

توسعه یک اسکنر نوری هوشمند در برداشت تطبیقی ابر نقاط متناسب با میزان جزئیات عوارض سطح

علی ابذل*^۱، محمد سعادت سرشت^۲، علی بابایی^۱

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

{*ali.abzal, babaei.a}@ut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۵، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

این مقاله به طراحی و ساخت یک سیستم اندازه گیری بر اساس تلفیق دو روش فتومتریک استریو و نگاشت فرینج بروش شیفت فاز می پردازد. هدف این تلفیق جلوگیری از اندازه گیری نقاط غیر ضروری متناسب با میزان جزئیات سطح می باشد. می توان میزان انحنای سطح برای هر واحد پیکسل تصویری را توسط روش فتومتریک استریو بدست آورد. بنابراین پیش از محاسبه مختصات سه بعدی نقاط تصویر توسط روش نگاشت فرینج، میزان تراکم مورد نیاز برای سطوح مختلف عارضه توسط انحنای بدست آمده از روش فتومتریک استریو پیش بینی می شود و نقاط غیر ضروری حذف می شوند. اضافه شدن روش فتومتریک استریو تنها هزینه تعدادی منبع نوری ارزان قیمت را به سامانه اسکنر می افزاید و نیز اضافه شدن چند تصویر به فرایند اندازه گیری را شامل می شود. اما در مقابل بسته به پیچیدگی هندسی سطح شیء، با کاهش ۵۰٪ تا ۷۵٪ زمان محاسبات و کاهش ۵۰٪ تا ۸۰٪ حجم داده برداشتی بواسطه حذف نقاط غیر ضروری را به همراه خواهد داشت. این کاهش تراکم با فرض جدایی مدل سبک شده به میزان ۰/۰۱ میلی متر از مدل اصلی متراکم صورت گرفته است.

واژگان کلیدی: سبک سازی ابر نقاط، فتومتریک استریو، نگاشت فرینج بروش شیفت فاز، اسکنر هوشمند

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

اندازه‌گیری سه بعدی یکی از حوزه‌های مورد توجه صنایع مختلف نظیر کنترل کیفیت، مهندسی معکوس، پزشکی و غیره می‌باشد. روش‌های تصویر مبنای بدلیلی خصوصیتی نظیر سرعت بالای اندازه‌گیری و غیر تماسی که شامل استریو فتوگرامتری، اسکنرهای مبتنی بر لیزر و نیز اسکنرهای مبتنی بر نور ساخت یافته می‌باشد بسیار مورد توجه هستند [۱-۴]. در این میان روش‌های مبتنی بر نور ساخت یافته ویژگی‌های منحصر به فردی دارد که آنرا از دیگر روش‌ها متمایز ساخته است. از جمله این خصوصیات می‌توان به برداشت نقاط مترکم، سرعت بالا و دقت مناسب اشاره نمود [۲]. بعنوان یک تعریف ساده از روش نگاشت فرینج می‌توان گفت که پروژکتور یک الگوی نوری را به سطح عارضه می‌تاباند و تصویر این الگو که بواسطه شکل عارضه تغییر شکل یافته است توسط دوربین اخذ می‌گردد. در ادامه مقدار فاز هر پیکسل محاسبه می‌گردد [۳]. فاز مطلق هر پیکسل برای یافتن تناظر در یک سیستم استریو که می‌تواند یکی از دوربین‌ها خود پروژکتور نیز باشد استفاده می‌گردد [۵-۷]. در نهایت با استفاده از اطلاعات کالیبراسیون استریو و داده‌های تصویری مختصات سه بعدی پیکسل‌های تصویری محاسبه می‌شود. اگرچه تراکم بسیار بالای داده ابر نقاط بدست آمده از این روش موجب بروز مشکلات فراوانی هنگام کار کردن با داده‌های اسکنرهای اپتیکی می‌گردد. حجم بسیار بالای ابر نقاط باعث می‌شود بسیاری از پردازش‌های بعدی جهت نمایش [۸]، مهندسی معکوس [۹] و یا استخراج ویژگی [۱۰] توسط کامپیوترهای معمولی امکان پذیر نباشد. با توجه به طبقه بندی ارائه شده توسط [۱۱] روش‌های سبک سازی داده ابر نقاط به سه گروه تقسیم می‌شوند: روش‌های خوشه بندی، روش‌های تکراری و روش‌های شبیه سازی ذرات.

روش‌های خوشه بندی^۱: روش‌های خوشه بندی معیاری از شباهت هندسی (نظیر انحناء یا نرمال بر سطح) میان نقاط را در یک همسایگی مکانی ارزیابی می‌کنند و برای هر خوشه یک یا چند نقطه بعنوان نماینده آن خوشه حفظ و بقیه حذف می‌گردند. برای خوشه بندی دو

استراتژی مطرح می‌باشد. اول ایجاد خوشه‌های کوچک توسط نقاط شروع^۲ اتفاقی و رشد آنها به خوشه‌های بزرگتر که به آن رویش ناحیه^۳ گفته می‌شود و دوم تقسیم خوشه‌های بزرگ به خوشه‌های کوچک با استفاده از ایجاد تمایز میان اعضای خوشه‌ها که به آن خوشه بندی سلسله مراتبی^۴ گفته می‌شود. در این راستا می‌توان به استفاده از الگوریتم خوشه بندی kmeans و معیار تغییرات نرمال در یک همسایگی [۱۲] و یا معیار تراکم نقاط [۱۳] بعنوان معیار شباهت اشاره نمود. همچنین از الگوریتم KNN^۵ و معیار انحنای سطوح در [۱۴،۱۵] برای خوشه بندی نقاط استفاده شده است.

روش‌های ساده سازی تکراری^۶: در این روش‌ها نقاط در یک فرایند تکراری حذف می‌شوند به شرطی که سطح نهایی بدست آمده کمترین فاصله را تا سطح اولیه بر اساس یک آستانه تعریف شده داشته باشد. در این راستا الگوریتم‌های نازک سازی^۷ مختلفی وجود دارند. در [۱۶] از آنالیز PCA^۸ برای ایجاد سطوح محلی استفاده می‌کند و از یک کرنل برای اندازه‌گیری میزان تمایز نقاط از سطوح محلی ایجاد شده بهره گرفته و نقاط با حداقل تمایز را از هر ناحیه حذف می‌شود. در روشی دیگر حذف نقاط دارای کمترین اهمیت را پیشنهاد می‌کند [۱۷]. بنابراین نقاط با استفاده از معیار شباهت ویژگی‌های هندسی نظیر تغییرات بردار نرمال سطوح درجات اهمیت را می‌گیرند و تا رسیدن به تعداد از پیش معین شده حذف می‌گردند. همچنین [۱۸] به کاهش ابر نقاط با ویژگی‌های هندسی مشابه می‌پردازد و طی یک فرایند تکراری خصوصیات هندسی ابر نقاط سبک شده را با ابر نقاط اولیه مقایسه می‌کند و این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که اختلاف هندسی نتایج از حد از پیش تعیین شده‌ای عبور نکند.

روش‌های شبیه سازی ذرات^۹: این روش موقعیت و تراکم نقاط را تغییر می‌دهد. اما میزان تغییر موقعیت آنها مقدار مشخص و تعریف شده‌ای دارد که از نوعی درون

^۲ Seed Point

^۳ Region-growing

^۴ Hierarchical Clustering

^۵ K Nearest Neighbor

^۶ Iterative simplification

^۷ thinning

^۸ Principle Component Analysis

^۹ Particle simulation

^۱ Clustering

بعدی توسط روش نگاشت فرینج^۳، ویژگی های هندسی سطح عرضه از داده های بدست آمده توسط تکنیک دیگری بنام فتومتریک استریو^۴ استخراج شده و نقاط اضافی در فضای دو بعدی تصویر استریو فیلتر می گردند. از آنجایی که داده فتومتریک استریو دارای حداقل نویز فرکانس بالا می باشد، از انتخاب داده نویزی ناخواسته به عنوان داده با جزئیات بالا اجتناب خواهد شد و موجب کاهش نسبت سیگنال به نویز نمی گردد. اضافه شدن تکنیک فتومتریک استریو از جنبه هزینه تنها به تعدادی دیود نوری^۵ خلاصه می شود که هزینه چندانانی به سامانه اسکنر اضافه نمی کند. اما جلوی محاسبات غیر ضروری را برای ایجاد نقاطی که نیازی به تولید آنها نمی باشد را گرفته و بنابراین اتلاف زمان اندازه گیری بواسطه افزایش تعداد تصاویر اخذ شده حین اسکن را جبران خواهد کرد. همچنین روش استخراج نواحی با سطوح جزئیات متفاوت و طبقه بندی آن در فضای دوبعدی است و در نتیجه پیچیدگی بسیار کمتری در مقایسه با انجام عملیات مشابه در فضای داده سه بعدی خواهد داشت.

در بخش دوم اصول اندازه گیری توسط نگاشت فرینج مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین بخش سوم به تبیین روش فتومتریک استریو و تصحیحات آن می پردازد. ارائه اسکنر پیشنهادی در این مقاله موضوعی است که مطالب بخش چهارم را به خود اختصاص می دهد. در بخش پنجم به ارزیابی نتایج پرداخته و در انتها بخش ششم نتیجه گیری ارائه می گردد.

۲- روش نگاشت فرینج با شیفت فاز

روش نگاشت فرینج یک روش مبتنی بر نور ساخت یافته است که از الگوی سینوسی درجات خاکستری برای کددهی پیکسل های تصویر استریو در یک راستا بهره می گیرد. بنابراین درجه خاکستری هر پیکسل I_i در تصویر استریو متأثر از الگوی تابیده شده در رابطه (۱) تعریف می شود. در این رابطه $A_{(x,y)}$ درجه خاکستری نور زمینه، $B_{(x,y)}$ درجه خاکستری الگوی تابیده شده، $\varphi_{(x,y)}$ فاز معادل هر پیکسل در یک طول موج الگوی سینوسی و N

یابی میان داده های موجود محاسبه می گردد. در نهایت سطحی شبیه سازی شده از سطح اول را نتیجه می دهد که بیشترین شباهت با حداقل نقاط لازم را داشته باشد. در روش پیشنهادی توسط [۱۹] از منحنی بی-اسپلاین ناپیکنواخت نسبتی^۱ برای مدلسازی سطوح بهره می گیرد و با استفاده از روش تانژانت نقاط چرخش منحنی را مشخص می کند. بنابراین نقاط اصلی مدل بدست آمده را حفظ و جایگزین ابر نقاط اولیه می نماید. همچنین در [۲۰] یک سطح منحنی به نقاط برازش داده شده و بر اساس میزان جزئیات موجود در داده ابر نقاط اولیه نقاط جدید نمونه برداری می گردد.

تمامی روش های پیشنهادی موجود در مرحله پس پردازش و بعد از فرایند اندازه گیری عمل می کنند. هرچند فرایند سبک سازی ابر نقاط برای گریز از پیچیدگی های پردازش های بعدی در مواجهه با حجم بالای نقاط است، اما به ناچار در این مرحله با پیچیدگی محاسباتی بالا بدلیل سروکار داشتن با ابر نقاط با حداکثر تراکم مواجه هستند. جستجوی نقاط همسایگی در ابر نقاط سه بعدی و برازش منحنی و استخراج نرمال سطوح از جمله پیچیدگی های محاسباتی روش های موجود بشمار می رود. از سوی دیگر داده های بدست آمده از روش های مبتنی بر نگاشت الگوی سینوسی حاوی نویز فرکانس بالا می باشد. این درحالی است که تاکید تمامی روش های سبک سازی بر حفظ جزئیات است. بنابراین طی فرایند سبک سازی داده های حاوی نویز بیشتر حفظ شده و داده های کم نویز حذف می گردد و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز^۲ داده سبک شده کاهش خواهد یافت. با یک نگاه کلی به فرایند اندازه گیری ابر نقاط سه بعدی و پس پردازش انجام شده جهت سبک سازی، استنباط می شود که یک اتلاف هزینه در محاسبات رخ داده است. چرا که بخشی از داده ای که لزومی به ایجاد آن نبوده است تولید شده و طی یک فرایند هزینه بر محاسباتی حذف می گردد.

در این مقاله یک سیستم اسکنر تلفیقی بدیع پیشنهاد می گردد که بمنظور جلوگیری از تولید داده ابر نقاط حجیم در مرحله اندازه گیری و پیش از محاسبه نقاط سه

^۳ Fringe projection
^۴ Photometric stereo
^۵ LED

^۱ Non-uniform rational B-spline (NURBS)
^۲ Signal to noise ratio

ابهام فاز چندگانه استفاده شده است که نویز لبه های پله‌ای را به حداقل می‌رساند [۳]. از آنجایی که از یک دوربین و یک پروژکتور در این استقرار بهره گرفته شده است، پروژکتور بعنوان یک دوربین معکوس در کالیبراسیون استریو شرکت خواهد کرد. کالیبراسیون دوربین و پروژکتور برای بدست آوردن پارامترها توسط روش بوگت^۳ انجام شده که در محیط متلب^۴ پیاده سازی شده است [۲۲]. بنابراین مختصات سه بعدی پیکسل های تصویری از طریق محاسبات استریوی میان دوربین و پروژکتور بدست می‌آید.

۳- روش فتومتریک استریو و تصحیحات

روش فتومتریک استریو به روشی اشاره می‌کند که می‌توان با تصویربرداری از یک منظر و نوردهی از جهات مختلف اطلاعات مربوط به نرمال سطوح را محاسبه نمود. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ معرفی گردید [۲۳]. اصول این روش بر اساس تابع توزیع دوطرفه بازتاب^۵ برای سطوح لامبرترین در مواجهه با یک منبع نوری خاص تبیین می‌گردد (رابطه ۴).

$$I_k(x) = \frac{\rho(x)}{\pi} E_k(x). \quad E_k(x) = e_k N L_k \quad (4)$$

در رابطه بالا L_s رادیانس یک المان سطح در مواجهه با یک منبع نوری، ρ آلبدوی یک المان سطح و E ایرادیانس یا بازتابش یک المان سطح، n بردار نرمال، S امتداد جهت منبع نوری و k میزان شدت منبع نوری می‌باشد. در صورت ثابت ماندن آلبدو برای تمامی المان های سطح مقدار رادیانس المان سطح با کسینوس هادی زاویه بین امتداد منبع نوری و برداری نرمال سطح متناسب خواهد بود. این مدل ریاضی ساده ترین مدل با فرض آلبدوی یکسان، سطح لامبرترین و نیز منبع نوری با پرتوهای موازی است.

۳-۱- تصحیح سطوح براق و سایه

سطوح غیر لامبرترین موجب تشکیل هایلایت شده در سطح عارضه و ایجاد خطا در محاسبه بردار نرمال گردد.

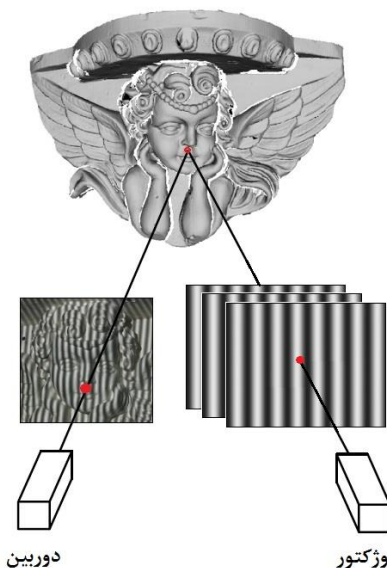
تعداد شیفت هایی است که برای حل مسئله بازبایی فاز به سطح عارضه تابانده می‌شود. بنابراین برای بدست آوردن مقدار فاز هر پیکسل از رابطه (۲) می‌بایست حداقل سه الگو با شیفت ثابت ۱۲۰ درجه به سطح عارضه تابانده شود.

$$I_i = A_{(x,y)} + B_{(x,y)} \cos\left(\varphi_{(x,y)} + \frac{2\pi i}{N}\right). \quad (1)$$

$i = 1 \dots N$

$$\varphi_{(x,y)} = \tan^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^N I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right)}{\sum_{i=1}^N I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)} \right] \quad (2)$$

$$B_{(x,y)} = \frac{2}{N} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \right]^2} \quad (3)$$



شکل ۱- اصول اندازه گیری بروش نگاشت فرینج مبتنی بر شیفت فاز

تصاویر الگوی سینوسی که برای کددهی فاز پیکسهای تصویر استفاده می‌شود شامل ۶ الگو در کوتاهترین طول موج می‌باشد. این ۶ الگو شامل میانگین دو سری الگوی سه تایی با شیفت ۱۲۰ درجه می‌باشد که نسبت به یکدیگر ۶۰ درجه شیفت دارند. این روش به اصطلاح روش سه مرحله ای دوگانه^۱ نامیده می‌شود که تا حد زیادی خطای غیر خطی رادیومتریکی درجات خاکستری دوربین و پروژکتور را کاهش می‌دهد [۲۱]. برای رفع ابهام فاز^۲ تصاویر فاز بازبایی شده از روش رفع

^۳ Bouguet

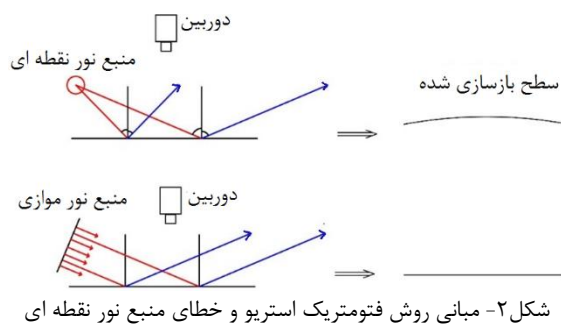
^۴ MATLAB

^۵ Bidirectional Reflectance distribution

^۱ Double Three Step Method

^۲ Phase unwrapping

شدت روشنایی هر منبع نوری می باشد. در این رابطه شدت نور از منبع نور تا هر نقطه از سطح عارضه با معکوس مربع فاصله بین ایندو رابطه مستقیم دارد. همچنین f فاصله کانونی دوربین، μ ابعاد پیکسل دوربین و z میانگین فاصله نقاط شیئی از دوربین می باشد. از آنجایی که موقعیت نقاط سطح عارضه معلوم نیستند، معادله کمترین مربعات (۵) با مقدار اولیه $X_d^0 = [x, y, 1]$ آغاز شده و نیز موقعیت منابع نوری تقریبی (L_k^0) با استفاده از فواصل اندازه گیری شده بازوهای نگهدارنده چراغ ها و زوایای تقریبی نسبت به مرکز لنز دوربین محاسبه می گردد. جزئیات محاسبات در [۲۷] به تفصیل آمده است.



شکل ۲- مبانی روش فتومتریک استریو و خطای منبع نور نقطه ای

۳-۳- تصحیح خطای انعکاس داخلی

همچنین روش فتومتریک استریو ضعف جدی دیگری بنام خطای انعکاس داخلی^۱ دارد که اغلب روش های اندازه گیری با نور ساخت یافته دچار آن هستند. این مشکل بدلیل وجود سطوح مقعر و نوردھی غیر مستقیم می باشد. نوردھی غیر مستقیم باعث نرم شدن بردارهای نرمال در این سطوح شده و در نتیجه آن کم عمق تر نشان داده می شوند. در صورت استفاده از ویژگی های هندسی محاسبه شده توسط روش فتومتریک استریو بعنوان معیار سبک سازی نقاط در اسکتر مبتنی بر فرینج، لازم است تا حد ممکن مدل مورد استفاده در این روش عاری از خطاهای هندسی قابل توجه باشد. از این رو روش های متعددی برای کاهش خطای انعکاس داخلی در روش فتومتریک استریو پیشنهاد شده است [۲۸-۳۱]. در این مقاله از ایده روش پیشنهادی توسط [۲۸] استفاده شده است. چرا که مدل مورد استفاده در آن با منبع نور نقطه ای سازگار است. در این روش با استفاده از یک برنامه متن

برای جلوگیری از ورود درجات خاکستری متاثر از هایلایت و نیز سایه به محاسبات فتومتریک استریو از روش پیشنهادی توسط [۲۴] استفاده شده است. این روش در حقیقت ترکیبی از دو روش ارائه شده توسط [۲۴] با پنج منبع نوری و حذف دوتای آنها بعنوان سایه و هایلایت و همچنین روش [۲۶] با چهار منبع نوری و حذف یکی از آنها با ارزیابی احتمال تعلق به سایه یا هایلایت می باشد. در این روش با مرتب نمودن شش درجه خاکستری از منابع مختلف نوری روشن ترین پیکسل و تاریک ترین دو پیکسل می توانند پیکسل های محتمل بترتیب حاوی هایلایت و سایه باشند و سه درجه خاکستری باقیمانده بدون مشکل هستند. بنابراین نرمال اولیه توسط سه درجه خاکستری بدون اشکال محاسبه می گردد و درجات خاکستری با احتمال اشکال به مدل اولیه لامبرترین اضافه می شود. بزرگی باقیمانده های مشاهدات اضافی نشان دهنده وجود سایه یا هایلایت می باشد.

۳-۲- تصحیح منبع نور نقطه ای

فرض مدل اولیه فتومتریک استریو ثابت ماندن امتداد منبع نوری برای تمام پیکسل های سطح است. در صورتیکه استفاده از منابع نوری نقطه ای با فاصله نزدیک ناقض آن می باشد (شکل ۲). بنابراین محاسبه بردارهای نرمال با منابع نوری نقطه ای با یک انحنای محدب بسیار نرمی همراه می گردد. برای جلوگیری از این خطا بایستی زاویه فرود هر پرتوی نوری را به هر نقطه از عارضه محاسبه نمود. بنابراین بایستی هم موقعیت شیئی هر منبع نوری نقطه ای و هم فاصله هر نقطه از عارضه تا منبع نوری معلوم باشد. این پارامترها از روش پیشنهادی توسط [۲۷] با کمینه کردن تابع انرژی (۵) طی یک فرایند تکراری محاسبه می شود.

$$\min F(L_k, e_k) = \min \sum \left(I_{ik} - e_k \frac{\rho_i N_i^T (L_k - X_i)}{\|L_k - X_i\|^2} \right)^2 \quad (5)$$

$$X_i = \frac{HZ}{f} [x, y, z]^T$$

که I_{pk} درجه خاکستری هر پیکسل با اندکس i برای هر منبع نوری با اندکس k ، L_k موقعیت منبع نوری، X_p موقعیت شیئی هر پیکسل نسبت به مرکز لنز دوربین، N_p بردار نرمال سطح در هر پیکسل، ρ_p البدوی سطح و e_k

^۱ Inter-reflection

شده است. با اضافه نمودن شش منبع نوری در اطراف دوربین اسکنر سه بعدی سخت افزار این روش ایجاد شده است. شکل (۴) مراحل اندازه گیری توسط اسکنر هوشمند پیشنهادی را نشان می دهد. همچنین شکل (۵) سیستم تلفیقی پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۴- مراحل اندازه گیری و سبک سازی نقاط توسط سیستم پیشنهادی

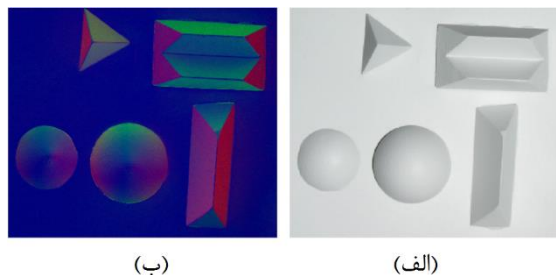
مراحل اندازه گیری به شرح زیر می باشد:

- روش فتومتریک استریو توسط روشن شدن ۶ منبع نوری بطور جداگانه و تصویربرداری همزمان داده خود را اخذ می نماید. سپس بردارهای نرمال توسط داده های بدست آمده محاسبه می گردند.
- از داده های نرمال بدست آمده با استفاده از ماتریس هسین انحنای سطح محاسبه می شود.
- با تعریف یک معیار که فاصله از مدل اصلی متراکم است، پیکسل های تصویر بر اساس انحنای سطح طبقه بندی می گردند.
- در نهایت توسط روش نگاشت فرینج برای نقاطی که توسط داده های انحناء دارای تراکم معین شده است، محاسبه مختصات سه بعدی انجام می شود.
- به منظور تعیین میزان نویز فرکانس بالای اسکنر از یک شیء صفحه ای بسیار دقیق (خروج از صفحه دو میکرون) ابر نقطه متراکم بدست آمده است. ابر نقاط اندازه گیری شده توسط اسکنر فرینج با صفحه ایده آل مقایسه و میزان نویز سیستم اندازه گیری 0.01mm برآورد شده است.

باز بنام PBRT^۱ ارائه شده توسط [۳۲] بهره گرفته شده است که به بازسازی تصویر یک عارضه با استفاده از اطلاعات موقعیت دوربین، منبع نوری و BRDF^۲ می انجامد. بنابراین در معادله (۵) با استفاده از پارامترهای بدست آمده در هر تکرار، دو تصویر مصنوعی حاوی نوردهی مستقیم و نوردهی کلی (حاوی انعکاس داخلی) نیز بازسازی می شود. تفاضل این دو تصویر به تصویر فتومتریک استریو برای هر منبع نوری محاسبه شده اضافه شده تا محاسبه نرمال سطح عاری از خطای انعکاس داخلی باشد (رابطه ۶).

$$I_{knew} = I_k - (R_{gk} - R_{dk}) \quad (۶)$$

در رابطه بالا I_{knew} تصویر واقعی تصحیح شده برای هر منبع نوری با اندکس k ، I_k تصویر واقعی برای هر منبع نوری، R_{gk} تصویر مصنوعی با نوردهی کلی حاوی انعکاس داخلی و R_{dk} تصویر مصنوعی با نوردهی مستقیم بدون انعکاس داخلی می باشد. شکل (۳-ب) تصویر بردار نرمال (n_x, n_y, n_z) برای هر پیکسل را در سه باند RGB نشان می دهد.



شکل ۳- بردار نرمال محاسبه شده. (الف) یکی از تصاویر اخذ شده از شیء آزمون. (ب) بردارهای نرمال هر پیکسل تصویری

۴- اسکنر هوشمند پیشنهادی

سیستم پیشنهادی شامل یک اسکنر اپتیکی مبتنی بر نگاشت فرینج می باشد که بمنظور استخراج ویژگی های هندسی عارضه با روش فتومتریک استریو تلفیق شده است. بدین منظور اسکنر اپتیکی شامل یک دوربین (Canon SX110 و یک پروژکتور (Infocus 600) می باشد که با باز^۳ مشخص ثابت شده است. بمنظور استخراج ویژگی های هندسی سطح عارضه از روش فتومتریک استریو بهره گرفته

^۱ Physically Based Ray-Tracer v2, pbrt.org

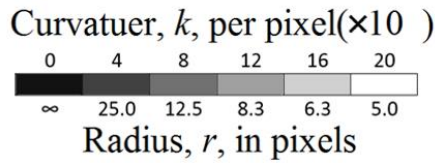
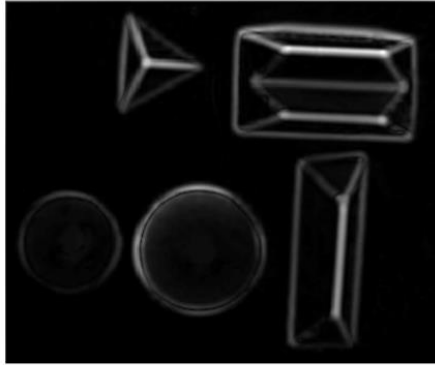
^۲ Bidirectional Reflectance Distribution Function

^۳ Base

کلی سطح که معادل $K = k_1 k_2$ می باشد، مستقیماً از رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$K = \det(C) \cdot K = \frac{1}{(1 + p^2 + q^2)^2} \det(H) \quad (۸)$$

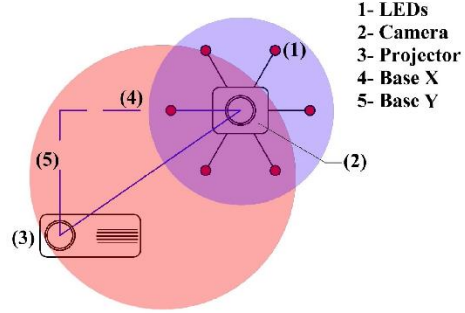
تصویر حاوی انحنای سطوح بدست آمده را در شکل (۶) مشاهده می کنید.



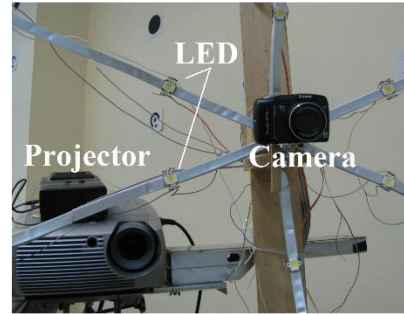
شکل ۶- برآورد انحنای سطوح بدست آمده از داده های نرمال بر سطح

۴-۲- طبقه بندی پیکسل های تصویر استریو با توجه به اطلاعات بدست آمده از روش فتومتریک استریو

توسط مقادیر انحنای سطح بدست آمده در واحد هر پیکسل می توان استراتژی تراکم اندازه گیری بر اساس میزان انحناء تعریف نمود. بنابراین با افزایش انحنای سطح در هر پیکسل تراکم نمونه برداری نیز افزایش یافته و در مقابل سطوح با انحنای کم با فواصل بزرگتری نمونه برداری می شود. از آنجایی که کاهش یا افزایش تراکم در فضای تصویر انجام می شود، کاهش تراکم به حذف منظم پیکسل های تصویر می انجامد. بنابراین سطح اول تراکم همان حداکثر قدرت تفکیک تصویر استریوی دوربین می باشد و سطوح بعدی بترتیب ۵۰ درصد معادل حذف یک در میان پیکسل ها، ۳۳ درصد تراکم معادل حذف دو پیکسل، ۲۵ درصد معادل حذف سه پیکسل و ۱۶ درصد به حذف چهار پیکسل می انجامد. اما سوالی که مطرح است بازه های انحنایی که می توان به آن سطوح تراکم اشاره شده را اختصاص داد بر چه مبنایی تعیین می گردند.



(الف)



(ب)

شکل ۵- پیاده سازی سامانه اسکنر پیشنهادی. (الف) نمای شماتیک اسکنر. (ب) تصویر سامانه پیشنهادی

۴-۱- استخراج ویژگی های هندسی توسط روش فتومتریک استریو

جهت تصمیم گیری برای میزان تراکم نقاط بمنظور محاسبه مختصات سه بعدی نقاط توسط اسکنر نگاهت فرینج از اطلاعات انحنای سطوح که از روش فتومتریک استریو بدست می آید، استفاده می شود. برای محاسبه انحنای سطح روش پیشنهادی توسط [۳۳] استفاده شده است. طبق این روش انحنای اصلی سطح k_1 و k_2 مقادیر ویژه ماتریس C در رابطه (۷) می باشد.

$$C = (1 + p^2 + q^2) - \frac{3}{2} \begin{bmatrix} q^2 + 1 & -pq \\ -pq & p^2 + 1 \end{bmatrix} H. \quad (۷)$$

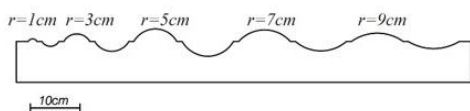
$$H = \begin{bmatrix} p_x & p_y \\ q_x & q_y \end{bmatrix}$$

در رابطه بالا $(p, q, 1)$ مقادیر گرادیان سطح می باشند که از مقادیر نرمال $(n_x/n_z, n_y/n_z, 1)$ بدست آمده از روش فتومتریک استریو محاسبه می شوند. ماتریس هسین^۱ H ماتریس مشتق های جزئی گرادیان در راستای دو محور مختصات می باشد. بنابراین انحنای

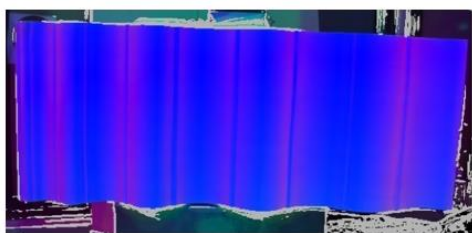
^۱ Hessian



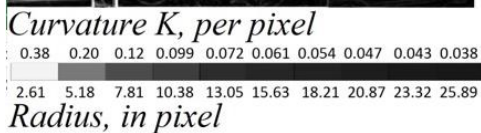
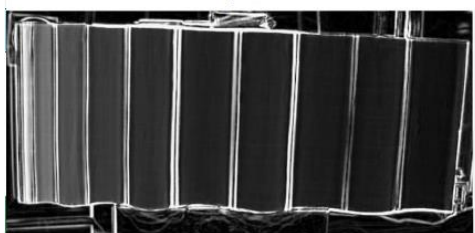
(الف)



(ب)

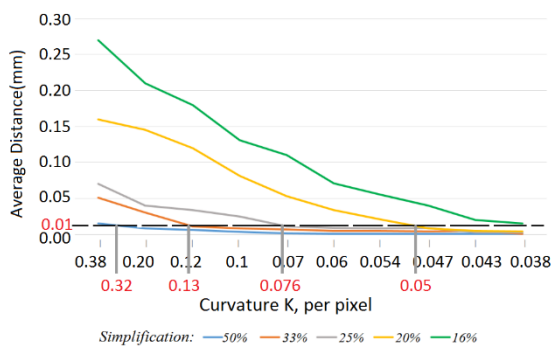


(ج)



(د)

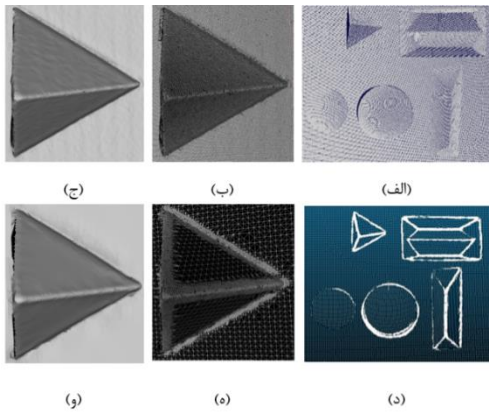
شکل ۷- شیئی با انحناهای مختلف که بصورت تدریجی از چپ به راست کاهش می یابد. (الف) یکی از تصاویر اخذ شده. (ب) مقطع طولی شیئی. (ج) نمایش سه مولفه بردار نرمال سطح در باندهای RGB. (د) تصویر انحنا و شعاع انحنا محاسبه شده بر روش فتومتریک استریو در واحد پیکسل



شکل ۸- نمودار انحنا- فاصله مدل سبک سازی شده از مدل مرجع متراکم بر اساس میزان تراکم تعریف شده. هر رنگ شامل یک سطح سبک سازی است. با کاهش انحنا فاصله مدل سبک شده از مدل متراکم کاهش می یابد

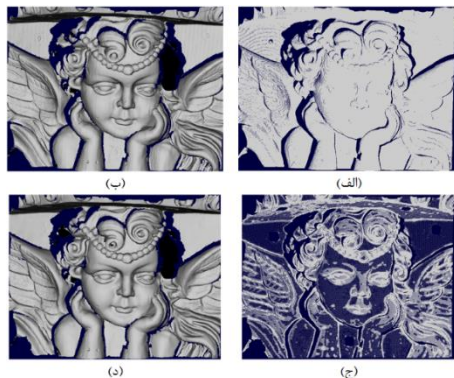
مبنای تعیین بازه های انحنا برای سبک سازی نقاط فاصله میان مدل حاصل از سبک سازی با ابر نقطه متراکم اصلی می باشد. با توجه به مقدار نویز فرکانس بالای سیستم اندازه گیری به میزان 0.01 میلی متر انتظار می رود در صورتیکه مدل سبک سازی شده با مدل متراکم اصلی به همین میزان فاصله داشته باشد، کیفیت مدل نهایی از لحاظ جزئیات حفظ شود. برای تعیین بازه های انحنا بدست آمده توسط روش فتومتریک استریو یک شیئی با انحناهای متوالی از انحنا بسیار بالا تا انحنا بسیار پایین توسط ماشین CNC ساخته شده است (شکل ۷). هدف از ساخت این شیئی پوشش دادن پیوسته بخشی از انحناهای موجود می باشد. از یک سو ساخت تمامی انحناهای موجود بدلیل بینهایت بودن بازه انحنا غیر ممکن است. بنابراین با توجه به محدودیت های سخت افزاری و نیز پوشش هر سطح منحنی با حداقل تعداد پیکسل مورد نیاز جهت تحلیل بازه انحنا $p^{-1} \times [0.038 - 0.38]$ برای انحنا سطوح در نظر گرفته شده است (p واحد پیکسل می باشد). شکل (۷) نموداری را نشان می دهد که شیئی با انحناهای تدریجی در سطوح مختلف سبک سازی شده است. بدین منظور نوارهای متعلق به هر انحنا با یک آستانه گذاری از یکدیگر تفکیک شده و میانگین انحنا (Curvature) آن در محور افقی نمودار قرار گرفته است. هر کدام از نوارها در سطوح تراکم مشخص (۵۰٪-۱۶٪) ساده سازی شده و فاصله میانگین آن (Average Distance) با مدل متراکم اصلی متناظر توسط نرم افزار Cloud Compare محاسبه شده و در محور عمودی قرار گرفته است. هر خط رنگی در نمودار یک سطح از تراکم را نشان می دهد. بعنوان مثال با توجه به خط سبز که تراکم ۱۶٪ می باشد، با کاهش انحنا سطح، فاصله مدل سبک شده از مدل اصلی کاهش می یابد. در صورتیکه فاصله مدل سبک سازی شده نسبت به مدل اصلی متراکم کمتر از 0.01mm در نظر گرفته شود، تقاطع خط افقی سیاه رنگ در شکل (۷) با خطوط رنگی که نماینده سطوح سبک سازی هستند را می توان بعنوان بازه های انحنا برای سبک سازی در نظر گرفت. همانطور که مشاهده می شود برای رسیدن به فاصله مدل نهایی کمتر از 0.01mm، خط مربوط به سطح سبک سازی ۱۶٪ هیچ تقاطعی با خط افقی تعریف شده نداشته و در نتیجه این سطح تراکم از میان بازه های سبک سازی حذف می گردد. اما برای انحناهای بزرگتر از 0.38 تراکم ۱۰۰٪ در نظر گرفته خواهد شد.

و نیز سطح تشکیل شده از آن در شکل (۱۰-و) نشان می دهد که از نظر کیفی و بصری مدل سبک سازی شده با مدل بدست آمده از ابر نقاط متراکم تفاوت چندانی ندارد.



شکل ۱۰- نتایج سبک سازی بر روی شیء آزمون. (الف) ابر نقاط متراکم اولیه، (ب) سطح مثلث بندی شده مربوط به ابر نقاط متراکم در محل هرم، (ج) سطح رندر شده در (ب)، (د) ابر نقاط سبک سازی شده. (ه) سطح مثلث بندی شده مربوط به ابر نقاط سبک شده. (و) سطح رندر شده در (ه)

همچنین روش پیشنهادی بر روی داده های مربوط به یک مجسمه با پیچیدگی های هندسی بسیار مورد آزمون قرار گرفت. حجم اولیه ابر نقاط این شیء ۲۵ مگابایت است که پس از سبک سازی بروش ارائه شده به ۱۱ مگابایت کاهش یافته است. علت افزایش نسبت حجم سبک سازی مجسمه فرشته نسبت به شیء آزمون که دارای سطوح هندسی منظم است را می توان جزئیات بیشتر مجسمه و در نتیجه حفظ بیشتر نقاط عنوان نمود. شکل (۱۱) نتایج حاصل از سبک سازی را نشان می دهد. شکل (۱۲) ارزیابی فاصله ابر نقاط سبک سازی شده با مدل سه بعدی متراکم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در این شیء با هندسه پیچیده فاصله مدل سبک شده با مدل متراکم اصلی 0.011mm برآورد شده است.



شکل ۱۱- نتایج سبک سازی بر روی مجسمه فرشته. (الف) ابر نقاط متراکم اولیه، (ب) سطح مثلث بندی شده مربوط به ابر نقاط متراکم، (ج) ابر نقاط سبک سازی شده، (د) سطح مثلث بندی شده مربوط به نقاط سبک سازی شده

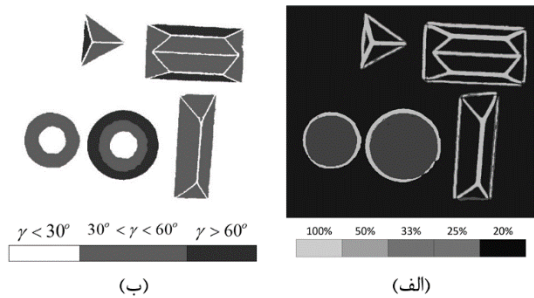
بر اساس بازه های انحنای مشخص شده، پیکسل های تصویر استریوی شیء آزمون با هندسه مشخص در پنج سطح تراکم (۱۰۰٪-۲۰٪) طبقه بندی شده است (شکل ۸-الف).

از آنجایی که فرایند هوشمند کاهش تراکم در هر صحنه اسکن انجام می پذیرد، بدلیل پدیده فشردگی سطوح شیب دار نسبت به محور دید دوربین کم تراکم برداشت می گردند. به عبارت دیگر سطوح شیب دار با انحنای یکسان با تراکم متفاوتی اسکن خواهد شد. برای جبران این کاستی و یکدست نمودن تراکم برای سطوح شیب دار به الگوریتم پیشنهادی یک مرحله طبقه بندی سطح بر اساس شیب اضافه می گردد. بدین منظور پیکسل های تصویر استریو بر اساس کسینوس زاویه شیب طبقه بندی می شود و به تناسب آن به سطوح تراکم بالاتر منتقل می گردد. بنابراین با توجه به شکل (۹) علیرغم انحنای یکسان صفحه زمینه و سطوح هندسی شیء آزمون تراکم نقاط نمونه برداری در دو سطح متفاوت می باشد (رابطه ۹).

$$S_t = \text{round}(S_c \cos \gamma) \quad (9)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(1/\sqrt{p^2 + q^2})$$

که γ زاویه شیب، S_c فاصله نمونه برداری بر اساس انحنای واحد پیکسل و S_t فاصله نمونه برداری نهایی به واحد پیکسل می باشد. نتیجه حاصل از این طبقه بندی در شکل (۹) نشان داده شده است.

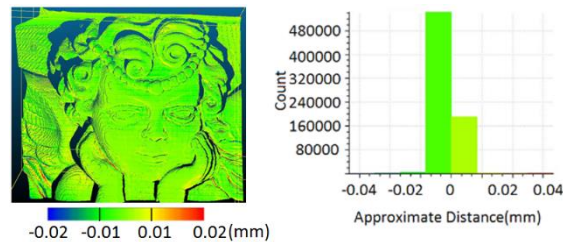


شکل ۹- نتایج حاصل از سبک سازی. (الف) طبقه بندی پیکسل های تصویر بر اساس انحنای سطح. (ب) طبقه بندی پیکسل های تصویر بر اساس زاویه شیب. (ج) سطوح سبک سازی نهایی

۵- ارزیابی نتایج

شکل (۱۰) ابر نقاط با تراکم اصلی و سطح مثلث بندی شده آن را به همراه ابر نقاط سبک سازی شده بر اساس ویژگی های هندسی و نیز سطح تشکیل شده آن را نشان می دهد. ابر نقطه سبک سازی شده با ابر نقطه متراکم مقایسه شده است و مقدار میانگین فاصله مدل 0.01mm می باشد. همانطور که در شکل (۱۰-ه) کیفیت مثلث بندی

نویز فرکانس بالای ابر نقاط حاصل از روش نگاشت فرینج مخلوط نمی شوند. چرا که روش فتومتریک استریو نسبت به نویز فرکانس بالا پایداری بسیار بالایی دارد. همچنین زمان محاسبه نقاط و مدلسازی رویه بواسطه سبک سازی در حین اسکن و پیش از محاسبه، بسته به پیچیدگی شکل بین ۱:۲ تا ۱:۴ زمان اولیه کاهش می یابد و این جبران مناسبی در مواجهه با افزایش تعداد تصاویر و پیچیدگی محاسباتی افزوده شده توسط روش فتومتریک استریو می باشد. علاوه بر این حجم نقاط سبک سازی شده به ۱۸٪ تا ۴۶٪ حجم نقاط کامل کاهش می یابد. اضافه شدن روش فتومتریک استریو تنها به اضافه شدن چند منبع نوری ارزان قیمت می انجامد که هزینه چندانی به سیستم تلفیقی نهایی تحمیل نخواهد نمود. نتایج بدست آمده از فرایند سبک سازی بر روی دو شیئی آزمایشی و مجسمه نشان دهنده کارآمدی روش پیشنهادی در حفظ کیفیت هندسی رویه بازسازی شده (۰/۰۱ میلی متر) را نشان می دهد. از آنجایی که فرایند سبک سازی نقاط در هر منظر اسکن انجام می شود با رجیستر شدن ابر نقاط از منظرهای مختلف ممکن است در نواحی پوشش مشترک به تراکم ابر نقاط افزوده شود. این می تواند به عنوان نقص این روش سبک سازی در نظر گرفته شود و مبنای کارهای آینده قرار گیرد.



شکل ۱۲- ارزیابی نتایج حاصل از سبک سازی نقاط. (الف) ارزیابی فاصله نقاط سبک شده تا مدل سه بعدی متراکم. (ب) فراوانی فاصله بدست آمده در (الف). نقاط روشن تر میزان عدم انطباق را تا ۰/۰۱ میلی متر نشان می دهد

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن بررسی روش های موجود در زمینه سبک سازی ابر نقاط اسکنرهای سه بعدی به ضعف های آنها نیز اشاره گردید. تمامی روش های پیشنهادی تا کنون پس از مراحل اندازه گیری و اسکن اقدام به سبک سازی داده های ابر نقاط پرداخته اند. در حالی که روش پیشنهادی در این مقاله عمل سبک سازی هنگام اندازه گیری و پیش از مرحله محاسبه مختصات سه بعدی بر روی تصویر استریوی دوربین اسکنر اپتیکی انجام می شود. تلفیق روش فتومتریک استریو موجب می گردد تا پیش از انجام محاسبات نقاط بر اساس انحنای سطح طبقه بندی و تراکم نقاط اندازه گیری بر اساس آن تنظیم شود. جزئیات حفظ شده توسط این روش سبک سازی به هیچ وجه با

جدول ۱- نتایج کمی سبک سازی ابر نقاط بر روی دو شیئی آزمون و مجسمه فرشته

نوع عارضه	حجم اولیه (مگابایت)	حجم سبک شده (مگابایت)	زمان محاسبه نقاط متراکم (ثانیه)	زمان محاسبه نقاط سبک شده (ثانیه)	زمان تولید مش متراکم (ثانیه)	زمان تولید مش نقاط سبک شده (ثانیه)	فاصله کمترین مربعات مش سبک شده از نقاط متراکم (میلی متر)
شیئی آزمون	۲۸	۵	۲۷۸	۶۵	۱۵۵	۴۲	۰/۰۱
مجسمه فرشته	۲۴	۱۱	۲۳۰	۱۰۶	۱۵۰	۶۷	۰/۰۱۱

مراجع

- [1] Abzal, A., M. Varshosaz, and M. Saadateseresh. (2011). "Development of a new laser triangulation system based on an optical frame of reference." The Photogrammetric Record, 26(135): PP. 293-306.
- [2] Salvi, J., J. Pages, and J. Batlle. (2004). "Pattern codification strategies in structured light systems." Pattern recognition, 37(4): PP. 827-849.
- [3] S. S. Gorthi and P. Rastogi, "Fringe projection techniques: whither we are?," Optics and lasers in engineering 48, 133-140 (2010).
- [4] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," Optical Engineering 39, 10-22 (2000).

- [5] Z. Li, Y. Shi, C. Wang, and Y. Wang, "Accurate calibration method for a structured light system," *Optical Engineering* 47, 053604-053604-053609 (2008).
- [6] X. Han and P. Huang, "Combined stereovision and phase shifting method: a new approach for 3-D shape measurement," in *Proc. SPIE*, 2009), 73893C.
- [7] S. Zhang and P. S. Huang, "Novel method for structured light system calibration," *Optical Engineering* 45, 083601-083601-083608 (2006).
- [8] Masuda, T. (2004). "Filling the signed distance field by fitting local quadrics." in *3D Data Processing, Visualization and Transmission, 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on.* 2004. IEEE.
- [9] Li, X. (2005). "Geometric property estimation from 3d range data points aided by local quadric surface fitting." in *Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD-CG'05).* IEEE.
- [10] Csákány, P. and A.M. Wallace. (2003). Representation and classification of 3-D objects. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 33(4): PP. 638-647.
- [11] Pauly, M., M. Gross, and L.P. Kobbelt. (2002). "Efficient simplification of point-sampled surfaces." in *Proceedings of the conference on Visualization'02.* IEEE Computer Society.
- [12] Shi, B.-Q., J. Liang, and Q. Liu. (2011). "Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering." *Computer-Aided Design*. 43(8): PP. 910-922.
- [13] Zhang, K., et al. (2015). "A New Kmeans Clustering Algorithm for Point Cloud. space. 8(9).
- [14] Du, X. and Y. Zhuo. (2009). "A point cloud data reduction method based on curvature." in *Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009. CAID & CD 2009. IEEE 10th International Conference on.* IEEE.
- [15] Jiang, H., et al. (2014). "A study and implementation on the data reduction based on the curvature of point clouds." *Compture Modelling & New Technologies*. 18(3): PP. 104-110.
- [16] Dyn, N., A. Iske, and H. Wendland. (2008). "Meshfree thinning of 3D point clouds." *Foundations of computational Mathematics*. 8(4): PP. 409-425
- [17] Wang, Y.-Q., et al. (2013). "A simple point cloud data reduction method based on Akima spline interpolation for digital copying manufacture." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69(9-12): PP. 2149-2159.
- [18] Song, H. and H.-Y. Feng (2008). "A global clustering approach to point cloud simplification with a specified data reduction ratio." *Computer-Aided Design*. 40(3): PP. 281-292.
- [19] Chouychai, B. (2015). "Point cloud data reduction with tangent function method for nurbs curve and surface fitting." in *Knowledge and Smart Technology (KST), 2015 7th International Conference on.* IEEE.
- [20] Turk, G. (1992). "Re-tiling polygonal surfaces." *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 26(2): PP. 55-64.
- [21] Huang, P.S., Q.J. Hu, and F.-P. (2002). "Chiang, Double three-step phase-shifting algorithm." *Applied optics*. 41(22): p. 4503-4509.
- [22] Bouguet, J.-Y. (2004). *Camera calibration toolbox for matlab*.
- [23] Woodham, R.J. (1980). "Photometric method for determining surface orientation from multiple images." *Optical engineering*. 19(1): PP. 191139-191139-.
- [24] Sun, J., et al. (2007). "Object surface recovery using a multi-light photometric stereo technique for non-Lambertian surfaces subject to shadows and specularities." *Image and Vision Computing*. 25(7): PP. 1050-1057.
- [25] Rushmeier, H., G. Taubin, and A. Guézic. (1997). "Applying shape from lighting variation to bump map capture, in *Rendering Techniques' 97.*" Springer. PP. 35-44.
- [26] Barsky, S. and M. Petrou. (2003). "The 4-source photometric stereo technique for three-dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 25(10): PP. 1239-1252.
- [27] Papadimitri, T. and P. Favaro. (2014). "Uncalibrated Near-Light Photometric Stereo." *Proceedings of the British Machine Vision Conference. BMVA Press, September.*
- [28] Herbort, S., D. Schugk, and C. Wöhler. (2013). "3D Reconstruction of Interreflection-affected Surface Concavities using Photometric Stereo." in *VISAPP (2).*
- [29] Liao, M., X. Huang, and R. Yang. (2011). "Interreflection removal for photometric stereo by using spectrum-dependent albedo." in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on.* IEEE.

- [30] Nayar, S.K., K. Ikeuchi, and T. Kanade. (1991). "Shape from interreflections." *International Journal of Computer Vision*. 6(3): PP. 173-195.
- [31] Sohaib, A., et al. (2015). "3D reconstruction of concave surfaces using polarisation imaging." *Journal of Modern Optics*. 62(11): PP. 927-932.
- [32] Pharr, M., W. Jakob, and G. Humphreys. (2016) "Physically based rendering: From theory to implementation." Morgan Kaufmann. Burlington.
- [33] Woodham, R.J. (1994). "Gradient and curvature from the photometric-stereo method, including local confidence estimation." *JOSA A*. 11(11): PP. 3050-3068.