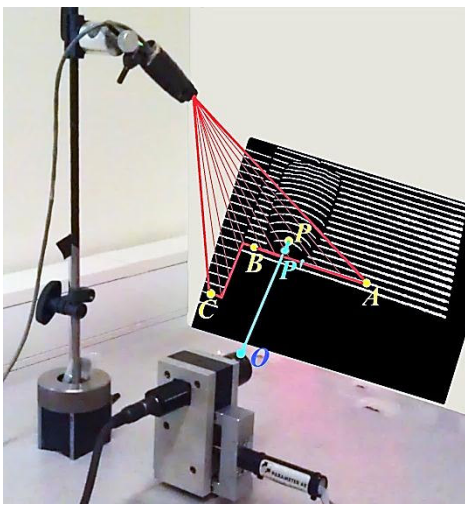
با استفاده از نقاط صفحه کالیبراسیون و تصاویر آن‌ها در رابطه فوق دارایی‌های ماتریس p قابل استخراج می‌باشد. در مرحله بعد با برقراری رابطه میان ماتریس p و ترکیب ماتریس پارامترهای درونی KK و پارامترهای بیرونی $[R_c \quad T_c]$ مقدار پارامترهای کالیبراسیون استخراج خواهد شد. در نهایت پس از استخراج پارامترهای فوق، مختصات نقاط در صفحه تصویر قابل محاسبه می‌باشد. با مقایسه مختصات نقاط محاسبه شده (u_i, v_i) با مقادیر واقعی (U_i, V_i) استخراج شده از تصویر و با استفاده از کمینه کردن حداقل مربعات خطای رابطه (۱۹) محاسبه پارامترهای ماتریس خطای لنز امکان‌پذیر می‌باشد.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (U_i - u_i)^2 + \sum_{i=1}^N (V_i - v_i)^2 \quad (19)$$

بنابراین محاسبه مجموع ۱۱ پارامتر کالیبراسیون با استفاده از حداقل ۶ نقطه (دو معادله برای راستای x و y) امکان‌پذیر می‌باشد؛ ولی برای استخراج این پارامترها با دقت قابل قبول، لازم است از نقاط بیشتری استفاده نمود و مقدار نهایی با بهینه سازی این روابط محاسبه خواهد شد. بنابراین با توجه به صفحه کالیبراسیون انتخاب شده از ۴۸ نقطه موجود در آن استفاده شده است. در نهایت با جابه‌جا کردن صفحه کالیبراسیون در ۳۰ موقعیت مختلف، محدوده فضایی که قرار است در آن اندازه‌گیری



شکل ۲۴ تصویر نهایی پس از اعمال پردازش تصویر



شکل ۲۵ استخراج عمق نقطه P

$$N_x x + N_y y + N_z z - N_x A_x - N_y A_y - N_z A_z = 0$$

$$N = (\overline{BA} \times \overline{CA}) = (N_x, N_y, N_z) \quad (20)$$

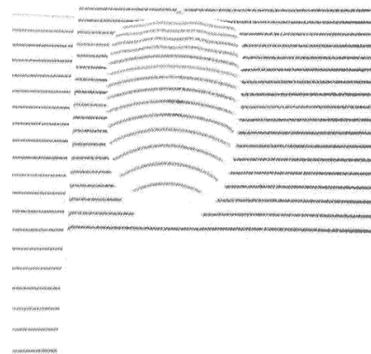
مطابق شکل ۲۵ خط OP عبوری از نقطه واقع بر روی صفحه کالیبراسیون و مرجع تصویربرداری توسط رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود. از برخورد خط OP و صفحه تابش ABC مختصات نقطه متناظر بر روی تصویر P در فضای سه‌بعدی P' استخراج خواهد شد.

$$\frac{x - O_x}{(P_x - O_x)} = \frac{y - O_y}{(P_y - O_y)} = \frac{z - O_z}{(P_z - O_z)} \quad (21)$$

برای جابه‌جایی سنسور به اندازه $0.5\Delta D$ و با توجه به رزولوشن موتور که برابر با 0.06 میکرومتر می‌باشد، نیاز به 70 پالس موتور می‌باشد که همراه با خطای انتقال 0.3 میکرون است. این خطا تنها 0.32 درصد از طول پیکسل می‌باشد که در نتیجه می‌تواند نادیده گرفته شود.

حذف شود. به این منظور از نرم‌افزار پردازش تصویر شرکت NI^۱ استفاده شده است. در شکل ۲۳ عکس اولیه قبل از انجام هر گونه پردازشی نشان داده شده است. پس از انجام تکنیک‌های بهبوددهی تصویر خروجی از این مرحله به صورت باینری تبدیل شده و به عنوان ورودی به بخش محاسبات فرستاده می‌شود. تصاویر در محیط تاریک گرفته شده است تا استخراج خطوط لیزر با دقت بیشتر و نویز کمتر امکان‌پذیر باشد.

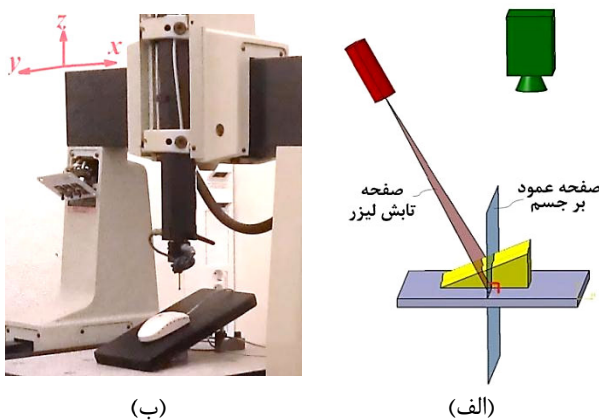
با اعمال فیلتر مناسب هموارسازی و لبه‌یابی، تصویر برای عملیات بعدی بهبود و آماده می‌شود. در نهایت برای ارسال تصویر به بخش محاسبات و استخراج پروفیل جسم باید تصویر باینری و نوار نوری لیزر با توجه به اختلاف در سطح خاکستری آن از بقیه تصویر جدا گردد. شکل ۲۴ تصویر نهایی پس از اتمام مراحل پردازش را نشان می‌دهد. در روش مثلث‌بندی با استفاده از رابطه (۱) مقدار ضخامت یا عمق جسم با استفاده از زاویه تابش لیزر محاسبه می‌شود، که معمولاً زاویه با استفاده از وسایل مکانیکی اندازه‌گیری و در نهایت مقدار عمق با خطا همراه خواهد بود. در این پروژه برای به‌دست آوردن عمق با دقت بالاتر، مقدار ضخامت، از برخورد صفحه تابش با نقاط استخراج شده در تصویر به‌دست می‌آید. در شکل ۲۵ مراحل کار برای نقطه P واقع بر روی خط شماره ۱۴ نشان داده شده است. نقاط A و B بر روی خط حاصل از برخورد صفحه تابش لیزر با صفحه کالیبراسیون اول و نقطه C روی خط ایجاد شده از تداخل با صفحه کالیبراسیون دوم می‌باشد. بنابراین صفحه‌ای که از این سه نقطه می‌گذرد، همان صفحه تابش لیزر است. صفحه‌ای که از سه نقطه A و B و C می‌گذرد، با استفاده از رابطه (۲۰) قابل محاسبه می‌باشد.



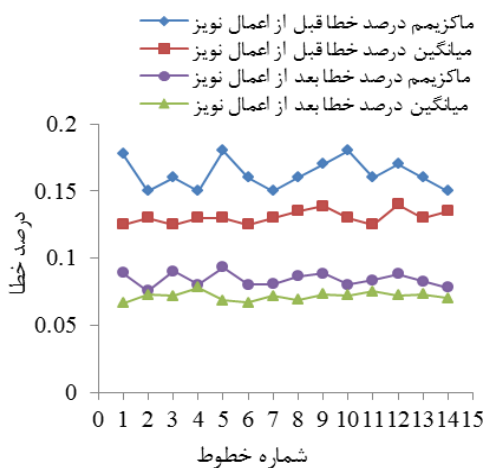
شکل ۲۳ تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر

نسبت به راستای عمود بر جسم قرار می‌گیرند. بنابراین مطابق شکل ۲۷-ب) جسم مورد نظر بر روی یک صفحه مسطح قرار می‌گیرد. موقعیت زاویه‌ای این صفحه باید به گونه‌ای تنظیم گردد تا با صفر کردن درجه آزادی دستگاه اندازه‌گیری در موقعیت‌های مناسب γ و حرکت بازو در راستای x ، پراب دستگاه قادر به حرکت بر روی ۱۴ خط باشد.

در شکل ۲۸ درصد خطای ابعاد استخراج شده از اسکرن لیزری در ۱۴ خط مورد نظر نسبت به ابعاد مستخرج از دستگاه CMM قبل و بعد از اعمال نویز مشاهده می‌شود.



شکل ۲۷ الف) موقیت خطوط تابیده شده بر جسم، ب) استخراج عمق نقطه با استفاده از CMM



شکل ۲۸ تحلیل خطای استخراج ابعاد موس در طول ۱۴ خط

پس از استخراج پروفیل تمام خطوط، و عبور منحنی مناسب از نقاط در نهایت مدل سه‌بعدی از قطعه مورد نظر مطابق شکل ۲۹ با استفاده از دستورات نرم‌افزار مدلسازی اتوکد استخراج شده است.

بعد از استخراج مختصات سه بعدی نقاط روی هر کدام از ۱۴ خط، با توجه به هموار نبودن نقاط، با استفاده از منحنی بی‌اسپلاین یک منحنی مناسب از آن‌ها عبور داده می‌شود و یک پروفیل (مقطع) در فضای سه‌بعدی استخراج می‌شود. بعد از انجام این فرایند برای تمام خطوط و ایجاد پروفیل‌های مربوط به آنها، با استفاده از نرم‌افزار اتوکد شکل سه‌بعدی از جسم استخراج می‌شود. یک منحنی بی‌اسپلاین درجه p به شکل پارامتری مطابق رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

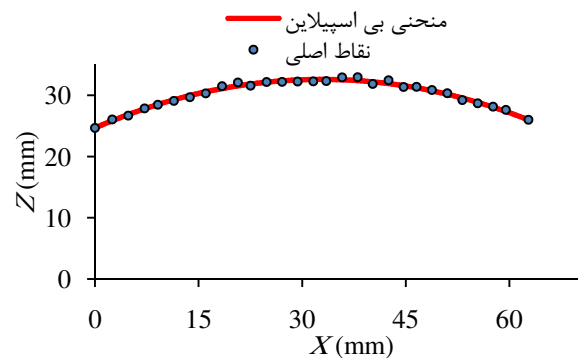
$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، P_i نقاط کنترل و $N_{i,p}(u)$ تابع پایه منحنی بی‌اسپلاین است و به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود.

$$N_{i,0} = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (23)$$

در شکل ۲۶ منحنی بی‌اسپلاین درجه سه گذرنده از نقاط استخراج شده از خط شماره ۵ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منحنی همواری از این نقاط عبور کرده است.



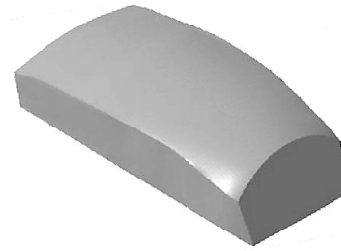
شکل ۲۶ نقاط واقع بر روی خط شماره ۵ و منحنی عبوری از آن

۱۰- نتایج تجربی

جهت استخراج مختصات واقعی جسم از دستگاه اندازه‌گیری مختصات موجود در دانشگاه BTH مدل Tesa 3D Micro-343 ms با دقت 0.001 میلی‌متر استفاده شده است. با توجه به زاویه‌دار بودن صفحات تابش لیزر مطابق شکل ۲۷ الف) هر کدام از خطوط لیزر ایجاد شده روی جسم در یک صفحه مایل

Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009, pp. 168-172.

- [5] Volpel B., Theimer W. M., "Localization Uncertainty in Area-Based Stereo Algorithms", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 25, issue 12, 1995, pp. 1628-1634.
- [6] Junior A., *The Role of Vergence Micromovements on Depth Perception*, Philadelphia, University of Pennsylvania, Technical Report, 1991.
- [7] Chen T., Catrysse P., Gamal A. and Wandell B., "How Small Should Pixel Size Be?", *Proceedings of SPIE Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial and Digital Photography Applications*, Vol. 3965, 2000, pp. 451-459.
- [8] Alasseur C., Constantinides A. and Husson L., "Colour Quantisation Through Dithering Techniques", *IEEE International Conference on Image Processing*, 2003, pp. I-469-72.
- [9] Khalili K., Razavi S. A., Karimzadgan D., "High Resolution Measurements using a Low Resolution System", *Measurement Science Review*, Vol. 5, 2005, pp. 56-59.
- [10] Yu K., Park N., Lee D. and Solgaard O., "Superresolution Digital Image Enhancement by Subpixel Image Translation with a Scanning Micromirror", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 13, Issue. 2, 2007, pp. 304-311.
- [11] Ritz M., Scholz M., Goesele M., Stork A., "High Resolution Acquisition of Detailed Surfaces with Lens-Shifted Structured Light", *The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST, Paris 2010*, pp. 1-8.
- [12] Chen J., Khatibi S., Kulesza W., "Depth Reconstruction Uncertainty Analysis and Improvement – The Dithering Approach", *Elsevier Image and Vision Computing*, Vol. 28, Issue. 9, 2010, pp. 1377-1385.
- [13] Carbone P., Petri D., "Effect of Additive Dither on the Resolution of Ideal Quantizers", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 43, 1994, pp. 389-396.
- [14] Metro Vision Lab Toolbox for Camera Calibration and Simulation, <http://metrovisionlab.unizar.es/>
- [15] Camera Calibration Toolbox, www.mathworks.com



شکل ۲۹ مدل سه‌بعدی بازیابی شده از قطعه کار

۱۱- نتیجه‌گیری

مشاهده می‌شود که با الگوریتم اعمال نویز و صرف زمان بسیار کوتاه، با گرفتن فقط دو تصویر از جسم، علاوه بر افزایش دقت، عملیات کالیبراسیون لیزر همزمان با استخراج مدل سه‌بعدی جسم نیز امکان‌پذیر می‌باشد. با توجه به این موضوع که در این پروژه کالیبراسیون لیزر همزمان با بازیابی مدل انجام گرفته است، بنابراین الگوریتم اعمال نویز بر روی فرایند کالیبراسیون لیزر نیز اعمال شده و باعث بهبود دقت در استخراج زاویه تابش لیزر می‌شود.

۱۲- مراجع

- [1] Khalili K., Emam S. M., "3D Model Reconstruction of Web Production with Image Processing Technique", *Sharif journal*, 2011 Reference No. 40\354\8988.
- [2] Zolfaghari H., Khalili K., "On-Line 3D Geometric Model Reconstruction", *International Conference of Computational Science ICCS*, Kraków, Poland, 2008, pp. 146-152.
- [3] Khalili K., Nazemsadat S. M., "Improved Accuracy of On-Line Tire Profile Measurement Using a Novel On-Line Calibration", *The Seventh IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, Palma de Mallorca, Spain, 2007, pp. 59-63.
- [4] Hu Z., Guan Q., Liu S. and Chen S. Y., "Robust 3D Shape Reconstruction from a Single Image Based on Color Structured Light", *International*