



تکنیک اعمال نویز نرم افزاری جهت بهبود دقت اسکنر لیزری

سید محمد امام^۱، خلیل خلیلی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

چکیده- یکی از رایج ترین شیوه های مدل سازی سه بعدی، استفاده از اسکنر لیزری با تکنیک مثلث بندی می باشد. پارامترهای مؤثر بر دقت این اسکنرها به طور کلی به دو دسته سخت افزار و نرم افزار تقسیم بندی می شوند. یکی از عمده ترین محدودیت های سخت افزاری، اندازه و تعداد پیکسل های موجود در دوربین بوده که خطای متریک و کوانتیزه کردن (نمونه برداری) را افزایش می دهد و در نتیجه باعث خطای زیاد اندازه گیری در هنگام استخراج ابعاد مدل خواهد شد. با توجه به این محدودیت، یکی از روش های مؤثر در بهبود دقت اسکنر، استفاده از تکنیک اعمال نویز و تکرار عملیات اسکن می باشد. در این مقاله، اعمال نویز از طریق ایجاد جابجایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین در حین عملیات اسکن، پیاده سازی شده است. اگر چه استفاده از تکنیک فوق باعث افزایش دقت می شود ولی از طرف دیگر لزوم تغییر در تنظیمات سخت افزاری و تکرار عملیات اسکن، باعث افزایش زمان مدل سازی خواهد شد. در این مقاله با ارائه ایده بدیع اعمال نویز نرم افزاری، تأثیر روش ایجاد جابجایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین بررسی و مطالعه شده است. در مقاله حاضر ضمن بیان اصول روش ارائه شده، الگوریتم اعمال نویز با استفاده از رگرسیون خطی شبیه سازی شده تا ضمن بهبود دقت، زمان مدل سازی نیز کاهش یابد. نتایج به دست آمده بیانگر بهبود قابل توجه در دقت اندازه گیری می باشد. تکنیک ارائه شده به صورت تجربی پیاده سازی و مطالعه تجربی، صحت تکنیک و نتایج را تأیید می نماید. نتایج شبیه سازی و تجربی گزارش شده اند.

کلیدواژگان: اسکن لیزری، تکنیک مثلث بندی، رگرسیون خطی، اعمال نویز، تحلیل خطا.

Improving the accuracy of laser scanning using a soft technique

S. M. Emam¹, K. Khalili^{2*}

1- PhD. Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

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

Abstract- Triangulation technique is one of the most commonly techniques used in three dimensional measurements. Hardware and software used in 3D scanning systems are main error sources affected the accuracy of scanners. Depth reconstruction accuracy is a direct impact of the quantization process, and so it is related to the pixel size of the sensor. Dithering technique may be used to reduce the errors during quantization. The current study introduces a technique in which a relative fine movement between object and sensor is generated during picture capture. Although, using this technique will improve the accuracy of scanning but changing the hardware set up during the process is also time consuming. So to deal with this problem the dithering technique is simulated using the linear regression to reduce the scanning time. The paper firstly describes the theory of the noise introduction technique followed by modeling and simulation of the process by regression function. 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 experiment was performed. The results showed considerable improvement in measurement accuracy. The result of both simulation and experiments are reported.

Keywords: Laser Scanning, Triangulation Technique, Linear Regression, Dithering Technique, Error Analysis.

۱- مقدمه

روش‌های بسیاری برای استخراج مدل سه‌بعدی اجسام در دهه‌های اخیر توسعه یافته‌اند. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی کرد. در روش غیرفعال، سیستم اندازه‌گیری با قطعه در ارتباط مستقیم نیست؛ ابتدا تصاویر دیجیتالی مختلف از جسم گرفته می‌شود و پس از عملیات کالیبراسیون و تطابق بین تصاویر، مختصات و ابعاد جسم استخراج می‌شود. در روش فعال، اسکنر باشیء تماس دارد یا این که بر روی سطح شیء نوری با الگوی مناسب، تصویر می‌کند. با توجه به سنسورهای موجود، اسکنرهای فعال به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از اندازه‌گیری فعال با استفاده از سنسورهای تماسی و سنسورهای غیرتماسی. تکنولوژی اپتیکی به دلیل انعطاف‌پذیری و سرعت بیشتر در دیجیتایز کردن سطوح، ضمن آن که از دقت و قدرت تفکیک-پذیری قابل قبولی برخوردارند، نسبت به سایر اسکنرها ترجیح داده می‌شوند [۱-۳].

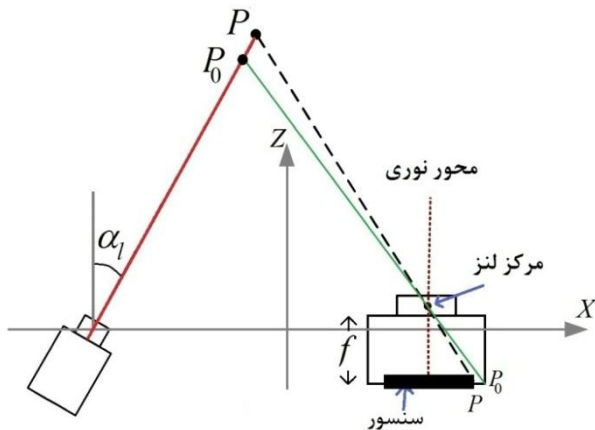
با پیشرفت تکنولوژی‌های اپتیکی و بینایی در صنعت، دیجیتایز کردن دقیق قطعه، استخراج پروفایل سه‌بعدی آن و تهیه مدل CAD برای تولید دوباره و مهندسی معکوس امکان‌پذیر شده است. در ایستگاه‌های بازرسی و کنترل کیفیت جهت مقایسه محصول مورد بازرسی با محصول طراحی شده نیز از سیستم‌های بینایی استفاده می‌شود که علاوه بر مقایسه محصول با طرح، محل بروز خطا را مشخص می‌کنند.

روش‌های اپتیکی با محدودیت‌هایی نیز مواجه هستند که به طور کلی به دو دسته خطاهای ناشی از محدودیت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تقسیم‌بندی می‌شوند. همچنین عوامل محیطی مانند فضایی که قرار است عملیات اسکن در آن انجام شود نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت اسکنر دارد. به عنوان مثال اگر در محیطی رطوبت یا گرد و غبار زیاد وجود داشته باشد، مشکلات نورپردازی ایجاد خواهد شد و این عامل باعث بروز خطا در بازیابی مدل می‌شود. یکی از تکنیک‌های موجود برای بهبود دقت، استفاده از الگوهای نوری رنگی برای بازسازی مدل اجسام می‌باشد [۴]. در این روش از مجموعه نوارهای نوری رنگی استفاده می‌شود که این الگو دارای طبقه‌بندی و ترتیب رنگ مشخصی می‌باشد. بنابراین الگوی مذکور، در مقابل نور کنترل نشده محیط و تداخل رنگ‌ها کارایی مناسبی دارد.

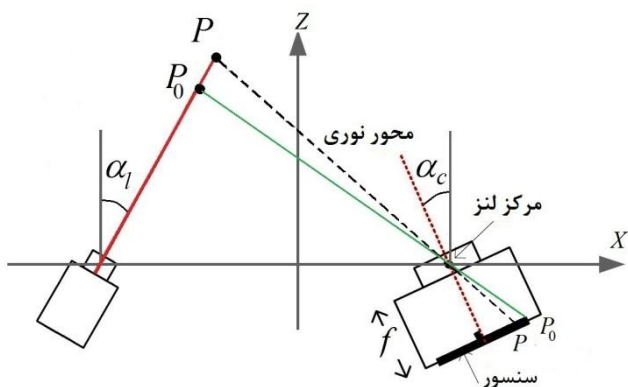
با توجه به منابع خطای سخت‌افزاری، موارد متعددی مثل دقت لنز، قدرت تفکیک‌پذیری دوربین، فرایند تبدیل تصویر آنالوگ به دیجیتال و حافظه مورد استفاده، در تعیین دقت یک سیستم بینایی دخیل می‌باشند [۵]. برای حل مشکلات سخت-افزاری، اسکنرهایی با ساختار جدید پیشنهاد شده‌اند [۶]. یکی از پارامترهای مؤثر بر دقت اسکنر، نوع دوربین (سنسور) بکار برده شده می‌باشد. خطای حاصل از کوانتیزه کردن (نمونه‌برداری) تصویر اجسام، در سنسور دوربین 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، اعمال نویز یکی از تکنیک‌های ارائه شده جهت رفع مشکل فوق می‌باشد. اعمال نویز از طریق جابجایی دوربین و یا جسم در حین فرایند تصویر برداری امکان‌پذیر است [۷، ۸]. با توجه به این که در اسکنرهای مثلث‌بندی، از نور ساختاریافته مثل لیزر استفاده می‌شود؛ لذا می‌توان بجای جابجا کردن جسم یا دوربین، از تغییر موقعیت زاویه‌ای الگوی تابش نور لیزر بهره گرفت. استفاده از یک لنز در جلوی منبع تابش نور، با قابلیت جابجایی دقیق و قابل کنترل در حد میکرومتر، یکی از سیستم‌های پیشنهادی جهت جابجایی الگوی نوری و افزایش دقت می‌باشد [۹]. همچنین با بکارگیری یک آینه چندضلعی که با سرعت زاویه‌ای مشخص دوران می‌کند، تغییر زاویه پرتو تابش در حد اعشار پیکسل امکان‌پذیر می‌باشد [۱۰].

اگر چه استفاده از روش‌های فوق باعث افزایش دقت می‌شود ولی از طرف دیگر لزوم تغییر در تنظیمات سخت‌افزاری و تکرار عملیات اسکن باعث افزایش زمان مدل‌سازی خواهد شد. لذا در این مقاله ایده بدیع اعمال نویز نرم‌افزاری نیز بررسی و مطالعه شده است. نتایج به‌دست آمده از محاسبات تئوری و شبیه‌سازی، بیانگر بهبود قابل‌توجه در دقت اندازه‌گیری می‌باشد. همچنین روش اعمال نویز به‌صورت تجربی پیاده‌سازی شده و مطالعه تجربی صحت تکنیک و نتایج تئوری و شبیه‌سازی را تایید می‌نماید. سپس در مرحله بعد با استفاده از رگرسیون خطی، اعمال نویز نرم‌افزاری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است تا ضمن بهبود دقت، زمان مدل‌سازی نیز کاهش یابد.

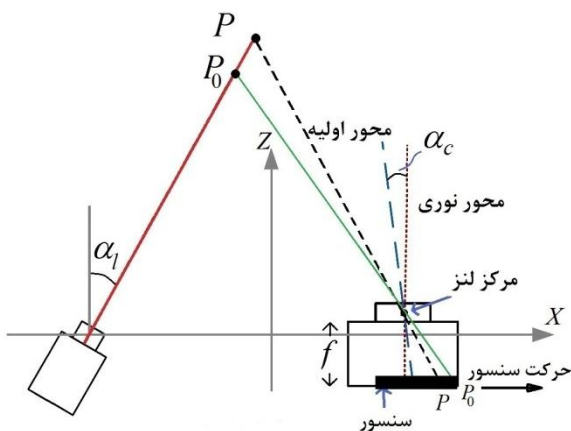
با اعمال یک تغییر مکان مناسب به سنسور، میدان دید مناسبی به دست آورد که این امر موجب ساده سازی روابط برای محاسبه عمق خواهد شد. در بخش بعد روابط توضیح داده شده است.



شکل ۲ اسکنر مثلث بندی ليزری و نقطه خارج از میدان دید (P_0)



الف- چرخش دوربین و ليزر



ب- حرکت نسبی سنسور و لنز دوربین

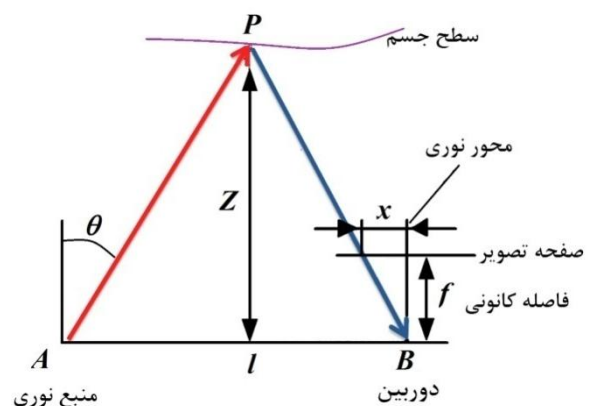
شکل ۳ حل مشکل بازایی نقاط خارج از میدان دید دوربین

۲- اسکنر ليزری به روش مثلث بندی

در اسکنر مثلث بندی از نور کنترل شده یا اصطلاحاً نور ساختار یافته استفاده می شود. در شکل ۱ تصویر شماتیک این اسکنر نشان داده شده است. تغییر شکل پرتو نور بستگی به هندسه سطح جسم در زیر نور ليزر دارد. این پرتو نوری در طول جسم حرکت و مختصات سه بعدی جسم استخراج می شود. با توجه به شکل فوق، مقدار ارتفاع در نقطه P با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه می باشد.

$$Z = \frac{fl}{(x + f \tan \theta)} \quad (1)$$

در رابطه فوق f فاصله کانونی و θ زاویه تابش ليزر نسبت به راستای قائم می باشد. x اندازه تصویر جسم در سنسور دوربین می باشد. فاصله بین دوربین و ليزر با l نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ اگر نقطه ای مثل P_0 خارج از میدان دید دوربین باشد و تصویری در سنسور دوربین نداشته باشد، استخراج عمق آن امکان پذیر نخواهد بود [۱۱]. برای حل مشکل فوق، با توجه به شکل ۳- الف دوربین و ليزر باید با یک زاویه همگرایی مشخص چرخش نمایند تا قادر به اندازه گیری نقاط خارج از میدان دید باشند. در این شکل، محور نوری خطی است که از مرکز لنز می گذرد و بر صفحه سنسور عمود است و محور اولیه به خطی گفته می شود که مرکز لنز و مرکز صفحه سنسور را به هم متصل می کند. زاویه بین محور نوری با محور Z و معروف به زاویه همگرایی می باشد. زاویه تابش ليزر نسبت به محور Z با α_l نشان داده شده است.



شکل ۱ ساختار اسکنر مثلث بندی ليزری فعال

با توجه به شکل ۳- ب بجای چرخش دوربین و ليزر می توان

۳- مدل ریاضی استخراج عمق در اسکنر لیزری

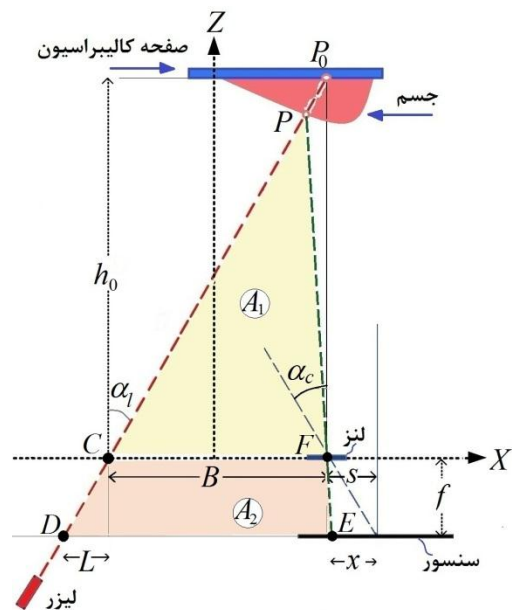
مجهز به دوربینی با قابلیت حرکت سنسور

شکل ۴ اسکنر مثلث بندی 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. مقدار شیف مرکز لنز نسبت به مرکز سنسور در راستای افق و قابل تغییر می باشد. در روابط، اگر جابجایی سنسور به سمت راست باشد، S مثبت در نظر گرفته شده است.

X مختصات تصویر نقطه P در صفحه تصویر و در امتداد محور X می باشد. بنابراین مقدار عمق نقطه P با استفاده از رابطه بین مساحت اشکال $A_1(PCF)$ و $A_2(CDEF)$ و مطابق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$\begin{aligned} \text{مساحت مثلث} &= (A_1 + A_2) = \text{مساحت دوزنقه} \\ A_2 &= \frac{fB}{n\Delta D + S + L} \\ \Rightarrow Z(n) &= \frac{fB}{n\Delta D + S + L} \\ L &= f \tan(\alpha_l) \\ B &= h_0 \tan(\alpha_l) \\ n &= \left[\frac{x}{\Delta D} \right] = x_Q \end{aligned} \quad (2)$$

ΔD اندازه پیکسل دوربین CCD و نقش تعیین کننده ای در دقت اسکنر مثلث بندی خواهد داشت. فاصله بین لیزر و لنز دوربین در راستای محور X با B نشان داده شده است. n تصویر رقمی شده نقطه P در صفحه تصویر بر حسب پیکسل می باشد.



شکل ۴ اسکنر مثلث بندی در صفحه X-Z و مختصات نقاط در تصویر

با توجه به خطای کوانتیزه کردن، مختصات نقطه در صفحه تصویر بر اساس مرکز پیکسلی که در آن واقع شده است تخمین زده می شود که برابر با x_Q (بر حسب پیکسل) خواهد بود. بنابراین n یک عدد صحیح است و علامت [.] نشان دهنده گرد کردن عدد به نزدیکترین عدد صحیح داخل آن می باشد. طبق رابطه (۲) مقدار عمق رابطه معکوس با n دارد. فاصله بین دو ارتفاع گسسته متوالی Z_n و Z_{n+1} نشان دهنده خطای کوانتیزه کردن در فرایند بازجایی عمق و تابعی غیر خطی از n می باشد. استفاده از اسکنر مثلث بندی پیشنهادی دارای این مزیت است که با ایجاد حرکت نسبی بین سنسور و لنز دوربین، تغییر x_Q و در نتیجه تغییر مقدار n امکان پذیر می باشد. این امر خود موجب جابجایی عمق های گسسته Z_n خواهد شد. به عنوان مثال در ادامه مقدار جابجایی نسبی برای اینکه Z_n های جدید، بین هر دو عمق قبل از جابجایی Z_n و Z_{n+1} قرار گیرد، محاسبه شده است. ابتدا با بکارگیری رابطه (۲) فاصله بین دو عمق متوالی n_t و n_{t+1} طبق رابطه (۳) استخراج می شود.

$$\begin{aligned} \Delta Z_t &= |Z_{t+1} - Z_t| \\ &= \frac{h_0 \tan(\alpha_l) f \Delta D}{[n_t \Delta D + S + L][n_{t+1} \Delta D + S + L]} \end{aligned} \quad (3)$$

اگر تمام عمق ها به اندازه $\Delta Z_t/2$ نسبت به موقعیت خود جابجا شوند سپس عمق های جدیدی خواهیم داشت که بین هر دو مقدار متوالی قبلی ایجاد شده است. بنابراین مقدار ارتفاع جدید مطابق رابطه (۴) محاسبه می شود.

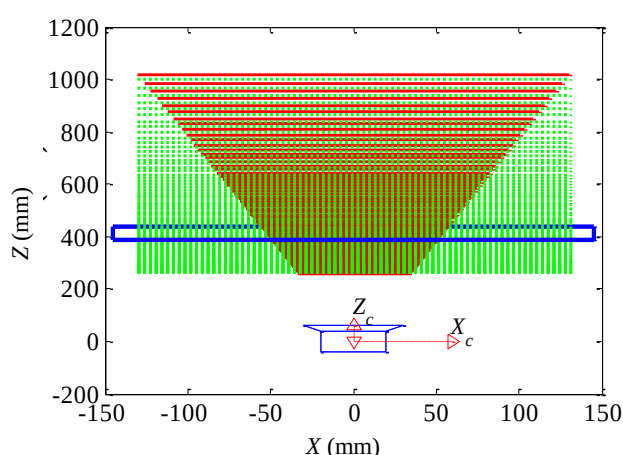
$$Z_t + \frac{\Delta Z_t}{2} = \frac{f h_0 \tan(\alpha_l)}{n_t \Delta D + S + L + \frac{(n_t \Delta D + S + L) \Delta D}{2(n_{t+1} \Delta D + S + L) + \Delta D}} \quad (4)$$

با مقایسه سمت راست دو رابطه (۲) و (۴) مقدار سیگنال نویز، ΔS_t ، مطابق رابطه (۵) محاسبه می شود. ΔS_t نشان دهنده جابجایی سنسور جهت تغییر مکان عمق های جدید به وسط دو مقدار متوالی قبلی می باشد.

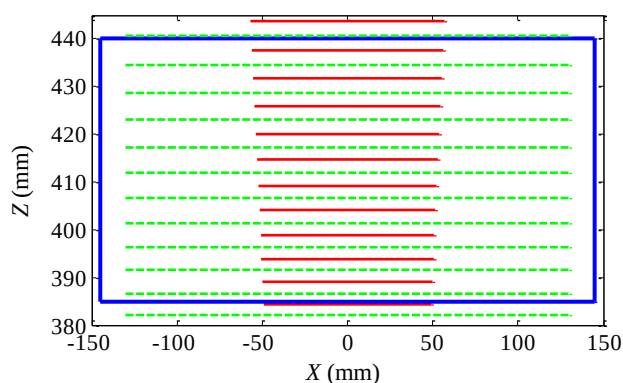
$$\Delta S_t = \frac{(n_t \Delta D + S + L) \Delta D}{2(n_{t+1} \Delta D + S + L) + \Delta D} \quad (5)$$

برای بررسی صحت محاسبات فوق، به عنوان نمونه از مشخصات دوربین سونی مدل XC-555p استفاده شده است. اندازه پیکسل این دوربین 0.0833×0.0833 میلی متر مربع و اندازه سنسور آن $5.76(V) \times 7.68(H)$ می باشد. فاصله جسم از دوربین برابر ۱۵۰۰ میلی متر و زاویه تابش لیزر ۵۵ درجه

با استفاده از فرمول (۵) برای انتقال Z_n های مربوط به سیستم بکار گرفته شده برای شکل ۵ به میانه عمق های قبلی، باید جابجایی نسبی به اندازه $\Delta S_t = 0.0042$ میلی متر بین سنسور و لنز دوربین اعمال شود. در شکل ۶ مقدار جابجایی عمق های استخراج شده جدید نشان داده شده است. مشاهده می شود که با اعمال این جابجایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین، Z_n های جدید بین دو ارتفاع قبلی قرار گرفته اند. در شکل ۶- ب نیز مقدار عمق در فاصله $Z=380$ میلی متر تا $Z=445$ میلی متر بزرگنمایی شده است.



الف- عمق نقاط با استفاده از نرم افزار متلب (خطوط ممتد) و رابطه ۲ (خطوط نقطه چین)



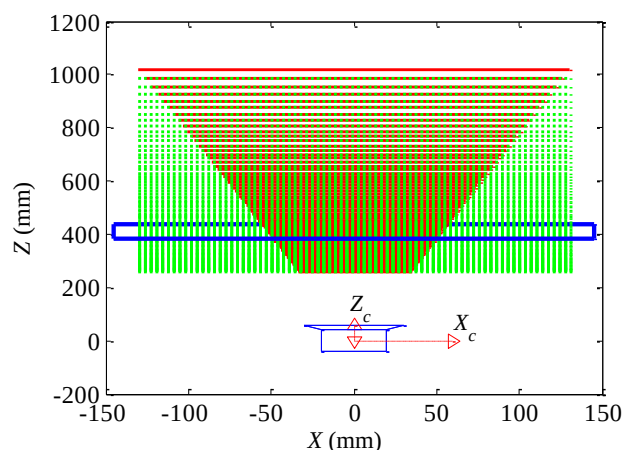
ب- بزرگنمایی عمق در فاصله $Z=380\text{mm}$ تا $Z=445\text{mm}$

شکل ۶ اثر جابجایی سنسور بر عمق ها نقاط

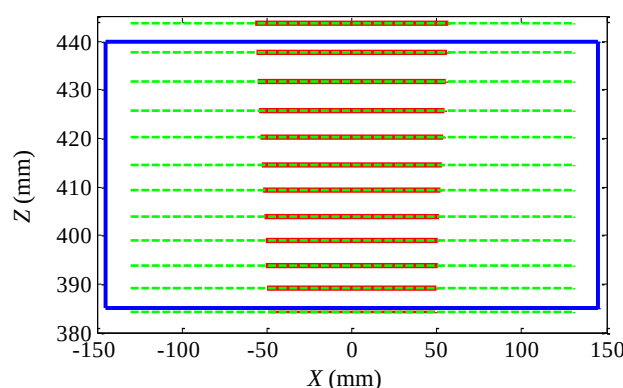
بنابراین برای داشتن Z_n ها در موقعیت اولیه مطابق شکل ۵ همزمان با Z_n های جدید در وسط آنها (که به معنی افزایش دقت به میزان دو برابر است) مطابق شکل ۶ لازم است که از

نسبت به افق در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ مقدار عمق برای سیستم فوق در فاصله $Z=260/4589$ میلی متر ($n_t=1000$) تا $Z=1016$ میلی متر ($n_t=10000$) نشان داده شده است. در این شکل خطوط ممتد در واقع عمق نقاط (Z_n ها) در نمای دوبعد (صفحه $X-Z$) با استفاده از نرم افزار مطلب می باشند، [۱۲] و خطوط نقطه چین مقادیر به دست آمده از رابطه (۲) و بیان کننده عمق های مذکور برای $n_t=1000, 2000, \dots, 10000$ می باشد.

همان طور که در شکل ۵- الف مشاهده می شود خطوط فوق دارای موقعیت مکانی یکسانی می باشند. برای وضوح بیشتر، در شکل ۵- ب مقدار عمق در فاصله $Z=380$ میلی متر تا $Z=445$ میلی متر بزرگنمایی شده است.



الف- عمق نقاط با استفاده از نرم افزار متلب (خطوط ممتد) و رابطه ۲ (خطوط نقطه چین)



ب- بزرگنمایی عمق در فاصله $Z=380\text{mm}$ تا $Z=445\text{mm}$

شکل ۵ استخراج عمق نقاط نسبت به دوربین

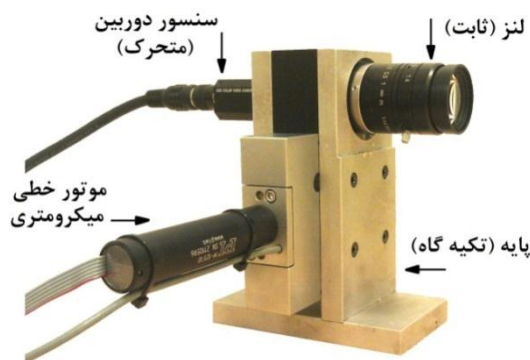


شکل ۸ قطعه کار، سطح شیبدار و مقاطع مورد استفاده جهت شبیه سازی فرایند اعمال نويز

۴-۱- دوربين

برای اعمال نويز، سنسور دوربين مورد استفاده می بایست نسبت به لنز حرکت افقی داشته باشد. بنابراین با جداسازی اجزای دوربين (سنسور و لنز) که معمولاً به بدنه متصل هستند، دوربين موردنظر ساخته می شود. برای کنترل حرکت سنسور، نیاز است که بدنه دوربين به یک وسیله متحرک مکانیکی با قابلیت کنترل جابجایی در حد میکرومتر متصل شود که در اینجا از یک موتور DC، استفاده شده است. همچنین نیاز است که از یک تکیه گاه برای نزدیک نگاه داشتن لنز نسبت به دوربين استفاده شود که این تکیه گاه نیز می بایست به ابزار متحرک مکانیکی متصل باشد. شکل ۹ اجزای اصلی نمونه اولیه دوربين مورد نظر را نشان می دهد.

مشابه آزمایش انجام گرفته در قسمت تئوری، از دوربين سونی مدل XC-555p با آرایه سنسور CCD استفاده شده است که یک دوربين ویدیویی رنگی با سنسور ۱/۲ اینچ و اندازه $22(H) \times 22(W) \times 75(D)$ میلی متر می باشد.



شکل ۹ اجزای دوربين جهت اعمال نويز

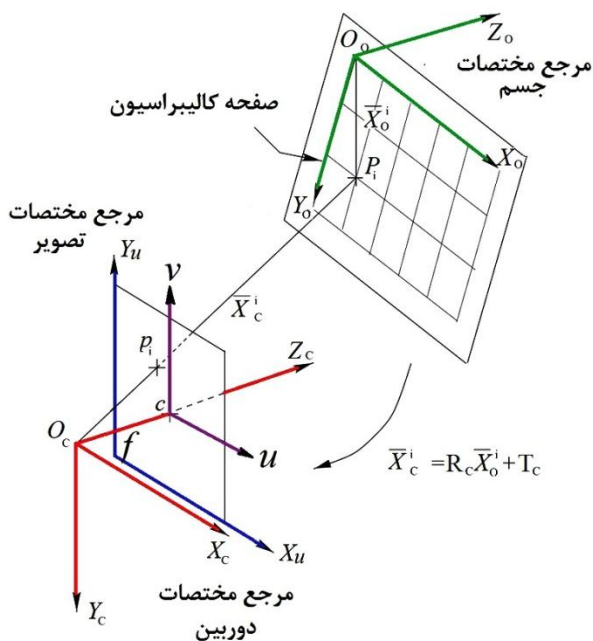
جسم مورد نظر دو تصویر با موقعیت نسبی لنز و سنسور به اندازه $\Delta S_t = 0.042$ میلی متر گرفته و میانگین عمق به دست آمده از دو تصویر استخراج شود.

۴- آزمایش تجربی و ساختار اسکنر مثلث بندی

در شکل ۷ اجزای سخت افزاری جهت بررسی صحت نتایج تئوری نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود از دو صفحه کالیبراسیون استفاده شده است. یک صفحه در زیر جسم قرار دارد که سطح مبنا جهت بکارگیری روش مثلث بندی می باشد. از این صفحه به همراه یک صفحه دیگر برای استخراج زاویه تابش لیزر استفاده خواهد شد که در ادامه روش محاسبه زاویه لیزر ارائه می شود. همان طور که در این شکل مشاهده می شود از دو قطعه استفاده شده است، قطعه اول یک سطح شیبدار می باشد که به منظور کالیبره کردن اسکنر جهت اعمال نويز (شبیه سازی فرایند اعمال نويز) مورد استفاده قرار خواهد گرفت. از قطعه دوم که یک جسم دلخواه با سطح غیرمسطح می باشد برای تحلیل و بررسی دقت نتایج شبیه سازی انجام گرفته توسط سطح شیبدار، بکار گرفته می شود. از برخورد صفحات تابش لیزر با قطعه کار و سطح شیبدار، خطوطی ایجاد می شود که هدف از اسکنر لیزری استخراج این خطوط و در نهایت بازیابی مدل سه بعدی جسم از آنها می باشد. در این مدل سازی از لیزری با الگوی خطی شامل ۱۹ خط موازی استفاده شده است. در شکل ۸ سطح شیبدار و قطعه کار و مقاطع ایجاد شده از پرتوهای تابش لیزر با آنها نشان داده شده است. در ادامه برخی از اجزای اصلی سیستم سخت افزاری مورد بررسی قرار گرفته شده است.



شکل ۷ اجزای سخت افزاری اسکنر ليزري



شکل ۱۰ تبدیلات پرسپکتیو در فرایند کالیبراسیون

با استفاده از ماتریس دوران R_c و ماتریس انتقال T_c ، نقاط واقع در صفحه شطرنجی از مرجع مختصات واقع در صفحه به مرجع مختصات دوربین انتقال می‌یابد، رابطه (۶).

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R_c \times \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{bmatrix} + T_c \Rightarrow x_n = \begin{bmatrix} x_c \\ z_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

x_n مختصات نرمال نقاط در مرجع دوربین می‌باشد. یکی از مهم‌ترین منابع خطا در حین فرایند کالیبراسیون، اعوجاج لنز است. که باعث بروز خطای شعاعی و مماسی در حین انتقال نقاط از مرجع مختصات صفحه کالیبراسیون به صفحه تصویر می‌شود. در خطای شعاعی با توجه به کاهش دقت ساخت لبه‌های لنز نسبت به مرکز آن، نقاط تصویر در راستای شعاع لنز جابجا خواهند شد (کشیدگی تصویر). از سوی دیگر به دلیل قرار نگرفتن محور اپتیکی دوطرف لنز در یک راستا، خطای مماسی در حین ثبت نقاط تصویر بروز خواهد داد. در این مقاله از روش ترکیبی هیکیلا و فاگراسبرای کالیبراسیون استفاده شده است که ماتریس مربوط به خطای لنز، K_c ، شامل ۵ درایه جهت تصحیح خطای شعاعی و مماسی می‌باشد [۱۵]. بنابراین با استفاده از رابطه (۷) مقدار مختصات نرمال تصحیح شده نقاط، x_d ، قابل محاسبه می‌باشد.

عکس‌های گرفته شده توسط دوربین مذکور دارای تفکیک-پذیری $۷۶۶(V) \times ۷۶۸(H)$ می‌باشد. موتور متحرک خطی مدل PI M-125.10 دارای حداکثر جابجایی ۲۵ میلی‌متر با دقت $۰/۰۶$ میکرومتر می‌باشد. در نمونه اولیه دوربین از لنز تامرون مدل 23FM25SP استفاده شده است. این لنز از مدل C-mount با فاصله کانونی ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

۴-۲- لیزر

برای استفاده از روش مثلث‌بندی نیاز به تولید خط لیزر با طول مناسب و یکنواختی در امتداد خط نوری آن می‌باشد. خطوط ایجاد شده توسط نور لیزر به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ پرتوهای لیزر با شدت روشنایی غیرگوسی (یکنواخت) و پرتوهای لیزر با شدت روشنایی گوسی (غیر یکنواخت). از آنجا که شدت روشنایی خطوط گوسی غیریکنواخت است، استخراج داده‌ها از پرتو انعکاسی دارای خطای بیشتری است. بنابراین برای استخراج داده‌ها با دقت بالاتر، در این پروژه از یک لیزر دیود با الگوی تابش خطوط موازی با شدت روشنایی غیرگوسی استفاده شده است. لیزر دیود مورد استفاده از مدل LASNF انتخاب شده است و 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.

۵- کالیبراسیون

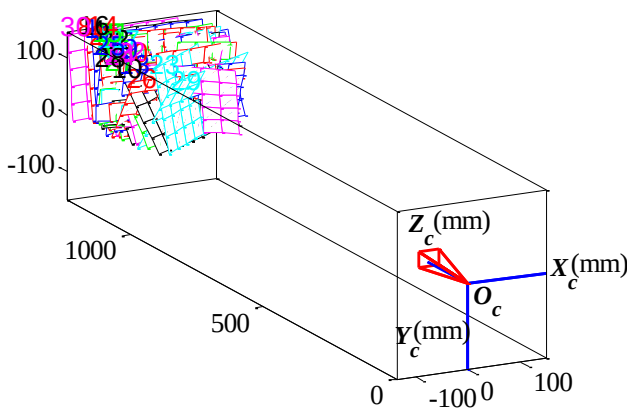
اولین مرحله برای استفاده از روش مثلث‌بندی و بازیابی مدل اجسام، فرایند کالیبراسیون می‌باشد. عملیات کالیبراسیون شامل تشخیص و تعیین موقعیت مکانی دوربین و همچنین لیزر و برقراری ارتباط بین مختصات آنها می‌باشد که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است [۱۴، ۱۳].

۵-۱- کالیبراسیون دوربین

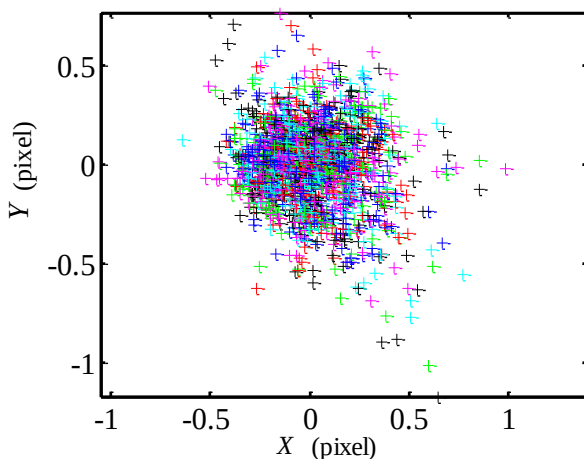
یکی از متداول‌ترین روش‌های کالیبراسیون دوربین، استفاده از صفحه شطرنجی مطابق شکل ۱۰ و برقراری ارتباط بین نقاط واقع در آن و نقاط متناظرشان در تصویر می‌باشد.

ولی برای استخراج این پارامترها با دقت قابل قبول، لازم است از نقاط بیشتری استفاده نمود و مقدار نهایی با بهینه‌سازی این روابط محاسبه خواهد شد. با توجه به صفحه کالیبراسیون انتخاب شده در شکل ۷، از ۴۸ نقطه موجود در آن استفاده شده است. در نهایت با جابجا کردن صفحه کالیبراسیون در ۳۰ موقعیت مختلف، محدوده فضایی که قرار است در آن اندازه‌گیری انجام شود، کالیبره خواهد شد. در شکل ۱۲ تصویر دوربین و صفحه کالیبراسیون در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است.

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 (۸) بر حسب پیکسل در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مقدار میانگین خطا در راستای X و Y به ترتیب برابر ۰/۱۵۷۵ پیکسل و ۰/۱۴۹۳ پیکسل می‌باشد.



شکل ۱۲ موقعیت دوربین و صفحه کالیبراسیون



شکل ۱۳ خطای کالیبراسیون برای نقاط صفحات کالیبراسیون

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

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

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (7)$$

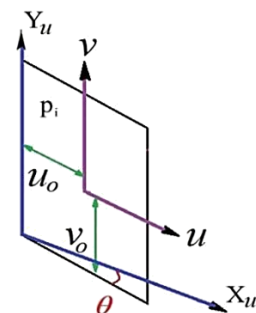
در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای درونی، مختصات نقاط طبق رابطه (۸) از مرجع دوربین به مرجع مختصات تصویر (u, v) انتقال می‌یابد.

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

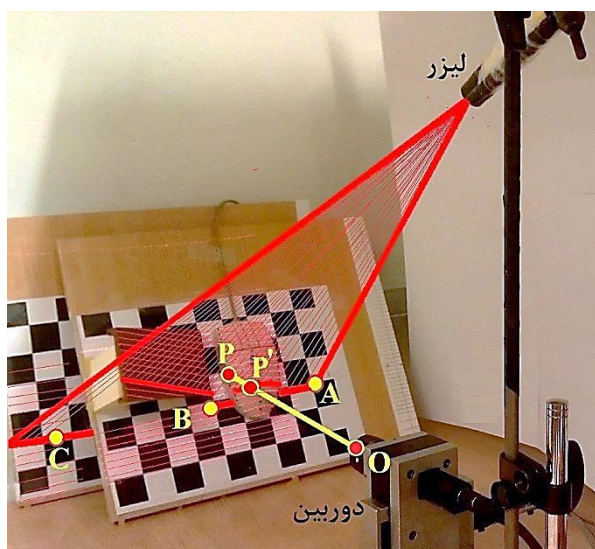
$$KK = \begin{bmatrix} fc(1) & \theta \times fc(1) & u_o \\ 0 & fc(2) & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

در رابطه (۸) $fc(1)$ و $fc(2)$ مقدار فاصله کانونی در راستای افقی و عمودی است. فاصله کانونی برای سنسورهای که پیکسل‌های آنها مربعی شکل نباشند دارای مقدار جزئی اختلاف در دو راستا می‌باشند. در این رابطه u_o و v_o مرکز مختصات صفحه تصویر با توجه به موقعیت نسبی لنز و سنسور دوربین می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، محورهای مختصات صفحه سنسور به دلیل خطای ساخت آن همیشه متعامد نیست و به اندازه θ نسبت به حالت قائمه اختلاف دارند.

با جایگذاری مختصات نقاط صفحه کالیبراسیون و مختصات نقاط متناظر با آنها در صفحه تصویر، در رابطه (۸)، استخراج پارامترهای کالیبراسیون امکان‌پذیر می‌باشد. بنابراین محاسبه مجموع ۱۱ پارامتر کالیبراسیون شامل پارامترهای مربوط به ماتریس انتقال Tc و ماتریس دوران Rc که جزء پارامترهای بیرونی و ۵ پارامتر مربوط به $fc(1)$ ، $fc(2)$ ، u_o ، v_o و زاویه θ که از پارامترهای درونی کالیبراسیون هستند، با استفاده از حداقل ۶ نقطه (دو معادله برای راستای X و Y) امکان‌پذیر می‌باشد؛



شکل ۱۱ تبدیلات پرسپکتیو در صفحه تصویر



شکل ۱۵ استخراج عمق نقطه P

بردار نرمال $\vec{N}$ این صفحه با استفاده از ضرب خارجی بردار BA و CA محاسبه می‌شود.

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

$$N = (\vec{BA} \times \vec{CA}) = (N_x, N_y, N_z) \quad (9)$$

خط OP از نقطه واقع بر روی صفحه کالیبراسیون (تصویر نقاط مورد نظر جهت اندازه‌گیری بر روی صفحه کالیبراسیون) و نقطه مرجع تصویربرداری که در زمان کالیبراسیون به دست آمده، عبور می‌کند. با استفاده از رابطه (۱۰) معادله پارامتری خط OP محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} x &= O_x + t(P_x - O_x) \\ y &= O_y + t(P_y - O_y) \\ z &= O_z + t(P_z - O_z) \end{aligned} \quad (10)$$

از برخورد خط OP و صفحه تابش ABC مختصات نقطه متناظر بر روی تصویر P در فضای سه بعدی P' استخراج خواهد شد. بنابراین با جایگذاری رابطه (۱۰) در رابطه (۹) مقدار t با استفاده از رابطه (۱۱) به دست خواهد آمد.

$$t = \frac{N_x A_x + N_y A_y + N_z A_z - N_x O_x - N_y O_y - N_z O_z}{N_x (P_x - O_x) + N_y (P_y - O_y) + N_z (P_z - O_z)} \quad (11)$$

مختصات نقطه واقع بر روی خط که در معادله صفحه صدق می‌کند با استفاده از رابطه (۱۰ و ۱۱) قابل محاسبه است.

۶- پردازش تصویر و بازیابی مدل

در شکل ۱۶ عکس اولیه قبل از انجام هرگونه پردازشی نشان

۵-۲- کالیبراسیون لیزر

هدف از کالیبراسیون لیزر یافتن موقعیت زاویه‌ای آن برای محاسبه عمق با استفاده از الگوریتم مثلث بندی می‌باشد. استفاده از وسایل مکانیکی برای یافتن زاویه لیزر با خطا قابل ملاحظه‌ای همراه است، بنابراین در این مقاله مطابق شکل ۱۴ از دو صفحه کالیبراسیون استفاده شده است.

مشاهده می‌شود 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 (یا سه نقطه‌ای که بر روی این دوخط قرار دارد) خواهد گذشت امکان تعیین زاویه تابش لیزر و بازیابی مدل امکان پذیر خواهد شد. لذا با محاسبه صفحه عبوری از خطوط ایجاد شده از صفحه تابش لیزر و دو صفحه کالیبراسیون تعیین موقعیت زاویه‌ای لیزر امکان پذیر می‌باشد. در این مقاله زاویه صفحات تابش لیزر مستقل استخراج نشده است و مقدار عمق با استفاده از روابط بخش بعد و به صورت هم‌زمان با عملیات کالیبراسیون استخراج خواهد شد که در ادامه روابط مورد نظر ارائه گردیده است.

۵-۳- روابط ریاضی جهت بازیابی عمق

با توجه به شکل ۱۵ 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 (۹) قابل محاسبه می‌باشد.



شکل ۱۴ کالیبراسیون هم‌زمان دوربین و لیزر

در جدول ۱ مقدار پارامترهای درونی کالیبراسیون نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۳ توضیح داده شد، مقدار میانگین خطا برای مقادیر این جدول در راستای X و Y به ترتیب برابر $0/1575$ پیکسل و $0/1493$ پیکسل می باشد. در رابطه (۱۲) مقدار پارامترهای بیرونی (ماتریس انتقال و دوران) مربوط به صفحه کالیبراسیون ۱ (واقع در زیر سطح شیب دار و قطعه) و صفحه کالیبراسیون ۲ نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} R_{c1} &= \begin{bmatrix} -0.0224 & 0.9990 & -0.0390 \\ 0.9246 & 0.0059 & -0.3808 \\ -0.3802 & -0.0446 & -0.9238 \end{bmatrix} \\ T_{c1} &= \begin{bmatrix} -44.4 \\ -114.6 \\ 1286.5 \end{bmatrix} \text{ (mm)} \\ R_{c2} &= \begin{bmatrix} -0.0114 & 0.9993 & -0.0345 \\ 0.9950 & 0.0079 & -0.1000 \\ -0.0996 & -0.0355 & -0.9944 \end{bmatrix} \\ T_{c2} &= \begin{bmatrix} -87.4 \\ -122.9 \\ 1332.6 \end{bmatrix} \text{ (mm)} \end{aligned} \quad (12)$$

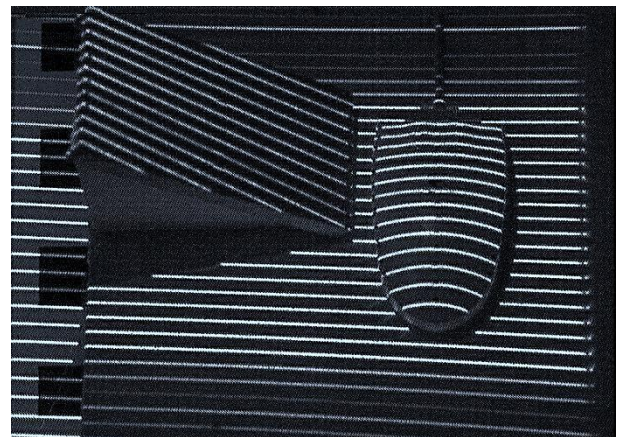
سپس همان طور که در بخش روابط ریاضی جهت بازیابی عمق، توضیح داده شد، برای به دست آوردن عمق با دقت بالاتر، مقدار ضخامت هر نقطه واقع بر روی سطح شیب دار و قطعه کار مانند نقطه P در شکل ۱۸، از برخورد صفحه تابش با نقاط استخراج شده در تصویر به دست می آید.

در ابتدا، هدف استخراج مختصات صد نقطه از هر ۹ مقطع واقع بر روی سطح شیب دار می باشد، بنابراین مختصات نهصد نقطه از سطح شیب دار استخراج خواهد شد. مطابق با نتایج به دست آمده در بخش محاسبه نویز جهت بهبود دقت لازم است که جابجایی نسبی به اندازه $0/5AD$ بین سنسور و لنز دوربین ایجاد شود.

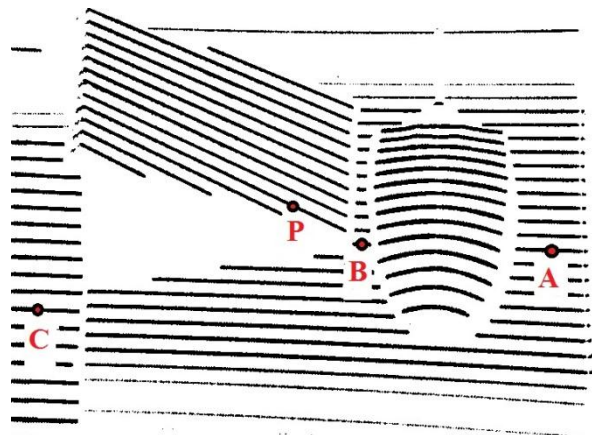
داده شده است. پس لبه یابی و حذف نویز، تصویر خروجی از این مرحله به صورت باینری تبدیل شده و به عنوان ورودی به بخش محاسبات فرستاده می شود. تصاویر در محیط تاریک گرفته شده است تا استخراج خطوط لیزر با دقت بیشتر و نویز کمتر امکان پذیر باشد.

با اعمال فیلتر مناسب هموارسازی و لبه یابی، تصویر برای عملیات بعدی بهبود و آماده می شود. 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 شود. شکل ۱۷ تصویر نهایی پس از اتمام مراحل پردازش را نشان می دهد.

بعد از انجام فرایند کالیبراسیون که در بخش کالیبراسیون دوربین ارائه شد، پارامترهای لازم جهت تبدیل موقعیت نقاط در تصویر نهایی (پس از اعمال پردازش تصویر)، از واحد پیکسل به مختصات واقعی استخراج می شود.



شکل ۱۶ تصویر اولیه قبل از پردازش تصویر



شکل ۱۷ تصویر نهایی پس از اعمال پردازش تصویر

جدول ۱ پارامترهای کالیبراسیون قبل و بعد از شبیه سازی

پارامترهای درونی	مقادیر حاصل از کالیبراسیون (پیکسل)
$fc(1)$	۳۰۶۷/۵۴۴۴۴
$fc(2)$	۳۰۷۳/۶۰۳۸۶
u_0	۲۹۹/۱۷۷۴۷
v_0	۴۵۲/۳۳۸۱۵
θ	۰/۰۰۰ (درجه ۹۰)
$kc(1)$	-۰/۰۱۰۲۰
$kc(2)$	-۴/۹۹۴۳۴
$kc(3)$	۰/۰۱۸۹۷
$kc(4)$	-۰/۰۰۵۴۲
$kc(5)$	۰/۰۰۰۰۰

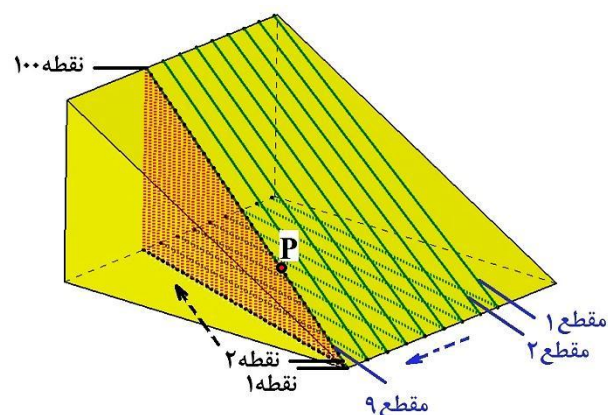
و عمق محاسبه شده از شبیه‌سازی، دقت اندازه‌گیری بهبود خواهد یافت. در این پروژه از یک سطح شیب‌دار جهت ایجاد داده‌های لازم برای برقراری رابطه بین مقدار عمق قبل و بعد از اعمال نويز بکار گرفته شده است. دلیل انتخاب سطح شیب‌دار این است که ارتفاع‌های مختلف از صفر (نقطه ۱- شکل ۱۸) در ابتدای سطح تا ارتفاع ماکزیمم (نقطه ۱۰۰- شکل ۱۸) در انتهای آن را می‌توان استخراج کرد.

رگرسیون خطی یکی از تکنیک‌های آماری برای داده‌هایی است که معمولاً در سطح مقیاس فاصله‌ای^۱ می‌باشند. رگرسیون خطی به دو صورت رگرسیون خطی ساده و رگرسیون خطی چند متغیره مطرح می‌شود. رگرسیون خطی ساده زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که یک متغیر وابسته و یک متغیر مستقل وجود داشته باشد. بنابراین با استفاده از رگرسیون خطی ساده، برقراری رابطه بین عمق نهصد نقطه سطح شیب‌دار، قبل و بعد از اعمال نويز امکان‌پذیر می‌باشد. برای انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار^۲ استفاده شده است. عمق نهصد نقطه قبل از اعمال نويز (Z_1) به عنوان متغیر مستقل و عمق استخراج شده بعد از اعمال نويز (Z_2) متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۲ نتیجه آزمون همبستگی پارامتری پیرسون^۳ بین مقادیر Z_1 و Z_2 ارائه شده است. ضریب همبستگی پیرسون برای محاسبه درجه و میزان ارتباط خطی بین دو متغیر فاصله‌ای و نسبی بکار می‌رود و با این ضریب میزان این ارتباط اندازه‌گیری می‌شود. مقدار ضریب همبستگی بین ۱- تا ۱+ در نوسان است که علامت آن نشانگر جهت رابطه بین دو متغیر می‌باشد.

جدول ۲ ضریب همبستگی

Z_2	Z_1		
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰**	Z_2	ضریب پیرسون
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	Z_1	
-	۰/۰۰۰	Z_2	معنی‌داری
۰/۰۰۰	-	Z_1	
۹۰۰	۹۰۰	Z_2	تعداد
۹۰۰	۹۰۰	Z_1	

*: همبستگی کامل



شکل ۱۸ مختصات نهصد نقطه از سطح شیب‌دار جهت بازیابی عمق

با توجه به رزلوشن موتور که برابر با ۰/۰۶ میکرومتر در هر پالس موتور می‌باشد، لذا جهت جابجایی مورد نظر نیاز به ۷۰ پالس موتور می‌باشد که همراه با خطای انتقال ۰/۰۳ میکرون است. این خطا تنها ۰/۳۲٪ از طول پیکسل می‌باشد که در نتیجه می‌تواند نادیده گرفته شود. با انجام مراحل فوق و تنظیم دوربین در موقعیت جدید، تصویر دوم گرفته می‌شود و فرایند مربوط به استخراج نقاط برای اعمال الگوریتم نويز در مراحل بعدی، مجدداً انجام می‌گیرد. بنابراین میانگین عمق قبل و بعد از اعمال نويز برای نهصد نقطه از سطح شیب‌دار استخراج خواهد شد که در بخش نتایج تجربی ارائه می‌شود.

۶-۱- رگرسیون خطی برای شبیه‌سازی فرایند اعمال نويز

با توجه به نتایج تئوری، بهبود دقت اسکنر به میزان دو برابر با استفاده از تغییر مکان کوچک بین سنسور و لنز دوربین، امکان‌پذیر می‌باشد ولی از طرف دیگر، انجام این تغییرات در حین تصویربرداری بر روی سخت‌افزار، کاری زمان‌بر خواهد بود. از این‌رو در این مقاله روشی برای بهبود دقت به همراه کاهش زمان اسکن ارائه شده است. در این مرحله، هدف شبیه‌سازی فرایند اعمال نويز می‌باشد. در واقع با کشف رابطه بین عمق نقاط اندازه‌گیری شده قبل و بعد از جابجایی نسبی بین سنسور و لنز، تنها کافی است که از جسم یک تصویر تهیه شود و با استفاده از آن عمق نقاط استخراج می‌شود. سپس به جای انجام تغییرات سخت‌افزاری و گرفتن تصویر جدید، از نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه عمق جدید نقاط استفاده خواهد شد. در نهایت با استفاده از میانگین عمق نقاط حاصل از تصویر اول

1. Interval Scale
2. SPSS
3. Pearson Correlation Coefficient

خطای استاندارد برآورد^۶: نشان دهنده میزان قدرت پیش‌بینی معادله رگرسیون است.

در جدول ۴ نتایج تجزیه واریانس ارائه شده است که منبع تغییرات متغیر وابسته در دو منبع رگرسیون و باقیمانده نشان داده شده است. برای هر یک از این منابع، مجموع مربعات، درجه آزادی و میانگین مربعات آمده است.

مقدار F نشان دهنده این است که آیا مدل رگرسیونی تحقیق، مدل مناسبی است یا خیر، به عبارتی آیا متغیر مستقل قادر است به خوبی تغییرات متغیر وابسته را توضیح دهد. تشخیص این موضوع با معنی داری مقدار F در سطح خطای کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از 0.05 امکان‌پذیر است. در این تحقیق مقدار به دست آمده ($F=1178918$) در سطح خطای کوچک‌تر از 0.01 معنی‌دار است. این مقدار نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل از قدرت تبیین بالایی برخوردار هستند. به عبارتی مدل رگرسیونی تحقیق، مدل خوبی است و به کمک آن می‌توان تغییرات متغیر وابسته Z_2 را بر اساس متغیر مستقل Z_1 تعیین کرد. در جدول ۵ نتایج مربوط به ضرایب تأثیر رگرسیونی متغیر مستقل بر متغیر وابسته ارائه شده است. اولین آماره، عدد ثابت است، که عرض از مبدا می‌باشد و میزان تغییر متغیر وابسته را بدون دخالت متغیر مستقل نشان می‌دهد. ضرایب تأثیر رگرسیونی دو دسته اند، ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد نشده و ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد شده.

جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس رگرسیون^۷

صفت تغییر	باقیمانده	رگرسیون	کل
مجموع مربعات	۵۱۹/۲۴۴	۶۸۱۴۱۴/۴۳۹	۶۸۱۹۳۳/۶۸۳
میانگین مربعات	۰/۵۷۸	۶۸۱۴۱۴/۴۳۹	
درجه آزادی	۸۹۸	۱	۸۹۹
F	۱۱۷۸۹۱۸**		

** همبستگی کامل

جدول ۵ ضرایب رگرسیون و آزمون معنی‌دار بودن آنها

آماره	ضرایب استاندارد شده		ضرایب استاندارد نشده		مدل
	ضریب $Beta$		خطا		
t				ضریب B	۱
۹/۰۴۳**			۰/۰۶۲	۰/۵۶۵	مقدار ثابت
۱۰۸۶**	۱/۰۰۰		۰/۰۰۱	۰/۹۹۳	شیب Z_1

** همبستگی کامل

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول ماتریس همبستگی، با اطمینان 0.99 و سطح خطای کوچک‌تر از 0.01 بین Z_1 و Z_2 رابطه وجود دارد. مقدار این ضریب، برابر با 1 و به صورت مثبت است بدین معنی که با بالا رفتن Z_1 مقدار Z_2 به نسبت قوی افزایش می‌یابد. در ماتریس همبستگی مشاهده می‌شود که هر متغیر با خود دارای همبستگی کامل است.

در جدول ۳ خلاصه آمارهای مربوط به برازش مدل^۱ نشان داده شده است. پارامترهای موجود در این جدول عبارتند از: مدل: تعداد مدل‌های تشکیل شده را نشان می‌دهد که در این تحقیق برابر با یک است.

میزان همبستگی^۲: مقدار همبستگی بین مجموعه متغیرهای مستقل و وابسته را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین 0 تا 1 نوسان دارد و هرچه این ضریب به 1 نزدیک‌تر باشد، نشان از همبستگی قوی بین متغیرهای مستقل و وابسته است.

ضریب تعیین^۳: که با علامت R^2 نشان داده می‌شود. مقدار این ضریب نیز بین 0 تا 1 نوسان دارد. هرچه این ضریب به 1 نزدیک‌تر باشد، متغیرهای مستقل توانسته‌اند میزان زیادی از واریانس متغیر وابسته را تبیین کنند و مدل رگرسیونی قادر است داده‌ها را به خوبی برازش کند.

ضریب تعیین تعدیل شده^۴: این ضریب مقدار ضریب تعیین را به منظور انعکاس بیشتر میزان نکویی برازش مدل، تصحیح می‌کند. برای تفسیر ضریب تعیین، معمولاً از این مقدار استفاده می‌شود؛ زیرا مقدار ضریب تعیین با درجات آزادی یا حجم نمونه‌ها، تعدیل شده است. مقدار ضریب تعیین تعدیل شده برابر با 0.99 است که نشان می‌دهد متغیر مستقل توانسته 99 درصد از تغییرات متغیر وابسته را تعیین کند. مابقی این تغییرات به مجذور کمیت خطا معروف است که تحت تأثیر متغیرهای خارج از مدل می‌باشد.

جدول ۳ خلاصه مدل^۵

مدل	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	میزان همبستگی	خطای استاندارد برآورد
۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۰/۷۶۰۴۰۹۶

1. Model fit
2. R
3. R Square
4. AdjustedR Square
5. Model Summary

6. Std. Error of the Estimate

7. ANOVA

۷- نتايج تجربی

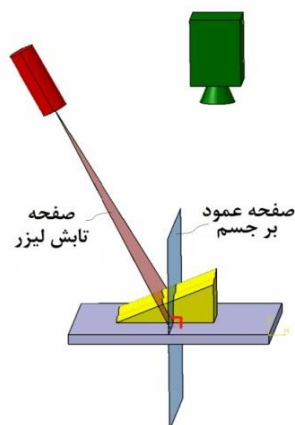
برای استخراج مختصات واقعی جسم و بررسی دقت ابعاد محاسبه شده از قسمت قبل، از دستگاه اندازه گیری مختصات موجود در دانشگاه BTH، دستگاه شرکت تسا مدل ms-343 با دقت $0.01/$ میلی متر استفاده شده است. با توجه به زاویه دار بودن صفحات تابش ليزر، هر کدام از خطوط ليزر ایجاد شده روی جسم در یک صفحه مایل نسبت به راستای عمود بر جسم قرار می گیرند. در شکل ۲۰- الف موقعیت یکی از صفحات به صورت شماتیک نشان داده شده است. بنابراین مطابق شکل ۲۰- ب جسم مورد نظر بر روی یک صفحه مسطح قرار می گیرد. موقعیت زاویه ای این صفحه (α) باید به گونه ای تنظیم شود تا با صفر کردن درجه آزادی دستگاه اندازه گیری در موقعیت های مناسب x و حرکت بازو در راستای y ، پراب دستگاه قادر به حرکت بر روی خطوط مورد نظر در شکل ۸ باشد.

۷-۱- بررسی تأثیر اعمال نويز روی جسم مبنا (سطح شیب دار)

همان طور که ذکر شد، مقدار عمق بازیابی شده با استفاده از تکنیک اعمال نويز از میانگین عمق استخراج شده قبل و بعد از اعمال نويز محاسبه می شود. در شکل ۲۱ میانگین و بیشینه درصد خطای ابعاد استخراج شده قبل و بعد از اعمال نويز در امتداد ۹ مقطع مورد نظر از سطح شیب دار نشان داده شده است. درصد خطا با توجه به فرمول (۱۴) محاسبه شده است.



(ب)



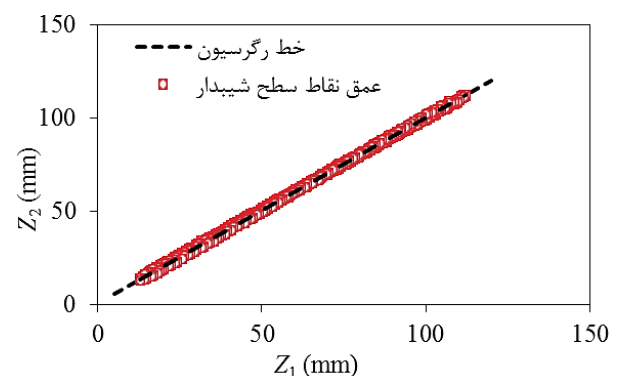
(الف)

شکل ۲۰ الف- موقعیت خطوط تابیده شده بر جسم ب- استخراج عمق نقطه با استفاده از CMM

ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد نشده ضرایب مربوط به مدل رگرسیونی برآورد شده می باشند که در این تحقیق مطابق فرمول (۱۳) به دست آمده است.

$$Z_2 = 0.993 Z_1 + 0.565 \quad (13)$$

در شکل ۱۹ مختصات نقاط واقع بر روی سطح شیب دار قبل و بعد از اعمال نويز به همراه معادله رگرسیونی مذکور نشان داده شده است. ضرایب تأثیر رگرسیونی استاندارد شده سهم نسبی هر متغیر مستقل را در تبیین تغییرات متغیر وابسته مشخص می کند. در این تحقیق چون تنها یک متغیر مستقل وجود دارد، عملاً امکان استفاده از آن وجود ندارد. معمولاً هرگاه قدر مطلق آماره (t) بزرگتر از عدد $2/33$ باشد سطح خطا کوچک تر از 0.01 یا 0.05 بوده و نتیجه می شود که متغیر مورد نظر تأثیر معنی دار در تعیین تغییرات متغیر وابسته داشته است. بنابراین مطابق جدول ۵ ضرایب رگرسیونی در سطح آماری 1% معنی دار هستند. با توجه به نتایج آماری ارائه شده از رابطه رگرسیون بین عمق نقاط، قبل و بعد از اعمال نويز می توان دریافت که شبیه سازی فرایند اعمال نويز امکان پذیر می باشد. برای این منظور کافی است ابتدا با استفاده از یک جسم مبنا که در اینجا سطح شیب دار انتخاب شده، رابطه بین عمق نقاط را قبل و بعد از جابجایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین محاسبه نمود. در مرحله بعد برای اجسام دیگر تنها با گرفتن یک تصویر و استخراج عمق نقاط توسط رابطه رگرسیون بجای گرفتن تصویر دوم، ابعاد جسم را می توان با دقت بیشتر و زمان اسکن کمتر محاسبه کرد. لازم به ذکر است که برای بالا بردن دقت، ابعاد جسم مبنا باید به نحوی انتخاب شود که سایر اجسام جهت اندازه گیری، دارای ابعادی بین ارتفاع کمینه و بیشینه سطح شیب دار باشند تا نیاز به برون یابی نباشد.

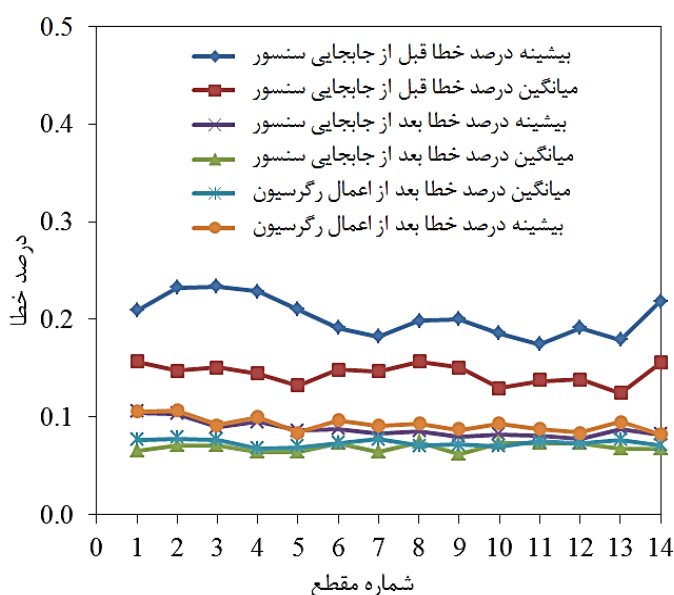


شکل ۱۹ مختصات نهصد نقطه از سطح شیب دار و معادله رگرسیونی

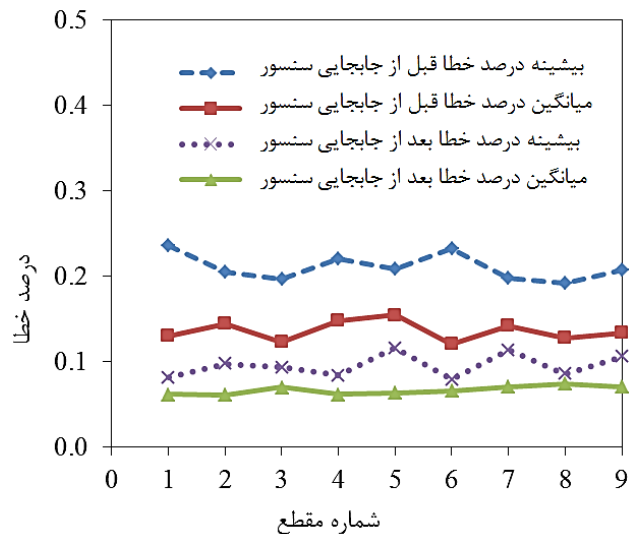
Z_2 واقعی (اعمال نويز) استخراج می‌شود. در مرحله دوم از Z_1 به همراه Z_2 محاسبه شده با استفاده از رابطه رگرسیون (فرمول (۱۳)) مقدار عمق نهایی استخراج می‌شود. در شکل ۲۲ میانگین و بیشینه درصد خطای ابعاد استخراج شده قبل و بعد از اعمال نويز در امتداد ۱۴ مقطع مورد نظر از قطعه کار نشان داده شده است؛ همچنین مقدار میانگین و بیشینه درصد خطا برای این مقاطع در حالتی که از مدل رگرسیونی جهت محاسبه Z_2 استفاده شده نیز در این شکل ارائه شده است. با توجه به شکل ۲۲ مشاهده می‌شود که بیشینه و میانگین درصد خطا برای حالتی که از معادله رگرسیون استفاده شده است، نزدیک به حالتی است که اعمال نويز توسط تغییرمکان نسبی بین سنسور و لنز دوربین صورت گرفته است. در شکل ۲۳ اختلاف درصد خطا بین این دو روش اعمال نويز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در صورتی که از معادله رگرسیون استفاده شود، متوسط درصد خطا (در هر دو حالت میانگین و بیشینه) به میزان ۰/۱ نسبت به حالت جابجایی سخت‌افزاری سنسور افزایش یافته است.

۸- نتیجه‌گیری

مشاهده می‌شود که با الگوریتم اعمال نويز، با انجام فقط دو اسکن از جسم، علاوه بر افزایش دقت، عملیات کالیبراسیون ليزر همزمان با استخراج مدل سه‌بعدی جسم نیز امکان‌پذیر می‌باشد.



شکل ۲۲ تحلیل خطای استخراج ابعاد قطعه کار در طول ۱۴ خط



شکل ۲۱ تحلیل خطای استخراج ابعاد سطح شیب‌دار در طول ۹ خط

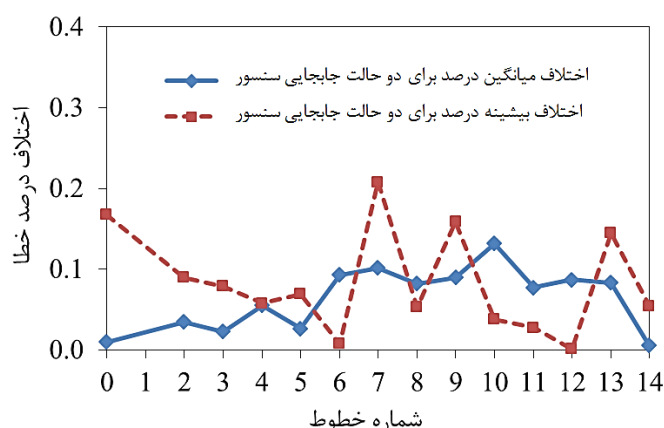
$$\text{درصد خطا} = \frac{\left| \text{مقدار عمق توسط CMM} - \text{مقدار محاسبه شده} \right|}{\text{مقدار عمق توسط CMM}} \times 100 \quad (14)$$

با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که در اکثر موارد دقت بازیابی عمق بعد از اعمال نويز تقریباً دو برابر بهبود پیدا کرده است. این موضوع نشان‌دهنده صحت نتایج تئوری است. بنابراین با اطمینان، از داده‌های اندازه‌گیری شده در این قسمت یعنی Z_1 و Z_2 برای ایجاد مدل رگرسیونی استفاده می‌شود تا فرایند اعمال نويز برای قطعات دیگر قابل شبیه‌سازی باشد.

۷-۲- بررسی دقت رابطه رگرسیون در استخراج ابعاد قطعه کار

بعد از استخراج مدل رگرسیونی، الگوریتم اعمال نويز برای قطعات دیگر قابل شبیه‌سازی است. در اینجا برای بررسی دقت این مدل از یک موس کامپیوتری استفاده شده است. هدف استخراج ۱۴ مقطع از سطح موس مطابق شکل ۸ می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی مراحل آزمایش عملی، قطعه کار و سطح شیب‌دار به طور هم‌زمان بر روی صفحه کالیبراسیون قرار داشته‌اند (شکل ۷)، بنابراین ارتفاع نقاط واقع بر روی سطح قطعه کار نیز برای قبل (Z_1) و بعد از جابجایی نسبی بین سنسور و لنز دوربین (Z_2) استخراج شده است. بنابراین در مرحله اول، مقدار عمق نهایی نقاط با استفاده از میانگین Z_1 و

- [4] Zhang X., Li Y. and Zhu L., "Color Code Identification in Coded Structured Light", *Applied Optics*, Vol. 51, Issue 22, 2012, pp. 5340-5356.
- [5] Khalili K., Razavi S.A. and Karimzadgan D., "High Resolution Measurements using a Low Resolution System", *Measurement Science Review*, Vol. 5, Section. 1, 2005, pp. 56-59.
- [6] Suresh K.V., Rajagopalan A.N., "Super-resolution using Motion and Defocus Cues", *IEEE Image Processing (ICIP)*, Vol. 4, 2007, pp. 213-216.
- [7] Chen J., Khatibi S. and Kulesza W., "Depth Reconstruction Uncertainty Analysis and Improvement – The Dithering Approach", *Elsevier Image and Vision Computing*, Vol. 28, Issue 9, 2010, pp. 1377-1385.
- [8] Agrawal A., Raskar R., "Resolving Objects at Higher Resolution from a Single Motion-blurred Image", *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Minneapolis, 2007, pp. 1-8.
- [9] Ritz M., Scholz M., Goesele M. and 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.
- [10] Hattori K., Sato Y., "Accurate Rangefinder with Laser Pattern Shifting", *IEEE Pattern Recognition*, Vol. 3, 1996, pp. 849-853.
- [11] Wang J., Zhang C., Zhu W., Zhang Z., Xiong Z. and Chou P.A., "3D Scene Reconstruction by Multiple Structured-light Based Commodity Depth Cameras", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Kyoto, 2012, pp. 5429-5432.
- [12] "MetroVisionLab Toolbox for Camera Calibration and Simulation", <http://metrovisionlab.unizar.es>.
- [13] Xu J., Douet J., Zhao J., Song L. and Chen K., "A Simple Calibration Method for Structured Light-based 3D Profile Measurement", *Elsevier Optics & Laser Technology*, Vol. 48, 2013, pp. 187-193.
- [14] Lui Y., Su X., "Camera Calibration with Planar Crossed Fringe Patterns", *Elsevier Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 123, Issue. 2, 2012, pp. 171-175.
- [15] "CameraCalibrationToolbox", www.mathworks.com.



شکل ۲۳ اختلاف درصد خطا برای دو حالت اعمال نویز: استفاده از معادله رگرسیون - تغییر مکان نسبی لنز و سنسور دوربین

با توجه به این موضوع که در کار حاضر 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 می شود. از آنجا که تغییرات سخت افزاری جهت اعمال نویز در هنگام اسکن کردن قطعه کاری زمان بر می باشد، الگوریتم اعمال نویز با استفاده از معادله رگرسیون مناسب شبیه سازی شده است تا علاوه بر افزایش دقت، زمان اسکن نیز کاهش یابد.

۹- 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] Cheng J., Zheng S. and Wu X., "Structured Light-Based Shape Measurement System", *Elsevier Signal Processing*, Vol. 93, Issue. 6, 2012, pp. 1-10.
- [3] Jing X., Shaoli L., An W., Bingtuan G., Qiang Y., Danpu Z., Ruikun L. and Ken C., "An Absolute Phase Technique for 3D Profile Measurement using Four-Step Structured Light Pattern", *Elsevier Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, Issue. 9, 2012, pp. 1274-1280.