

Applying a statistical constraint to the 3D reconstruction of the un-textured surface's cross-sections using a structured light system consists of two cameras and a planer laser

Mohsen sheikhi¹, Alireza Safdarinezhad^{2*} and Roohollah Karimi³

1- Msc student of Photogrammetry, Tafresh University, Tafresh, Iran

2*- Assistant Professor, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

3- Assistant Professor, Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

¹geo96.sheykhi@tafreshu.ac.ir, ^{2*}safdarinezhad@tafreshu.ac.ir, ³karimi@tafreshu.ac.ir

Corresponding author's address: Department of Geodesy and Surveying Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran, Postal code: 79611-39518, Alireza Safdarinezhad

Abstract

In this paper, a simple structured light system is designed to produce the three-dimensional points cloud from the un-textured surfaces. The system consists of two cameras and a planer laser, in which the 3D contents are produced through the stereo images taken from the light reflected by the intersection of a planer laser and the 3D surface of an object. There was no control over how the laser swept through the surface and the instantaneous parameters of the laser plane were not known in advance. Considering the knowledge of the internal camera calibration parameters and the relative orientation of the stereo-pairs, the video captured by the cameras are normalized during the epipolar re-sampling process. Next, in each pair of simultaneous frames, the matched points located at the 3D section of the laser's plane are then identified. During the simultaneous space intersection of the matched points, a constraint is applied to enforce the singularity of the covariance matrix of 3D points lie in the intersection of the laser's plane and the 3D surface of an object to ensure their co-planarity. By applying this statistical constraint, the precision of the surface 3D reconstruction was improved up to 41% in this structured light system.

Keywords- 3D reconstruction, Structured light systems, Planer laser, Un-textured surfaces, Covariance matrix.

بکارگیری یک قید آماری در تولید مقاطع سه‌بعدی از سطوح بدون بافت به کمک سیستم نور ساختاریافته مبتنی بر دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای

محسن شیخی^۱، علیرضا صفدری‌نژاد^{۲*}، روح‌اله کریمی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

۲- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

۳- استادیار گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

geo96.sheykhi@tafreshu.ac.ir^۱، safdarinezhad@tafreshu.ac.ir^{۲*}، karimi@tafreshu.ac.ir^۳

* نشانی نویسنده مسئول: گروه ژئودزی و مهندسی نقشه برداری دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، کدپستی ۷۹۶۱۱-۳۹۵۱۸، علیرضا صفدری‌نژاد

چکیده

در این مقاله یک سامانه‌ی ساده مبتنی بر تکنیک نور ساختاریافته به منظور تولید ابرنقاط سه‌بعدی از سطوح بدون بافت طراحی و پیشنهاد شده است. این سامانه متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای بوده که در آن برای تولید محتوای سه‌بعدی، از نور بازتاب شده از فصل تقاطع صفحه‌ی لیزر و عارضه‌ی سه‌بعدی، تصاویر استریو اخذ می‌گردد. هیچ‌گونه کنترلی در مورد نحوه‌ی جاروب سطح عارضه توسط لیزر صفحه‌ای وجود نداشته و پارامترهای لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر از قبل مشخص نیست. با معلوم بودن پارامترهای کالیبراسیون داخلی و ارتباط نسبی دوربین‌های استریو، فیلم‌های اخذ شده توسط دوربین‌ها بعد از یافتن فریم‌های همزمان، طی فرایند باز نمونه برداری اپی پلار، نرمال سازی می‌شوند. در ادامه و در هر جفت فریم همزمان، موقعیت نقاط متناظر واقع در یک مقطع سه‌بعدی از عارضه شناسایی می‌گردد. در بازسازی مختصات نقاط واقع شده در هر مقطع سه‌بعدی، یک قید آماری مبتنی بر هم‌صفحگی تمام نقاط واقع در فصل مشترک صفحه‌ی لیزر و عارضه اعمال می‌گردد. این قید با هدف صفر شدن دترمینان ماتریس کواریانس تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در صفحه‌ی لیزر طراحی شده است. بکارگیری این سامانه به همراه قید ذکر شده توانسته دقت بازسازی سطح را در شرایط یکسان اخذ داده تا ۴۱ درصد نسبت به زمان عدم بکارگیری قید ارتقاء بخشد.

واژه‌های کلیدی: بازسازی سه‌بعدی، سیستم نور ساختاریافته، لیزر صفحه‌ای، سطوح بدون بافت، ماتریس کواریانس.

۱- مقدمه

مهمترین چالش در مورد این اشیاء، عدم امکان اجرای موفقیت‌آمیز تکنیک‌های تناظریابی است [۶]. برای غلبه بر این چالش، راهکارهایی مبتنی بر تکنیک‌های نورساختاریافته توسعه یافته است. بطور کلی دو رویکرد: اول، تاباندن بافت به سطوح بدون بافت به کمک ویدئوپروژکتور با هدف تسهیل در فرایند تناظریابی [۵، ۷] و دوم، بکارگیری الگوهای نوری با هندسه‌ی معلوم (صفحه) توسط لیزر با هدف تقاطع یافتن با پرتوهای تصویری [۳، ۴، ۱۰-۸]، راهکارهای مرسوم در این حوزه بشمار می‌روند. در رویکرد اول،

تولید مدل‌های سه‌بعدی از سطوح بدون بافت یک چالش در فرایندهای فتوگرامتری بشمار می‌رود. سطوحی همچون پوست، دیواره‌های باستانی، بدنه‌ی خودرو و هواپیماها را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از سطوح بدون بافت برشمرد که تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق و قابل اعتماد از آن‌ها صرفاً با اخذ تصاویر همپوشان و بکارگیری تکنیک‌های SfM^۱ ممکن نیست [۵-۱].

لحاظ شدن آن موقعیت در معادلات صفحه‌ی لیزر یک چالش در بکارگیری لیزرهای صفحه‌ای در سامانه‌های نورساختاریافته محسوب می‌شود. از سوی دیگر، بواسطه‌ی عواملی همچون، تفاوت در رفتار بازتابی و وضعیت توپوگرافی سطح اشیاء، تفاوت حساسیت رادیومتریکی دوربین‌های تصویربرداری، زاویه‌ی تقاطع صفحه‌ی لیزر با سطح، موقعیت نسبی صفحه‌ی لیزر و دوربین تصویربرداری و فاصله‌ی چشمه‌ی نور لیزر تا شیء، مسئله‌ی یافتن بهترین موقعیت خط لیزر در فضای تصویر را با عدم قطعیت‌های بیشتری روبرو می‌سازد. بدیهی است که عدم تشخیص صحیح موقعیت صفحه‌ی لیزر در فضای تصویر، مستقیماً در فرایند بازسازی سه‌بعدی ناشی از تقاطع صفحات لیزر و پرتوهای تصویری اثرگذار خواهد بود.

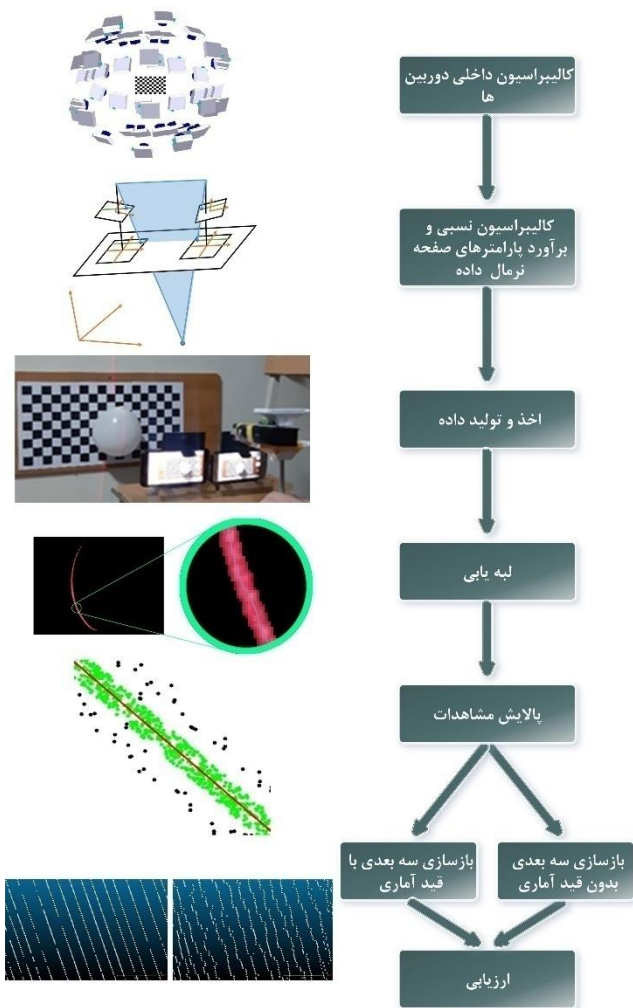
عمده‌ی راهکارهای توسعه‌یافته به‌منظور یافتن بهترین مکان ردّ نور لیزر در فضای تصویر مبتنی بر تکنیک‌های پردازش تصویری بوده است. راهکارهایی همچون یافتن محل بیشینه‌ی شدت نور در باندهای طیفی هم‌رنگ با نور لیزر (سبز یا سرخ) [۱۱]، برازش منحنی^۲ به مقاطع درجات خاکستری در محل رخداد صفحه‌ی لیزر در فضای تصویر [۱۲]، استفاده از تکنیک‌های لبه‌یابی^۳ [۱۳]، بکارگیری عملگرهای ریخت‌شناسی^۴ [۱۴]، [۱۵] و بکارگیری همزمان مقاطع تصاویر مثبت^۵ و منفی^۶ به‌منظور بهبود شناسایی محل لبه‌های تصویری [۱۶]، نمونه‌هایی از راهکارهای توسعه‌یافته به‌منظور یافتن محل مناسب از صفحه‌ی لیزر در فضای تصویر محسوب می‌شوند.

در این مقاله، یک سیستم نورساختاریافته ساده متشکل از دو دوربین فیلم‌برداری با وضعیت نسبی معلوم و یک لیزر صفحه‌ای آزاد در فضا به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از اشیاء بدون بافت طراحی شده است. پارامترهای کالیبراسیون داخلی دوربین [۱۷] و ارتباط نسبی دوربین‌ها از قبل و طی یک فرایند کالیبراسیون میدانی برآورد شده‌اند. با معلوم بودن ارتباط نسبی دوربین‌ها، فیلم‌های اخذشده توسط هر دوربین، نرمال‌سازی (بازنمونه‌برداری اپی‌پلار) می‌شوند. در هنگام فیلم‌برداری، سطح شیء، توسط لیزر صفحه‌ای بدون هیچ محدودیتی توسط کاربر جاروب می‌گردد. فیلم‌های اخذشده به فریم‌های تصویری متناظر تفکیک شده و هر جفت فریم متناظر (بعد از نرمال‌سازی) برای تولید یک مقطع سه‌بعدی از شیء، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر جفت فریم متناظر، فصل تقاطع صفحه‌ی لیزر با شیء در تصاویر دو فریم متناظر ثبت می‌گردد. به‌علت بازنمونه‌برداری اپی‌پلار انتظار می‌رود که نقاط متناظر در هر سطر از یک فریم در همان سطر در فریم دیگر مشاهده شود. بر این اساس، فرایند جستجو به‌منظور یافتن

دانش به هندسه‌ی الگوهای تابیده‌شده ضروری نبوده و این الگوها صرفاً با ایجاد تمایز در محتوای رادیومتریکی مناطق بدون بافت در تصاویر همپوشان، نتایج دقیق‌تری را در فرایند تناظریابی تأمین می‌سازند. اما در رویکرد دوم، از الگوهای ساده‌ای همچون لیزرهای صفحه‌ای برای تولید محتوای سه‌بعدی استفاده می‌شود. این لیزرها قادرند نور را به‌صورت صفحه‌ای و با ضخامت اندک منتشر ساخته که در برخورد با عوارض، سطح مشترک میان صفحه‌ی لیزر و عارضه را نورانی می‌سازند [۳]، [۸]. به‌طور معمول تاباندن نور چنین لیزرهایی به سطوح بدون بافت در یک محیط تاریک انجام‌شده و از الگوی نوری تولیدشده روی سطح سه‌بعدی عوارض تصویربرداری می‌شود.

ازنقطه‌نظر تئوری و در صورت معلوم بودن پارامترهای توجیه خارجی دوربین و پارامترهای هندسی صفحه‌ی لیزر، تقاطع امتداد پرسپکتیو هر نقطه‌ی نورانی ثبت‌شده از عارضه در فضای تصویر با صفحه‌ی لیزر، مختصات سه‌بعدی آن نقطه را در فضای شیء بازسازی می‌نماید [۳]، [۸]. بر این اساس، معلوم بودن پارامترهای هندسی صفحه لیزر بخشی از محتوای لازم به‌منظور بازسازی سه‌بعدی فضای شیء بوده که گاهاً برآورد آن جزئی از فرایند کالیبراسیون یک سیستم نورساختاریافته متشکل از لیزرهای صفحه‌ای را به‌خود اختصاص می‌دهد. از آنجاییکه هر بار تاباندن یک صفحه لیزر، صرفاً امکان تولید محتوای یک مقطع سه‌بعدی از شیء را فراهم می‌آورد؛ از جاروب سطح سه‌بعدی توسط صفحه‌ی لیزر به‌منظور تولید مقاطع سه‌بعدی متعدد و متراکم استفاده می‌شود [۴]. بدیهی است که در چنین شرایطی معلوم بودن پارامترهای لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر در تمامی موقعیت‌های تابش لیزر به‌منظور تولید محتوای سه‌بعدی ضروری خواهد بود. این موضوع مستلزم کالیبراسیون لحظه‌ای پارامترهای صفحه‌ی لیزر بوده که شرایط آن در ساخت یک سامانه‌ی نورساختاریافته به طرق مختلف تأمین می‌گردد. مواردی همچون: اول، وجود صفحات کالیبراسیونی در محیط مدل‌سازی سه‌بعدی و الزام به تابش همزمان صفحه‌ی لیزر به شیء و صفحات کالیبراسیونی در هنگام ثبت تصویر [۳] و دوم، بکارگیری ترکیبی از لیزرهای صفحه‌ای ثابت و متحرک به‌صورت متقاطع [۴]، نمونه‌هایی از راهکارهای توسعه‌یافته در این زمینه محسوب می‌شوند.

ازنقطه‌نظر تئوری، صفحه‌ی لیزر عاری از ضخامت پنداشته می‌شود؛ اما ضخامت لیزرهای صفحه‌ای بافاصله گرفتن از چشمه‌ی نور به‌تدریج افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، حد تفکیک بالا در دوربین‌های عکس‌برداری نیز باعث شده که تصویر ثبت‌شده از صفحه‌ی لیزر با ضخامتی بیش از یک پیکسل ظاهر گردد. به همین جهت، یافتن بهترین مکان نورانی در فضای تصویر به‌منظور



شکل ۱: روند کلی سیستم پیشنهادی

۲-۱- طراحی یک سامانه نور ساختاریافته متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای

در این تحقیق یک سیستم نورساختاریافته ساده به منظور تولید مدل سه بعدی از سطوح بدون بافت طراحی شده است. در این سامانه، برخلاف سامانه‌های مرسوم نورساختاریافته مبتنی بر صفحات لیزر، هیچ قید حرکتی خاصی برای صفحه‌ی لیزر لحاظ نشده است. به عبارت بهتر، در سازوکار طراحی این سامانه، الزامی به مشخص بودن پارامترهای صفحه‌ی لیزر نبوده و کاربر می‌تواند بعد از روشن شدن دوربین‌های استریو، آزادانه به کمک یک لیزر صفحه‌ای، سطح سه بعدی عارضه را جاروب نماید. شکل (۲) ساختار این سامانه‌ی نورساختاریافته را نشان می‌دهد.

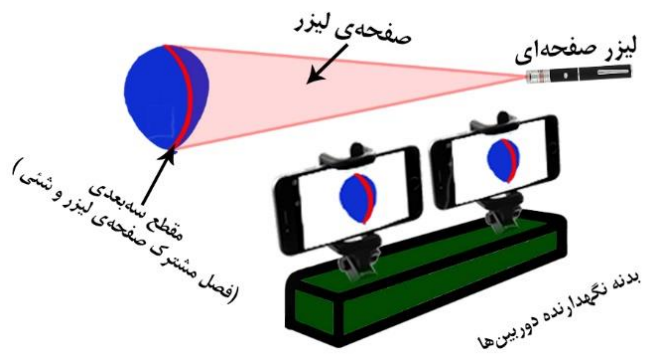
نقاط متناظر در هر جفت فریم به راحتی به ازای هر سطر از تصاویر نرمال شده ممکن خواهد بود. در این سیستم ساده‌ی مبتنی بر نور ساختاریافته، نیازی به دانش لحظه‌ای به پارامترهای هندسی صفحه لیزر نیست. به عبارت بهتر، به علت اخذ تصاویر استریو از شئی و تولید تصاویر باز نمونه برداری شده‌ی اپی پلار، نقش الگوی نوری تابیده شده توسط لیزر، تسهیل فرایند تناظریابی یک بعدی در جفت فریم‌های متناظر خواهد بود. با اینحال، در هر جفت فریم متناظر یک مقطع سه بعدی از سطح عارضه برداشت شده، که از دیدگاه هندسی تمامی موقعیت‌های سه بعدی واقع در آن، در معادله‌ی یک صفحه (صفحه لیزر) صدق خواهند کرد. بر این اساس، اعمال یک قید در فرایند تقاطع فضایی برای تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه بعدی از سطح، جنبه‌ی نوآورانه‌ی این تحقیق در بعد پردازشی محسوب می‌شود.

با این مقدمه، ساختار ارائه‌ی مطالب در این مقاله مشتمل بر چهار بخش بوده که بخش دوم بعد از مقدمه به تشریح روش‌شناسی تحقیق و همچنین روند اجرای آن اختصاص دارد. بخش سوم به ارزیابی‌ها و بحث بر روی نتایج پرداخته و آخرین بخش از مقاله نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی اختصاص دارد.

۲- روش‌شناسی تحقیق

همانطور که در بخش مقدمه بدان اشاره شد، این تحقیق به ساخت و بکارگیری یک سامانه نورساختاریافته اختصاص داشته که از دو دوربین بمنظور اخذ تصاویر استریو و یک لیزر بمنظور جاروب سطح سه بعدی استفاده می‌کند. مهمترین جنبه‌ی نوآورانه‌ی این تحقیق در روند بازسازی سه بعدی بوده که تمامی نقاط واقع شده در یک پروفیل از تقاطع صفحه‌ی لیزر و سطح سه بعدی بطور همزمان و با اعمال یک قید آماری برآورد می‌شوند. با اینحال روند ارائه مطالب در این بخش مبتنی بر اجرای گام به گام ساخت، کالیبراسیون، اخذ و پالایش داده و همچنین اعمال قید آماری تدوین شده است. شکل (۱) روندنمای کلی فرایند کالیبراسیون، تولید مدل سه بعدی و ارزیابی در این تحقیق را نشان می‌دهد. ساختار ارائه مطالب در این بخش متشکل از ۴ زیربخش بوده که در ابتدا، چگونگی طراحی و ساخت سامانه نور ساختاریافته و همچنین روند کالیبراسیون آن (داخلی، خارجی و تولید تصاویر نرمال) تشریح شده است (بخش ۲-۱). در بخش (۲-۲) روند اندازه‌گیری نقاط متناظر در جفت فریم‌های متناظر تشریح شده و بخش (۲-۳) به تشریح روند بازسازی سه بعدی در دو حالت مقید و نامقید اختصاص دارد. در آخرین بخش نیز روند پالایش مشاهدات قبل از بکارگیری در روند بازسازی سه بعدی تشریح شده است.

بعد از قرارگیری دو دوربین در بدنه دستگاه و با معلوم بودن پارامترهای ارتباط نسبی آن‌ها، تولید تصاویر اپی‌پلار در دستورکار خواهد بود. باز نمونه‌برداری اپی‌پلار به فرایندی اطلاق شده که طی آن به کمک تبدیلات پروجکتیو دوبعدی، تصاویر استریوی اولیه به نسخه‌ی پالایش شده‌ای تبدیل می‌گردند. برخی از ویژگی‌های هندسی تصاویر اپی‌پلار (نرمال‌شده) شامل: اول، موازی بودن خطوط اپی‌پلار، دوم، توازی محورهای اصلی تصاویر نرمال‌شده، سوم، موازی شدن محور x سیستم‌مختصات عکس‌های نرمال‌شده با محور باز عکسی بین دوربین‌ها، چهارم، هم‌مقیاس شدن تصاویر نرمال‌شده و پنجم، عدم وجود نقاط تقاطع میان صفحات عکسی نرمال‌شده با محور باز عکس برداری (اپی‌پل)، می‌باشند [۲۰، ۲۱]. شکل (۳) هندسه‌ی تشکیل تصاویر نرمال‌شده را در یک زوج تصویر استریو نشان می‌دهد.

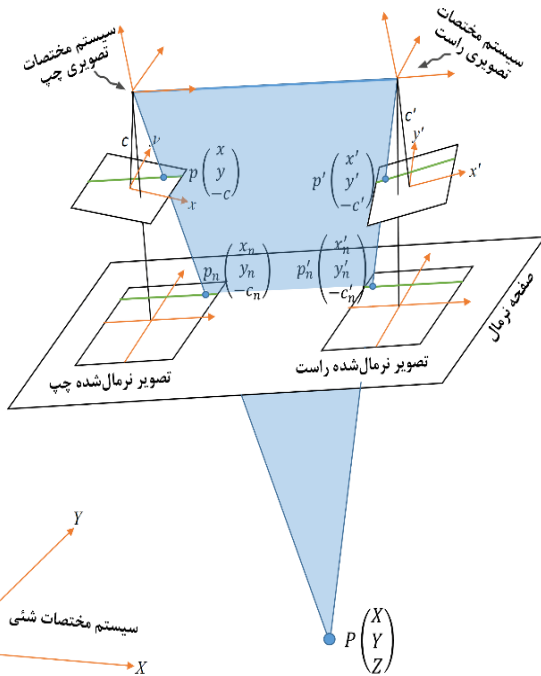


شکل ۲: ساختار سامانه نور ساختاریافته متشکل از دو دوربین ثابت و یک لیزر صفحه‌ای آزاد

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، اجزای سخت‌افزاری این سامانه متشکل از دو دوربین تصویربرداری، یک بدنه به‌منظور ثابت نگاه‌داشتن دوربین‌ها و یک لیزر صفحه‌ای است. کاربرد در این سیستم نور ساختاریافته در هر لحظه با جهت‌گیری دلخواهی، صفحه‌ی لیزر را به سطح شیئی تابانده و فصل مشترک صفحه‌ی لیزر و شیئی را نورانی می‌سازد. تصویر این فصل مشترک، توسط دو دوربین ثبت می‌گردد. به‌منظور تأمین نرخ بالا در اخذ تصاویر استریو، از دوربین‌های فیلم‌برداری بجای دوربین‌های عکس‌برداری استفاده شده است. چنین سامانه‌های نور ساختاریافته‌ای بطور معمول در تولید مدل‌های سه‌بعدی از عوارض پایدار و بدون حرکت استفاده می‌شوند.

در این سامانه، از دوربین‌های تلفن همراه برای اخذ فیلم استفاده شده است. تأمین توان تفکیک مکانی مشابه در دوربین‌های انتخاب شده، امکان ثابت کردن فوکوس در تنظیمات داخلی دوربین و امکان فیلم‌برداری با 7 fps نسبتاً یکسان، الزامات فنی انتخاب و تنظیم دوربین‌ها در این سامانه‌ی نور ساختاریافته می‌باشند. پارامترهای هندسه‌ی داخلی هر دوربین در این سامانه، منفرداً از طریق یک میدان آزمون تارگت‌گذاری شده و به‌کمک فرایند خودکالیبراسیون^۸ برآورد می‌شود [۱۷]. برای این روند از صفحات کالیبراسیون شطرنجی و محیط نرم‌افزاری Australis Ver. 6.06 استفاده شده است [۱۸].

بعد از کالیبراسیون داخلی هر یک از دوربین‌ها، هر دو دوربین در یک بدنه‌ی از پیش ساخته شده نسبت به یکدیگر ثابت می‌شوند. در ادامه، مجدداً با اخذ تصاویر همزمان از یک میدان آزمون تارگت‌گذاری شده، پارامترهای ارتباط نسبی دو دوربین به‌کمک فرایند توجیه‌نسبی دوطرفه (توجیه نسبی متشکل از ۵ پارامتر دورانی بین دو دوربین) برآورد می‌شود [۱۹]. با معلوم بودن فاصله‌ی میان نقاط تارگت‌گذاری شده، فاصله‌ی باز دو دوربین نیز با هدف تولید محتوای سه‌بعدی هم‌مقیاس با فضای شیئی، تنظیم می‌گردد.

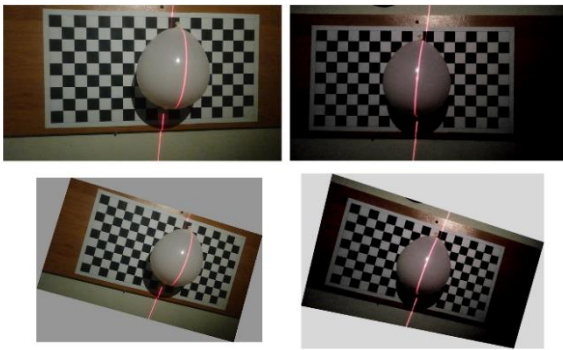


شکل ۳: هندسه تولید تصاویر نرمال

با مبنا قرار دادن معادله‌ی شرط هم‌خطی به‌عنوان رابطه‌ی متریک و هندسی ارتباط سه‌بعدی فضای شیئی و تصویر (رابطه‌ی ۱)، ارتباط هندسی میان یک تصویر نرمال‌شده با تصویر خام متناظر از طریق رابطه‌ی (۲) برقرار می‌گردد [۲۰، ۲۲].

$$F = \begin{bmatrix} x - x_0 + \Delta x + c \frac{r_{1,1}(X - X_0) + r_{1,2}(Y - Y_0) + r_{1,3}(Z - Z_0)}{r_{3,1}(X - X_0) + r_{3,2}(Y - Y_0) + r_{3,3}(Z - Z_0)} \\ y - y_0 + \Delta y + c \frac{r_{2,1}(X - X_0) + r_{2,2}(Y - Y_0) + r_{2,3}(Z - Z_0)}{r_{3,1}(X - X_0) + r_{3,2}(Y - Y_0) + r_{3,3}(Z - Z_0)} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، بردار موقعیت سه‌بعدی یک نقطه در فضای تصویر، (x_0, y_0) بردار موقعیت دوبعدی مرکز تصویر در سیستم‌مختصات عکسی نسبت به مرکز ماتریس تصویر، $(\Delta x, \Delta y)$ بردار تصحیحات اعمال شده به موقعیت نقاط در فضای تصویر



شکل ۴: نمونه‌ای از جفت فریم متناظر دوربین چپ (تصویر سمت چپ تصویر خام و تصویر سمت راست تصویر نرمال شده است.)

مطابق با هندسه‌ی تصاویر استریو، در صورت معلوم بودن پارامترهای نسبی دو دوربین، موقعیت متناظر مرتبط با هر نقطه در یک تصویر را می‌توان در خط اپی‌پلار آن نقطه در فضای تصویر دوم یافت. با موازی شدن خطوط اپی‌پلار در تصاویر نرمال شده، این خطوط هم‌راستا با چیدمان سطوح‌های تصویری می‌شوند [۲۲]. بنابراین جستجو به منظور یافتن عوارض متناظر به یک جستجوی یک بعدی در راستای سطوح‌های متناظر تصاویر نرمال شده تبدیل می‌گردد.

برای فیلم‌برداری در سیستم نورساختاریافته پیشنهادی یک محیط تاریک توصیه می‌شود. محیط تاریک تمایز بالاتری میان نور بازتابی از لیزر و پس‌زمینه به وجود آورده و نسبت سیگنال به نویز بالاتری را به منظور آشکارسازی محل نور لیزر در فضای تصویر تأمین می‌سازد. بعد از تولید جفت فریم‌های هم‌زمان نرمال شده، یافتن نقاط متناظر حاصل از تقاطع صفحه‌ی لیزر با سطح سه‌بعدی شی در دستورکار قرار دارد. به ازای هر سطر از یک تصویر نرمال شده، سطری متناظر در تصویر نرمال شده‌ی دوم از جفت فریم‌های هم‌زمان وجود داشته که این موضوع امکان یافتن نقاط متناظر از صفحه‌ی لیزر را به ازای هر سطر از تصاویر استریو فراهم می‌آورد. برای یافتن نقاط متناظر صفحه‌ی لیزر در تصاویر نرمال شده ابتدا این نواحی به کمک آستانه‌گذاری رنگی در فضای HSI شناسایی می‌شوند. تمایز رنگی نور لیزر و پس‌زمینه‌ی تاریک چالش زیادی برای این فرایند به وجود نمی‌آورد. بعد از یافتن پهنه‌ی نوری مربوط به لیزر در تصاویر، جستجو به منظور یافتن یک زوج نقطه‌ی متناظر به ازای هر سطر متناظر از تصاویر استریو انجام می‌پذیرد. در این مرحله، هر سطر از یکی از تصاویر استریو از حیث وجود نور لیزر بررسی شده و در صورت شناسایی آن، مختصات تصویری یک نقطه از پیکسل‌های متأثر از نور لیزر (موقعیت نقطه‌ی توأم با بیشینه‌ی روشنی در باند هم‌رنگ با لیزر) در آن تصویر ثبت می‌گردد. برای تعیین موقعیت نقطه‌ی متناظر در تصویر دوم، سطر متناظر کاوش می‌شود. در تصویر دوم نیز موقعیت بیشینه‌ی روشنی در باند

به منظور کاهش و یا حذف اثر خطاهای سیستماتیک تصویر (اعوجاجات شعاعی، مماسی و ...)، مقادیر r_{ij} عناصر ماتریس دوران سه‌بعدی بین فضای زمین و تصویر $(R_{\omega, \varphi, \kappa})$ ، $[X, Y, Z]^T$ مختصات سه‌بعدی نقطه در فضای شی و $[X_o, Y_o, Z_o]^T$ نیز مختصات مرکز تصویر در سیستم مختصات شی می‌باشند.

$$x = -c \frac{m_{1,1}x_n + m_{1,2}y_n - m_{1,3}c_n}{m_{3,1}x_n + m_{3,2}y_n - m_{3,3}c_n} - \Delta x + x_o \quad (2)$$

$$y = -c \frac{m_{2,1}x_n + m_{2,2}y_n - m_{2,3}c_n}{m_{3,1}x_n + m_{3,2}y_n - m_{3,3}c_n} - \Delta y + y_o$$

در رابطه‌ی (۲)، $[x_n, y_n, -c_n]^T$ مختصات یک نقطه در فضای تصویر نرمال شده متناظر با $[x, y, -c]^T$ در فضای تصویر خام و m_{ij} درایه‌های ماتریس دوران سه‌بعدی $M = R_{\omega, \varphi, \kappa} \times R_{\omega_n}^T$ می‌باشند [۲۱، ۲۲]. در رابطه‌ی M ماتریس‌های R_{ω_n} و $R_{\omega, \varphi, \kappa}$ به ترتیب ماتریس دوران متشکل از پارامترهای دورانی دوربین $(\omega, \varphi, \kappa)$ و تصویر نرمال $(\omega_n, \varphi_n, \kappa_n)$ می‌باشند.

با در نظر گرفتن مبانی تئوری تولید تصاویر نرمال شده، مختصات مراکز تصویر نرمال شده در فضای شی منطبق با موقعیت مراکز تصویر خام متناظر است (شکل ۳). به عبارت بهتر، تنها پارامترهای دورانی این تصاویر با تصاویر خام متفاوت خواهد بود. از سوی دیگر، بکارگیری راهکار توجیه نسبی دو طرفه در برآورد پارامترهای نسبی، منجر به تخمین مقادیر صفر برای پارامترهای دورانی φ_n و κ_n در تصاویر نرمال شده می‌شود. به همین جهت پارامترهای دورانی تصاویر نرمال شده صرفاً محدود به دوران ω_n خواهد بود. مقدار پارامتر ω_n معادل متوسط مقدار بدست آمده برای این پارامتر در نتایج توجیه نسبی دو دوربین است [۲۰].

۲-۲- سازوکار یافتن نقاط متناظر در جفت فریم‌های متناظر

پس از اخذ داده از سیستم نور ساختاریافته معرفی شده در بخش (۲-۱)، فیلم‌های بدست آمده به جفت فریم‌های هم‌زمان تفکیک می‌شوند. نرخ بالا در تصویربرداری امکان تولید جفت فریم‌های متناظر را با فواصل زمانی اندک فراهم آورده و این موضوع هنگام جاروب سطح توسط لیزر صفحه‌ای، امکان ثبت تصویر از مقاطع متراکم و نزدیک به یکدیگر را از سطح عارضه فراهم می‌آورد. شکل (۴) نمونه‌ای از یک جفت فریم هم‌زمان را در دو حالت خام و نرمال شده نشان می‌دهد.

واقع در یک مقطع سه‌بعدی، توأم با قید هم‌صفحه بودن آن‌ها، پیشنهاد شده است. به عبارت بهتر، بجای محاسبه مختصات سه‌بعدی هر نقطه‌ی متناظر از طریق تشکیل یک دستگاه معادلات تقاطع فضاییمجزا، به ازای تمامی نقاط متناظر یافت شده در یک جفت فریم همزمان، یک دستگاه معادلات برای محاسبه مختصات تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی تشکیل می‌گردد. با در نظر گرفتن رابطه‌ی (۳) به‌عنوان فرم خطی‌سازی شده معادلات شرط هم‌خطیتصاویر استریو نسبت به مختصات سه‌بعدینقطه‌ی نام در فضای شئی، دستگاه معادلات غیرخطی مربوط به برآورد همزمان تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی از شئی به‌صورت رابطه‌ی (۴) خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} F_i \\ F'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{oi} \\ F'_{oi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X_i} & \frac{\partial F}{\partial Y_i} & \frac{\partial F}{\partial Z_i} \\ \frac{\partial F'}{\partial X_i} & \frac{\partial F'}{\partial Y_i} & \frac{\partial F'}{\partial Z_i} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta X_i \\ \delta Y_i \\ \delta Z_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= [dl_i]_{4 \times 1} + [b_i]_{4 \times 3} \times [\delta_i]_{3 \times 1} = 0$$

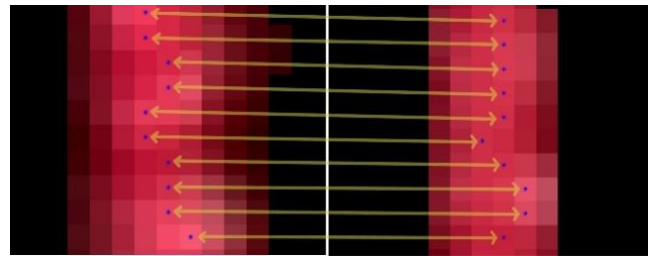
در رابطه‌ی (۳) F_i و F'_i به ترتیب معادلات شرط هم‌خطی مربوط به نقطه‌ی نام در تصاویر اول و دوم از یک جفت فریم همزمان می‌باشند (رابطه‌ی (۱)). b_i ماتریس ضرایب مجهولات (مشتقات جزئی معادلات شرط هم‌خطی نسبت به مختصات نقطه‌ی نام در فضای شئی)، بردار تصحیح مجهولات (مختصات سه‌بعدی نقطه‌ی نام در فضای شئی) و dl_i بردار اختلافات میان مشاهدات تصویری نقطه‌ی نام و مقادیر تابع شرط هم‌خطی به ازای مقادیر مجهولات نقطه‌ی نام می‌باشند.

$$\begin{bmatrix} dl_1 \\ dl_2 \\ \vdots \\ dl_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & \dots & 0 \\ & b_2 & \dots & \vdots \\ & & \ddots & 0 \\ sym. & & & b_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = dL + B \times \Delta = 0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴) B ، ماتریس ضرایب مجهولات همزمان تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی از عارضه، n تعداد نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی، Δ بردار مجهولات همزمان تمامی نقاط و dL بردار اختلافات میان مشاهدات تصویری و مقادیر تابع شرط هم‌خطی به ازای مقادیر تمامی مجهولات همزمان می‌باشند.

دستگاه معادلات رابطه‌ی (۴) غیرخطی بوده و در روند تکرار به همگرایی می‌رسد. حل مستقل نتایج تقاطع فضایی به ازای هر نقطه از مقطع سه‌بعدی (رابطه‌ی ۳) و یا بکارگیری رویکرد همزمان در برآورد پارامترهای مجهول (رابطه‌ی ۴) تأثیری در مقادیر مجهول برآورد شده نخواهد داشت. در این مقاله، بکارگیری یک معادله‌ی قید جدید باهدف مقید ساختن روند برآورد مختصات نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی، در مکان هندسی یک صفحه،

همرنگ با لیزر به‌عنوان نقطه‌ی متناظر انتخاب می‌شود. شکل (۵) نمونه‌ای از نقاط متناظر واقع در صفحه‌ی لیزر در یک جفت فریم همزمان را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمونه‌ای از نقاط متناظر واقع در صفحه‌ی لیزر در یک جفت فریم چپ و راست

به ازای هر جفت نقطه‌ی متناظر در تصاویر استریو و معلوم بودن پارامترهای توجیه نسبی تصاویر نرمال‌شده، می‌توان موقعیت سه‌بعدی متناظر در فضای شئی را به کمک فرایند تقاطع فضایی محاسبه نمود. دستگاه معادلات غیرخطی مرتبط با فرایند تقاطع فضایی، به ازای هر جفت نقطه‌ی متناظر متشکل از ۴ معادله‌ی شرط هم‌خطی و ۳ مجهول مختصات در فضای شئی می‌باشد [۲۳].

۲-۳- تقاطع یافتن همزمان تمام نقاط واقع در یک مقطع از صفحه لیزر

پارامترهای صفحه‌ی لیزر در سیستم نور ساختاریافته پیشنهادی مشخص نبوده و نقش آن صرفاً تسهیل فرایند جستجویه‌منظور یافتن نقاط متناظر در تصاویر استریو است. در این فرایند می‌توان از لبه‌های رنگی تولیدشده توسط ویدئوپروژکتور نیز بجای صفحه‌ی لیزر استفاده نمود. استفاده از لیزرهای صفحه‌ای به‌واسطه‌ی آزادی عمل بیشتر در مقایسه با ابعاد و حجم ویدئوپروژکتور ترجیح‌پذیر می‌باشند.

هرچند که در فرایند پیشنهادشده، لیزر صفحه‌ای نقش تسهیل‌کننده برای شناسایی نقاط متناظر را در تصاویر استریو برخوردار است؛ اما تمامی نقاط سه‌بعدی واقع در یک مقطع سه‌بعدی، همگی در مکان هندسی صفحه‌ی لیزر واقع می‌شوند. به عبارت بهتر، هرچند که پارامترهای هندسی و لحظه‌ای صفحه‌ی لیزر در این سیستم نور ساختاریافته معلوم نیست؛ اما قید قرار داشتن تمامی نقاط واقع در هر مقطع سه‌بعدی در یک صفحه‌محصربفرد، شرایط هندسی حاکم بر این فرایند است. عدم قطعیت‌های مرتبط با انتخاب نقاط متناظر در فرایند پردازشی بخش (۲-۲)، احتمال هم‌صفحه نبودن مختصات‌های سه‌بعدی تولیدشده‌به‌صورت منفرد را افزایش می‌دهد. در این مقاله ایده‌ی تشکیل دستگاه معادلات همزمان تقاطع فضایی برای تمامی نقاط

برای هر سه نقطه واقع در مقطع سه بعدی یک معادله ی قید مبنی بر هم صفحه بودن قابل نگارش است؛ اما در صورتیکه بین معادلات قید از نقاط مشترک استفاده نشود؛ تأمین هم صفحه گی تمامی نقاط واقع در مقطع سه بعدی دچار اختلال می گردد. بر این اساس، وجود نقاط مشترک در قیود هم صفحه گی تضمین کننده ی قرارگیری تمامی نقاط سه بعدی در یک صفحه واحد خواهد بود. در چنین شرایطی هم صفحه ساختن تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه بعدی مستلزم بکارگیری تعداد زیادی قید در ساختار دستگاه معادلات مرتبط با حل کمترین مربعات بوده که معادله ی پیشنهادی صرفاً با اعمال یک قید پتانسیل انجام آن را برخوردار است.

معادله ی ارائه شده در رابطه ی (۶) نسبت به مختصات نقاط سازنده ی آن غیرخطی بوده و برای بکارگیری در ساختار معادلات کمترین مربعات مفید، نیازمند خطی سازی است. رابطه ی ۷ فرم خطی این رابطه را نشان می دهد.

$$|C| = |C_0| + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial |C|}{\partial X_i} \frac{\partial |C|}{\partial Y_i} \frac{\partial |C|}{\partial Z_i} \right] \times \begin{bmatrix} \delta X_i \\ \delta Y_i \\ \delta Z_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= |C_0| + [D]_{k \times 3n} \times \Delta = 0$$

در رابطه ی (۷)، $|C_0|$ دترمینان ماتریس کواریانس مقادیر اولیه و مجهول از مختصات نقاط واقع در مقطع سه بعدی، $\frac{\partial |C|}{\partial Y_i}$ و $\frac{\partial |C|}{\partial X_i}$ نیز به ترتیب مشتقات جزئی دترمینان ماتریس کواریانس نسبت به نقطه ی نام می باشند. بردار D شامل تمامی مشتقات جزئی مربوط به تمامی مختصات های سه بعدی واقع در یک مقطع سه بعدی است. بردار Δ مشابه نام گذاری در رابطه ی (۴) شامل تصحیح تمامی مقادیر مجهولات است. مشتقات جزئی رابطه ی (۶) نسبت به هر یک از مؤلفه های مختصاتی نقاط بعد از ساده سازی به صورت رابطه ی (۸) خواهند بود.

$$\frac{\partial |C|}{\partial X_i} = \frac{2}{n} (X_i - \bar{X}) \sigma_y^2 \sigma_z^2 + \frac{2}{n} [(Y_i - \bar{Y}) \sigma_{xz} + (Z_i - \bar{Z}) \sigma_{xy}] \sigma_{yz} - \frac{2}{n} (X_i - \bar{X}) \sigma_{yz}^2 - \frac{2}{n} (Z_i - \bar{Z}) \sigma_y^2 \sigma_{xz} - \frac{2}{n} (Y_i - \bar{Y}) \sigma_x^2 \sigma_{yz}^2$$

$$\frac{\partial |C|}{\partial Y_i} = \frac{2}{n} (Y_i - \bar{Y}) \sigma_x^2 \sigma_z^2 + \frac{2}{n} [(X_i - \bar{X}) \sigma_{yz} + (Z_i - \bar{Z}) \sigma_{xy}] \sigma_{xz} - \frac{2}{n} (Y_i - \bar{Y}) \sigma_{xz}^2 - \frac{2}{n} (Z_i - \bar{Z}) \sigma_x^2 \sigma_{yz} - \frac{2}{n} (X_i - \bar{X}) \sigma_y^2 \sigma_{xz}^2$$

$$\frac{\partial |C|}{\partial Z_i} = \frac{2}{n} (Z_i - \bar{Z}) \sigma_x^2 \sigma_y^2 + \frac{2}{n} [(X_i - \bar{X}) \sigma_{yz} + (Y_i - \bar{Y}) \sigma_{xz}] \sigma_{xy} - \frac{2}{n} (Z_i - \bar{Z}) \sigma_{xy}^2 - \frac{2}{n} (Y_i - \bar{Y}) \sigma_x^2 \sigma_{yz} - \frac{2}{n} (X_i - \bar{X}) \sigma_y^2 \sigma_{xz}^2$$

تمامی پارامترهای این روابط قبلاً معرفی شده اند.

جنبه ی نوآورانه ی فرایند تقاطع فضایی همزمان را به خود اختصاص می دهد.

از نقطه نظر تئوری، ماتریس کواریانس نقاط سه بعدی واقع در یک صفحه، حاوی یک مقدار ویژه ی صفر خواهد بود [۲۴، ۲۵]. به عبارت بهتر، انتظار می رود که در صورتیکه تمامی نقاط واقع در یک مقطع سه بعدی در مکان هندسی صفحه ی لیزر قرار داشته باشند؛ ماتریس کواریانس آن ها حداقل یک کمبود در رتبه را برخوردار باشد. بدیهی است که در صورتیکه مقطع سه بعدی بر مکان هندسی یک خط سه بعدی قرار داشته باشد؛ فقدان رتبه ی ماتریس کواریانس به مقدار عددی ۲ ارتقاء خواهد یافت. بر این اساس، قید بکارگرفته شده در روند برآورد موقعیت های سه بعدی (رابطه ی ۴)، صفر شدن دترمینان ماتریس کواریانس مختصات های سه بعدی واقع در یک مقطع سه بعدی از عارضه است.

با در نظر گرفتن $[X_i, Y_i, Z_i]^T, i=1,2,\dots,n$ به عنوان تمامی موقعیت های سه بعدی واقع در یک مقطع سه بعدی و $[\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}]^T$ به عنوان بردار مرکز ثقل نقاط سه بعدی واقع در مقطع سه بعدی، ماتریس کواریانس موقعیت های سه بعدی از رابطه ی (۵) قابل محاسبه خواهد بود.

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} X_i - \bar{X} \\ Y_i - \bar{Y} \\ Z_i - \bar{Z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_i - \bar{X} & Y_i - \bar{Y} & Z_i - \bar{Z} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{bmatrix}$$

(۵)

در رابطه ی (۵)، $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ به ترتیب واریانس های X, Y, Z بوده و $\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ کواریانس های دوجه دوی مؤلفه های مختصاتی می باشند. معادله ی قید بکارگرفته شده (صفر شدن دترمینان رابطه ی ۵) پس از ساده سازی به صورت رابطه ی (۶) خواهد بود.

$$|C| = \sigma_x^2 \sigma_y^2 \sigma_z^2 + 2\sigma_{xy} \sigma_{xz} \sigma_{yz} - \sigma_x^2 \sigma_{yz}^2 - \sigma_y^2 \sigma_{xz}^2 - \sigma_z^2 \sigma_{xy}^2 = 0 \quad (6)$$

در رابطه ی (۶)، $|C|$ نماد عملگر دترمینان می باشد. با صفر شدن رابطه ی (۶)، ماتریس کواریانس (رابطه ی ۵) کمبود رتبه پیدا کرده و برای تأمین چنین شرایطی می بایست موقعیت نقاط واقع در مقطع سه بعدی در مکان هندسی یک صفحه قرار گیرند. از مزایای بکارگیری چنین معادله ای، تحمیل برآورد مختصات نقاط سه بعدی در یک صفحه صرفاً با بکارگیری یک قید قطعی در حل دستگاه معادلات کمترین مربعات می باشد. راهکار جایگزین برای تأمین چنین قیدی، هم صفحه لحاظ نمودن زیرمجموعه های سه عضوی از نقاط واقع در مقطع سه بعدی خواهد بود. به عبارت بهتر،

ونرمال بر صفحه برازش یافته به نقاط سه‌بعدی واقع در هر مقطع سه‌بعدی، فاصله قائم هر نقطه‌ی سه‌بعدی از صفحه بکمک رابطه‌ی (۱۰) قابل محاسبه خواهد بود.

$$d_i = [X_i - \bar{X}, Y_i - \bar{Y}, Z_i - \bar{Z}] \times \vec{V}_3 \quad (10)$$

در رابطه‌ی (۱۰)، $[X_i, Y_i, Z_i]$ بردار مختصات سه‌بعدی نقطه‌ی i ام و $[\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}]$ نیز مختصات مرکز ثقل تمامی نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی می‌باشند.

بعد از محاسبه‌ی فاصله d_i برای تمامی نقاط، نقاطی که فاصله‌ی آنها بیش از ۱/۵ برابر متوسط فاصله‌ی میانگین تمامی نقاط هستند شناسایی و حذف می‌گردند. این حدآستانه بصورت تجربی انتخاب شده است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش عملکرد سامانه‌ی نور ساختاریافته پیشنهادی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ارزیابی‌های کمی و کیفی این بخش از نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی سطح یک بادکنک، یک توپ پلاستیکی و یک مجسمه گچی استفاده شده است. در دسترس بودن، سطح صیقلی و بدون اغتشاش، پیوستگی هندسی سطح و همچنین امکان برازش مدل‌های ریاضی را می‌توان از دلایل انتخاب بادکنک در روند ارزیابی در نظر داشت. توپ پلاستیکی به دلیل مشخص بودن مدل ریاضی سطح (کره) و مجسمه گچی نیز با هدف مقایسه‌ی بصری نتایج انتخاب شده‌اند.

بطور کلی روند ارزیابی نتایج در این بخش از سه آزمون متفاوت تشکیل شده است. در آزمون نخست، نمایش ضرورت بکارگیری سامانه‌های نورساختاریافته بجای روش‌های SfM در مورد اشیاء بدون بافت در دستورکار قرار دارد. آزمون دوم از مقاله به مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی مقید و نامقید اختصاص داشته و آخرین آزمون نیز به مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با روند مستقل تولید ابرنقطه بکمک تکنیک‌های SfM می‌پردازد.

در اولین آزمون، سطح یک عارضه‌ی بدون بافت به کمک روش SfM در محیط نرم‌افزار AgiSoft Metashape.Pro.1.5.2 و از طریق ۴۴ تصویر همپوشان مدل‌سازی شده است. نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده و مدل تولیدشده به کمک این نرم‌افزار در شکل (۶) ارائه شده است.

قید ارائه‌شده در رابطه‌ی (۷) به صورت دستگاه معادلات رابطه‌ی (۹) در فرایند تقاطع فضایی همزمان نقاط واقع در یک مقطع سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{bmatrix} \Delta \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^T B & -D^T \\ D & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -B^T dL \\ -|C_0| \end{bmatrix} \quad (9)$$

دستگاه معادله‌ی ارائه‌شده در رابطه‌ی (۹)، در فرایند اکسترمم‌یابی مقید لاگرانژ در یک دستگاه معادله‌ی فرامعین کمترین مربعات تشکیل شده است [۲۶، ۲۷]. در این رابطه، اسکالر λ_c ضریب لاگرانژ مرتبط با فرایند یافتن اکسترمم‌های مقید بوده و سایر پارامترهای آن در روابط (۴) و (۷) معرفی شده‌اند. با حل تکراری دستگاه معادلات ارائه‌شده در رابطه‌ی (۹)، همزمان تمامی موقعیت‌های واقع در یک مقطع سه‌بعدی از شئی طی فرایند تقاطع فضایی برآورد شده بطوریکه دترمینان ماتریس کواریانس مجهولات صفر خواهد شد. در چنین شرایطی مختصات‌های سه‌بعدی در مکان هندسی یک صفحه برآورد خواهند گشت.

۲-۴- پالایش و حذف مشاهدات اشتباه

وجود نقاط متناظر توأم با خطای فاحش و بکارگیری قید آماری مطرح شده در بخش (۳-۲) منجر به انحراف صفحه‌ی برازش یافته به نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی می‌گردد. بعبارت بهتر، در صورت همگرایی دستگاه معادلات رابطه‌ی (۹) هنگام وجود مشاهدات اشتباه، تحمیل قطعی قید مرتبط با فقدان رتبه ماتریس کواریانس می‌تواند با ایجاد باقیمانده‌های بزرگ در مشاهدات تصویری، تمامی نقاط واقع در مقطع سه‌بعدی را حتی با وجود خطاهای فاحش در مکان هندسی یک صفحه قرار دهد. این موضوع ضرورت احتیاط در بکارگیری قید را ایجاب می‌کند. بر این اساس، می‌بایست مشاهدات بکارگرفته شده در روند تقاطع فضایی همزمان را قبل از بکارگیری در دستگاه معادلات توأم با قید، پالایش نمود.

در روند پالایشی اتخاذ شده، مشاهدات تصویری متناظر با نقاط سه‌بعدی نادرست واقع در مقطع سه‌بعدی حذف می‌شوند. شناسایی این مشاهدات از طریق میزان انحراف نقاط سه‌بعدی حاصل از تقاطع فضایی از صفحه‌ی برازش یافته به تمامی نقاط آن مقطع سه‌بعدی صورت می‌پذیرد. بعبارت بهتر، ابتدا بکمک تمامی نقاط متناظر شناسایی شده در یک مقطع سه‌بعدی فرایند تقاطع فضایی منفرد انجام شده و برای هر نقطه‌ی متناظر یک مختصات سه‌بعدی محاسبه می‌شود. در ادامه به ازای تمامی نقاط سه‌بعدی هر مقطع سه‌بعدی یک صفحه برازش می‌یابد. بردار نرمال صفحه را می‌توان به راحتی از طریق شناسایی بردار ویژه‌ی متناظر با کوچکترین مقدار ویژه‌ی ماتریس کواریانس نقاط سه‌بعدی شناسایی نمود. با در نظر گرفتن \vec{V}_3 بعنوان بردار ستونی یکه

سطح صیقلی در دو حالت مقید و بدون قید می‌تواند بازگوکننده‌ی کفایت بکارگیری این قید آماری در تولید محتوای سه‌بعدی قلمداد گردد. بر این اساس در ادامه‌ی ارزیابی‌های انجام‌شده، کفایت و ضرورت بکارگیری قید ارائه‌شده در بخش (۳-۲) مورد بررسی قرار گرفته است. سطح بادکنک یک سطح صاف، مدل‌پذیر و بدون اغتشاش محسوب می‌شود. بر این اساس و با فرض تبعیت رفتار خطاهای مربوط به تقاطع فضایی از توزیع نرمال، می‌توان RMSE^{۱۰} محاسبه‌شده از باقیمانده‌های برازش یک‌رویه به ابرنقاط بدست آمده در سامانه‌ی نورساختاریافته را به‌عنوان معیاری از میزان انطباق نتایج با سطوح مدل‌پذیر تلقی نمود. در این راستا، با محاسبه‌ی RMSE بردار باقیمانده‌ی برازش یک چندجمله‌ای دوبعدی از درجه‌ی ۳ (رابطه‌ی ۱۱) به‌عنوان مدل ریاضی سطح بادکنک، کفایت و میزان انطباق ابرنقاط تولیدی با سطح ایده‌آل مورد ارزیابی قرار گرفته است. چندجمله‌ای از درجه ۳ به‌صورت تجربی و بر اساس کیفیت برازش این تابع به ابرنقاط سطح بادکنک انتخاب شده است.

$$Z = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^{3-i} a_{ij} X^i Y^j \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، ضرایب چندجمله‌ای بوده که در فرایند تخمین کمترین مربعات برآورد می‌شوند.

در مورد توپ پلاستیکی نیز از برازش کره برای ارزیابی میزان اغتشاشات مکانی سطح آن در دو حالت مقید و نامقید استفاده شده است. جدول (۱) گزارشی آماری از شاخص RMSE و دامنه تغییر باقیمانده‌های برازش را در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید مطلق پیشنهادی (بخش ۲-۳) نشان می‌دهد.

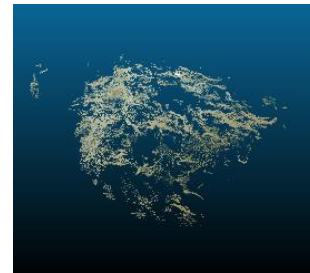
جدول ۱: گزارش آماری از دقت برازش سطح در دو حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید

شئی	روش	RMSE (mm)	دامنه(میلی‌متر)
بادکنک	عدم بکارگیری قید	۲	۲۶/۱
	بکارگیری قید	۰/۸	۱۰/۲
توپ	عدم بکارگیری قید	۴/۷	۵۳/۶
	بکارگیری قید	۳/۱	۳۳/۸

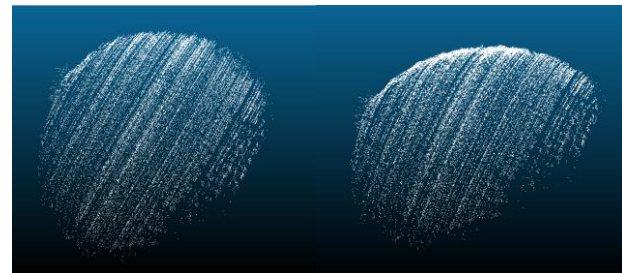
لازم به ذکر است که داده‌های بکارگرفته شده در تولید نتایج جدول (۱) در مورد توپ و بادکنک متمایز و در دو ساختار طراحی از نقطه‌نظر نوع دوربین، باز عکسی، زویای تقارب و فاصله نسبت به شئی اخذ شده است. با اینحال در مورد هر شئی، داده‌های بکارگرفته شده بمنظور تولید ابرنقاط مقید و نامقید مشابه بوده است. همان‌طور که در نتایج جدول (۱) مشاهده می‌شود؛ بکارگیری قید مطلق توانسته بطور متوسط دقت برازش ابرنقاط را



الف



ب



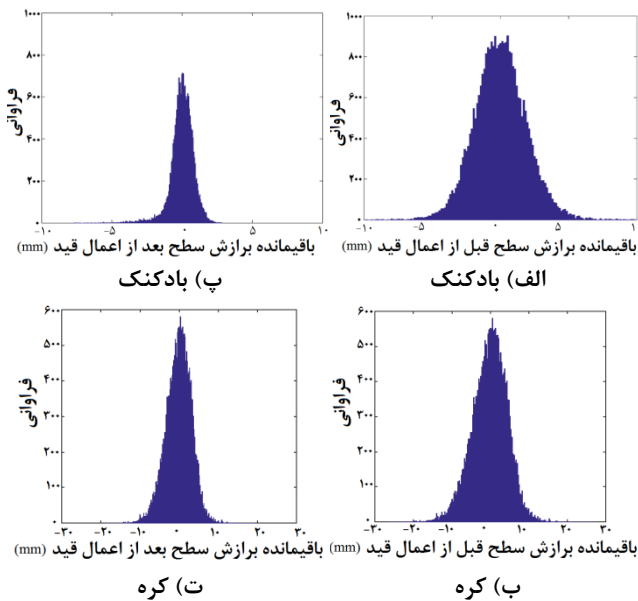
پ

شکل ۶: الف) تصاویر همپوشان، ب) ابرنقطه تولیدشده توسط نرم‌افزار Metashape، پ) ابرنقطه تولیدشده به‌کمک سامانه‌ی نورساختاریافته

همان‌طور که در شکل (۶-ب) مشهود است، عدم موفقیت فرایند تناظریابی در سطوح بدون بافت مستقیماً نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی را در چنین نرم‌افزارهایی مختل می‌سازد. شکل (۶-پ) ابرنقطه تولیدشده به‌کمک سامانه‌ی نورساختاریافته را از سطح بدون بافت نشان می‌دهد. این سطح در مقایسه با مدل سه‌بعدی تولیدشده در محیط نرم‌افزار Metashape از تطابق هندسی بسیار بهتری برخوردار است.

آزمون دوم به ارزیابی و مقایسه‌ی روش‌های بازسازی سه‌بعدی مقید و نامقید اختصاص دارد. در این آزمون بدلیل عدم دسترسی به دستگاه‌های گران‌قیمت لیزراسکنر با دقت‌های حدود یک میلیمتر بمنظور تولید یک مدل سه‌بعدی مستقل، راهکار برازش سطح به ابرنقاط انتخاب شده است. بعبارت بهتر، از آنجایی که انتظار می‌رود عملکرد روش پیشنهاد شده در این مقاله صرفاً کاهش اغتشاشات مکانی در ابرنقاط برآورد شده از سطح را بدنبال داشته باشد؛ مقایسه‌ی میزان اغتشاشات در برآورد ابرنقاط یک

شکل‌های (۸-الف تا ت) نیز به ترتیب هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح (چندجمله‌ای برای بادکنک و کره برای توپ پلاستیکی) در حالت بکارگیری و عدم بکارگیری قید را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های (۸-الف و ب) مشاهده می‌شود؛ هیستوگرام بردارهای خطا در زمان بکارگیری قید علاوه بر تبعیت از رفتار توابع گوسی از تراکم بیشتری نسبت به مقدار صفر برخوردار بوده و در مقایسه با زمان عدم بکارگیری قید، از فشردگی بیشتری برخوردار است.



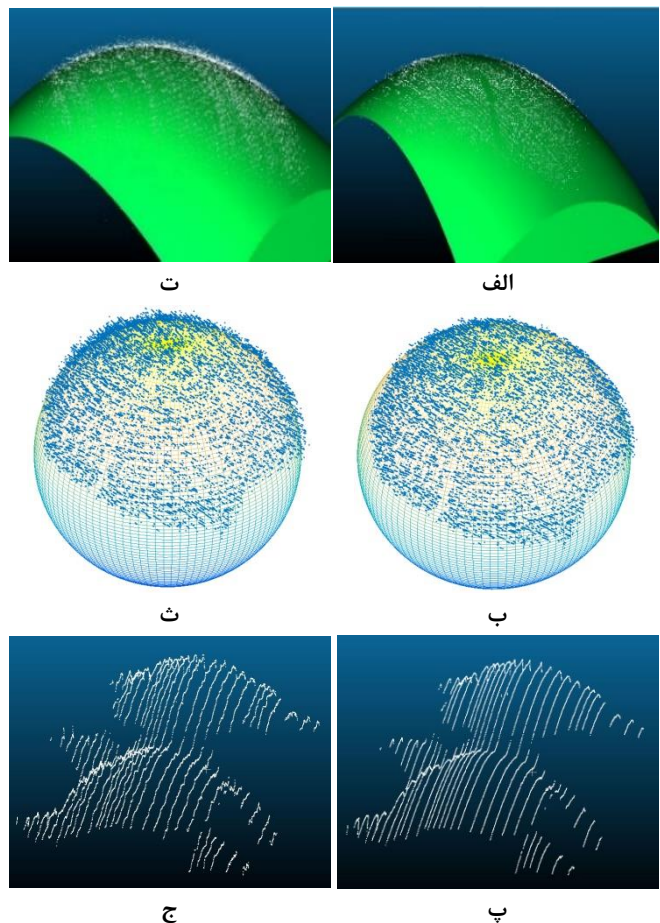
شکل ۸: الف و ب) هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح در حالت بکارگیری قید، پ و ت) هیستوگرام بردارهای خطای برازش سطح در حالت عدم بکارگیری قید

زمان لازم بمنظور اخذ داده‌های مرتبط با بادکنک و توپ پلاستیکی بعد از آماده‌سازی محیط، بطور متوسط ۲۰ ثانیه بوده و زمان پردازش لازم بمنظور تولید ابرنقاط سه‌بعدی در روش پیشنهادی برای حدود ۴۰۰ مقطع سه‌بعدی نزدیک به ۶۰ دقیقه بوده است. محیط کدنویسی نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۷ و مشخصات پردازنده و حافظه داخلی رایانه‌ی مورد استفاده به ترتیب Core i5 و ۸ گیگابایت بوده است.

از آنجاییکه در صورت وجود تنوع بافتی در تصاویر همپوشان، بکارگیری روش‌های مبتنی بر SfM توان تولید محتوای سه‌بعدی دقیقی را برخوردارند؛ در ارزیابی مربوط به آزمون سوم، با افزودن بافت و رنگ به سطح بادکنک و توپ پلاستیکی، ۴۹ تصویر همپوشان از آن اخذ شد. در ادامه، به کمک نرم‌افزار Metashape مدل سه‌بعدی این دو شیئی در قالب یک ابرنقطه تولید گردید. بدین ترتیب انتظار می‌رود به‌واسطه‌ی افزوده شدن بافت به بادکنک، تناظرایی‌های رادیومتریکی با موفقیت روبرو بوده و ابرنقطه‌ی مطلوبی از سطح سه‌بعدی تولید گردد. بعنوان مثال

به سطح ایده‌آل تا ۴۱ درصد بهبود دهد. به عبارت بهتر، دقت برازش سطح در مورد بادکنک و توپ پلاستیکی قبل از بکارگیری قید به ترتیب دومیلی‌متر و ده میلی‌متر بوده که این دقت هنگام استفاده از قید مذکور به یک میلی‌متر و پنج میلی‌متر ارتقاء یافته است. عدم مشابهت بزرگی دقت‌های کسب شده در مورد بادکنک و توپ پلاستیکی ناشی از عواملی همچون تمایز در ساختار سامانه نورساختاریافته بکارگرفته شده در مورد توپ و بادکنک، تمایز در ضخامت نور لیزر تابانده شده به سطح سه‌بعدی و عدم تطابق شکل هندسی توپ با کره سه‌بعدی قلمداد نمود. با اینحال ارتقای دقت کسب شده در هر دو داده حاکی از عملکرد موثر قید پیشنهادی خواهد بود.

شکل (۷-الف، ب و پ) نمایی از ابرنقاط بدست آمده در حالت بکارگیری قید و شکل (۷-ت، ث و ج) در زمان عدم بکارگیری قید را نشان می‌دهد. در مورد بادکنک و کره، سطوح برازش یافته به آنها (رویه‌ی چندجمله‌ای و کره) نیز نمایش یافته‌اند. نتایج بصری نیز کاهش سطح نویز در ابرنقاط تولیدشده را نسبت به سطح برازش یافته نشان می‌دهند.



شکل ۷: ابرنقاط بدست آمده؛ (الف، ب و پ) بکارگیری قید، (ت، ث و ج) عدم بکارگیری قید

۰/۰۰۸ درجه‌ای، کیفیت و صحت برآورد پارامترهای کالیبراسیون میدانی دوربین‌های بکارگرفته شده و بیشینه‌ی باز عکسی قابل تأمین در بدنه‌ی نگهدارنده) امکان تولید مدل سه‌بعدی با کیفیت از فواصل بیش از ۳ متری وجود نداشت. بر این اساس تولید مدل سه‌بعدی در ابعاد بزرگتر نیازمند بکارگیری لیزرهای صفحه‌ای با توان بالاتر و زاویه واگرایی کمتر و همچنین بکارگیری دوربین‌های نیمه متریک خواهد بود.

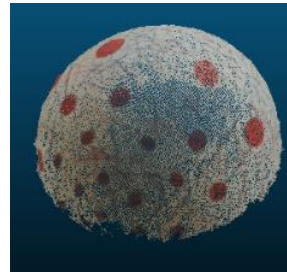
۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله یک سامانه‌ی نورساختاریافته ساده متشکل از دو دوربین و یک لیزر صفحه‌ای آزاد طراحی و پیشنهاد شد. این سامانه قادر است از سطوح بدون بافت، ابرنقاط سه‌بعدی به صورت مقاطع متعدد سه‌بعدی تولید نماید. از این سیستم میتوان در زمینه‌ی تولید مدل سه‌بعدی از قطعات صنعتی، تولید مدل سه‌بعدی صورت، پزشکی، مرمت واحیای آثار تاریخی مورد استفاده قرار داد. در ساختار طراحی این سامانه پارامترهای هندسی صفحه‌ی لیزر از قبل مشخص نبوده و کاربر قادر است آزادانه صفحه‌ی لیزر را روی سطح عارضه‌ی سه‌بعدی به‌منظور تولید مقاطع سه‌بعدی جاروب نماید. قید بکارگرفته شده در روند تقاطع فضایی همزمان تمامی موقعیت‌های واقع در هر مقطع سه‌بعدی از عارضه، توانست که دقت برازش سطح به ابرنقاط سه‌بعدی را برای یک سطح بدون اغتشاش و مدل‌پذیر تا ۶۰ درصد بهبود دهد. اقداماتی همچون تولید ابرنقطه با ایجاد تنوع در زوایای تقاطع صفحه‌ی لیزر و عارضه به‌منظور افزایش قیود هندسی حاکم بر روند بازسازی سه‌بعدی، بکارگیری قید ارائه‌شده در این مقاله در مورد سامانه‌های نورساختاریافته‌ای که نیازمند کالیبراسیون پارامترهای هندسی لیزر هستند و همچنین بکارگیری قید مذکور بصورت وزن‌دار در روند تقاطع فضایی رامی‌توان به‌عنوان پیشنهادهایی جهت تحقیقات آتی در این زمینه مطرح نمود.

مراجع

- [1] S. Hadiyoso, G. T. Musaharpa, and I. Wijayanto, "Prototype implementation of dual laser 3D scanner system using cloud to cloud merging method," in 2017 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), 2017, pp. 36-40: IEEE.
- [2] T. T. Nguyen, Q. M. Nguyen, X. G. Liu, and Y. Y. Ziggah, "3D object model reconstruction based on laser scanning point cloud data," in Int. Symp. Geoinformatics Spat. Infrastruct. Dev. Earth Allied Sci, 2012.
- [3] S. Winkelbach, S. Molkenstruck, and F. M. Wahl, "Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach," in Joint Pattern Recognition Symposium, 2006, pp. 718-728: Springer.
- [4] علی ابدل، مسعود ورشوساز، محمد سعادت سرشت "مدلسازی سه‌بعدیاز طریق تاباندن خطوط لیزر متقاطع"، دهمین همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت، تهران، ۱۳۸۹.

شکل (۹-الف) نمونه‌ای از تصویر بافت افزوده شده و شکل (۹-ب) مدل سه‌بعدی تولیدشده در محیط نرم‌افزار Metashape را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقیاس مدل‌های تولید شده در محیط Metashape بکمک معرفی نقاط کنترلی منطبق بر یکاهای SI شده است.



ب



الف

شکل ۹: الف) نمونه تصویر از سطح بادکنک بعد از افزودن بافت، ب) مدل سه‌بعدی تولیدشده از بادکنک در محیط نرم‌افزار Metashape در ادامه و به‌طور موازی، ابرنقطه دیگری از سطح بادکنک و توپ پلاستیکی توام با بافت به‌کمک سامانه‌ی پیشنهادی نورساختاریافته تولید گردید. بعد از برش ابرنقاط بدست آمده از نرم‌افزار Metashape متناسب با محدوده‌ی تحت پوشش ابرنقاط سامانه‌ی نورساختاریافته، مجدداً رویه‌ی سه‌بعدی و کره به‌طور مجزا به هر ابرنقطه برازش یافت. جدول (۲) گزارشی آماری از دقت برازش سطح در بادکنک و کره در توپ پلاستیکی به ابرنقاط Metashape و سامانه‌ی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: گزارش آماری از دقت برازش سطح به ابرنقاط حاصل از

نرم‌افزار Metashape و سامانه نورساختاریافته

شئی	روش	RMSE (mm)	دامنه (میلی‌متر)
بادکنک	Metashape	۱/۱	۷/۴
	سامانه نورساختاریافته	۰/۸	۱۰/۲
توپ	Metashape	۲/۷	۲۶/۳
	سامانه نورساختاریافته	۳/۱	۳۳/۸

مطابق با نتایج گزارش شده در جدول (۲)، دقت برازش یافتن سطح در دو ابرنقطه به یکدیگر نزدیک بوده و این مسئله گواهی بر کفایت روش پیشنهاد شده در این مقاله خواهد بود. به‌عبارت بهتر، سامانه‌ی نورساختاریافته پیشنهادی توانسته با بکارگیری قید مطلق مربوط به قرارگرفتن نقاط هر مقطع سه‌بعدی در مکان هندسی یک صفحه، دقت‌های قابل‌رقابتی را در مقایسه با زمانی که از تصاویر متعدد برای بازسازی سه‌بعدی استفاده شود، تأمین سازد. محدودیت‌های سخت‌افزاری در ساخت این سامانه‌ی نورساختاریافته (استفاده از لیزر صفحه‌ای با زاویه‌ی واگرایی حدود

پاورقی‌ها:

- ¹Structure from Motion
- ²Curve Fitting
- ³Edge detection
- ⁴Morphology
- ⁵Positive
- ⁶Negative
- ⁷ Frames per second
- ⁸Self-Calibration
- ⁹Epipole
- ¹⁰Root mean square error

- [5] اکبر جعفری، فرهاد صمدزادگان، محمد سعادت سرشت، حسن امامی "مدلسازی سه-بعدی اشیاء با بافت یکسان و بدون تارگت‌گذاری با استفاده از روش نور ساخت یافته : طراحی، ساخت و ارزیابی"، نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری اطلاعات مکانی، دوره هشتم شماره دو، ۱۳۹۶
- [6] Z. Xiong and Y. Zhang, "A critical review of image registration methods," *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 1, no. 2, pp. 137-158, 2010.
- [7] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849, 2004.
- [8] C. B. J. Y. Zhang, and R. J. Zhang, "Improving the accuracy of stripe center extraction in a structured light measurement system," *Natural Foundation Research Project of Shaanxi Province*, 2019.
- [9] J. van der Lucht, M. Bleier, F. Leutert, K. Schilling, and A. Nüchter, "STRUCTURED-LIGHT BASED 3D LASER SCANNING OF SEMI-SUBMERGED STRUCTURES," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 4, no. 2, 2018.
- [10] Z. Qi, Z. Wang, J. Huang, and Q. Xue, "Improving the quality of stripes in structured-light three-dimensional profile measurement," 2017.
- [11] D. Naidu and R. B. Fisher, A comparison of algorithms for sub-pixel peak detection. University of Edinburgh, Department of Artificial Intelligence, 1991.
- [12] Z. Y. Xu, H. Y. Zheng, and H. Y. Yang, "An improved Gaussian fitting method used in light-trap center acquiring," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 596, pp. 449-452: Trans Tech Publ.
- [13] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno, "A low cost 3D scanner based on structured light," in *Computer Graphics Forum*, 2001, vol. 20, no. 3, pp. 299-308: Wiley Online Library.
- [14] X. Bai, "Morphological center operator for enhancing small target obtained by infrared imaging sensor," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, no. 14, pp. 3697-3701, 2014.
- [15] A. Landström, "Adaptive tensor-based morphological filtering and analysis of 3D profile data," *Luleå tekniska universitet*, 2012.
- [16] Y. Li, J. Zhou, F. Huang, and L. Liu, "Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method," *Sensors*, vol. 17, no. 4, p. 814, 2017.
- [17] C. S. Fraser, "Digital camera self-calibration," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, vol. 52, no. 4, pp. 149-159, 1997.
- [18] A. A. Al-Kharaz and A. K. Chong, "High accuracy smartphone video calibration for human foot surface mapping," in *2018 IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC)*, 2018, pp. 542-545: IEEE.
- [19] E. E. Elnima, "A solution for exterior and relative orientation in photogrammetry, a genetic evolution approach," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, vol. 27, no. 1, pp. 108-113, 2015.
- [20] TRAN, T. Anh, and Vietnam, "Epipolar Resampling of Stereo Image Base on Airbase in the Digital," *Land Governance and the Environment – Building the Capacity*, 2009.
- [21] M. F. Morgan, Epipolar resampling of linear array scanner scenes. University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2004.
- [22] W. Cho, T. Schenk, and M. Madani, "Resampling digital imagery to epipolar geometry," *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 29, pp. 404-404, 1993.
- [23] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and J. Boehm, *Close-range photogrammetry and 3D imaging*. Walter de Gruyter, 2013.
- [24] B. Kathariya, L. Li, Z. Li, J. Alvarez, and J. Chen, "Scalable point cloud geometry coding with binary tree embedded quadtree," in *2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [25] A. Nurunnabi, D. Belton, and G. West, "Diagnostic-robust statistical analysis for local surface fitting in 3D point cloud data," *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volumes 1-3, pp. 269-274, 2012.
- [26] C. Wu, S. Agarwal, B. Curless, and S. M. Seitz, "Multicore bundle adjustment," in *CVPR 2011*, 2011, pp. 3057-3064: IEEE.
- [27] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley, and A. W. Fitzgibbon, "Bundle adjustment—a modern synthesis," in *International workshop on vision algorithms*, 1999, pp. 298-372: Springer.