



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Assessing the Influence of Image Network and Image Texture on the Quality of 3D Point Cloud Production in Close-Range Photogrammetry

R. Naeimaei, E. Ghanbari Parmehr*

Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT

Received: 30 May 2023
 Reviewed: 7 July 2023
 Revised: 12 August 2023
 Accepted: 01 October 2023

KEYWORDS:

Close-Range Photogrammetry
 Structure from Motion
 3D Point cloud
 Imaging Network
 Image texture
 Agisoft

* Corresponding author

✉ parmehr@nit.ac.ir

☎ (+9811) 35501580

Background and Objectives: Close-range photogrammetry aims to produce accurate 3D geometric models of objects using images taken from the subject. Nowadays, the creation of realistic 3D models and their visualisation is a common practice that is becoming more popular every day. On the other hand, choosing the right modelling software for photogrammetry has always been a challenge and a topic of discussion among experts and researchers. Therefore, it is essential to examine and evaluate the models produced by different software tools. Due to the widespread use of Agisoft software among engineers and researchers in this field, this study aimed to perform image processing and modelling using two versions of this software, namely Photoscan and Metashape. In previous research, the criterion for optimising the image mesh has been based on improving the accuracy of the modelling. In order to assess and evaluate the 3D models produced by the two versions of the software, we defined different scenarios for the design of the image mesh. We compared the 3D models generated for each scenario with a mathematical reference model. We also examined the complete modelling in the software under different conditions using two different textures, as the texture of the image directly affects the quality of the point cloud. It is important to analyse the role of the image texture together with the geometry of the image mesh. Therefore, we evaluated the image texture as a radiometric index and investigated how these two factors affect the quality of the point cloud. As a result, we determined the optimal number of images with appropriate texture required to produce an accurate and high-quality 3D model.

Methods: close-range photogrammetry, we capture a series of images of an object using a specific image network. These images are then used with the Structure from Motion (SfM) method to generate point clouds and 3D models. The concept behind SfM is inspired by how our eyes perceive objects. This approach offers a quick, automated, and cost-effective way to obtain 3D data. It involves creating 3D coordinate models by processing a sequence of overlapping images of the object. Finally, the resulting 3D models are compared with a reference point cloud using the Cloud Compare point cloud processing software.

Findings: The results of using images with simple texture show that in Photoscan software, increasing the number of images not only leads to noise in the point cloud, but also reduces the similarity of the generated model to the cube. According to the results, the best 3D model with a high similarity to the cube is associated with the fourth scenario (45 images) with an error of 0.01 millimetres. In the case of the Metashape software, the best model is associated with the third scenario (90 images) with an error of 0.05 millimetres. On the other hand, in cases where images with complex textures were used, the best point cloud is related to the fourth scenario (45 images) with an error of 0.02 millimetres in Photoscan software and to the third scenario (90 images) with an error of 0.04 millimetres in Metashape software. In general, the use of objects with complex textures leads to a better match and therefore to denser point clouds due to the presence of complex and non-uniform gradients in the images.

Conclusion: The results show that the optimal number of images and the presence of a complex image texture have a significant impact on the improvement of the quality of the 3D point cloud of the object. Despite the increased processing time, the quality of the 3D model does not increase significantly with a large number of images; it only leads to denser point clouds due to increased noise in the point cloud.



NUMBER OF REFERENCES

51



NUMBER OF FIGURES

24



NUMBER OF TABLES

2

مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر شبکه تصویربرداری و بافت تصویر بر کیفیت تولید ابرنقطه سه بعدی در فتوگرامتری برد کوتاه

رضا نعیمایی، عبادت قنبری پرمهر*

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: فتوگرامتری برد کوتاه به ارائه مدل دقیق هندسی سه بعدی اشیاء با استفاده از تصاویری که از جسم اخذ شده می پردازد. امروزه، ایجاد مدل های سه بعدی واقع بینانه و تجسم آن ها متداول شده و روز به روز محبوب تر می شود. از طرفی، انتخاب درست نرم افزار مدل سازی در برد کوتاه همواره چالش برانگیز و مورد بحث متخصصان و محققان بوده و هست. از این رو، بررسی و ارزیابی مدل های تولید شده در نرم افزارهای مختلف، حائز اهمیت است. به علت فراگیر بودن نرم افزار Agisoft در میان مهندسان و محققان این حوزه، سعی شد تا در این تحقیق، پردازش تصاویر و مدل سازی در دو نسخه این نرم افزار با نام های Photoscan و Metashape اجرا شوند. در تحقیقات صورت گرفته تا به امروز معیار بهینه سازی شبکه عکس برداری، بر مبنای افزایش دقت مدل سازی بوده است، به همین جهت، برای بررسی و ارزیابی مدل های سه بعدی تولیدی در دو نسخه این نرم افزار، سناریوهای متفاوتی برای طراحی شبکه عکس برداری تعریف شده و مدل سه بعدی تولیدی هر سناریو با یک مدل ریاضی به عنوان مدل مرجع مقایسه شدند. علاوه بر این، در این پژوهش علاوه بر ارزیابی دقت مدل سه بعدی تولیدی، مدل سازی کامل در نرم افزار به صورت اجرایی در حالت های مختلف با دو بافت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که بافت تصویر تأثیر مستقیم بر کیفیت ابرنقطه دارد، برای بررسی کیفیت ابرنقطه تولید شده به روش فتوگرامتری لازم است تا نقش بافت تصویر به همراه هندسه شبکه تصویربرداری به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند. از این رو، علاوه بر بررسی وضعیت هندسی شبکه عکس برداری، بافت تصاویر به عنوان یک شاخص رادیومتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر این دو عامل بر کیفیت ابرنقطه تولید شده بررسی شده است. در نتیجه تعداد بهینه تصویر با بافت مناسب برای ساخت یک مدل سه بعدی دقیق و با کیفیت تعیین شده است.

روش ها: برای مدل سازی یک شیء در روش فتوگرامتری برد کوتاه، تعدادی تصویر طبق شبکه از پیش طراحی شده از شیء مورد نظر اخذ شده و سپس، به کمک روش ساختار ناشی از حرکت (SfM)، ابرنقاط و مدل سه بعدی ایجاد می شود. اساس روش ساختار ناشی از حرکت، از نحوه ادراک اجسام توسط چشم انسان الگوبرداری شده است. روش ساختار ناشی از حرکت، امکان دستیابی سریع، خودکار و کم هزینه به داده های سه بعدی را فراهم می سازد. این روش به گونه ای است که با استفاده از تصاویر متوالی پوشش دار مربوط به یک شیء و پردازش تصویر، مدل سه بعدی دارای مختصات ایجاد می کند. پس از ساخت مدل های سه بعدی بر مبنای سناریوهای تعریف شده در دو نسخه نرم افزار، در نرم افزار پردازش ابرنقطه Cloud Compare با ابرنقطه ریاضی (مرجع) مورد قیاس قرار گرفتند.

یافته ها: یافته های استفاده از تصاویر با بافت ساده حاکی از آن است که در نرم افزار Photoscan با افزایش تعداد تصاویر علاوه بر نویزی شدن ابرنقطه، میزان شباهت مدل ساخته شده به مکعب نیز، کاهش می یابد. بر اساس نتایج، بهترین مدل سه بعدی که شباهت زیادی با مکعب دارد مربوط به حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۱ میلی متر است. در مورد نرم افزار Metashape بهترین مدل مربوط به حالت سوم (۹۰ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۵ میلی متر است. از طرفی در حالات استفاده از تصاویر با بافت پیچیده، بهترین ابرنقطه مربوط به حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۲ میلی متر در نرم افزار Photoscan و حالت سوم (۹۰ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۴ میلی متر در نرم افزار Metashape است. به طور کلی استفاده از شیء با بافت پیچیده موجب تناظریابی بهتر عوارض می شود. تصاویر با بافت پیچیده گرادیان های پیچیده و به دنبال آن جهت های گرادیان غیر هم سو تولید می کنند و در مقابل آن، تصاویر با بافت ساده گرادیان های یکسان تولید می کنند. در نتیجه، وجود گرادیان های پیچیده و غیر هم سو موجب به تناظریابی بهتر و پایدارتر و در نتیجه آن تولید نقاط گرهی و تراکم ابرنقطه متراکم بیشتر می شود.

تاریخ دریافت: ۰۹ خرداد ۱۴۰۲
تاریخ داوری: ۱۷ تیر ۱۴۰۲
تاریخ اصلاح: ۲۱ مرداد ۱۴۰۲
تاریخ پذیرش: ۰۹ مهر ۱۴۰۲

واژگان کلیدی:

فتوگرامتری برد کوتاه
ساختار ناشی از حرکت
ابرنقطه سه بعدی
شبکه تصویربرداری
بافت تصویر
Agisoft

* نویسنده مسئول

parmehr@nit.ac.ir

۰۱۱-۳۵۵۰۱۵۸۰

نتیجه‌گیری: نتایج، نشان داد که تعداد بهینه تصاویر و وجود بافت پیچیده تصویر تأثیر بسزایی در بهبود کیفیت ابرنقطه سه‌بعدی شیء دارند و با وجود عکس‌های زیاد کیفیت مدل سه‌بعدی علی‌رغم صرف زمان پردازش زیاد افزایش نیافته و تنها موجب تراکم ابرنقطه شده که این افزایش تراکم به دلیل افزایش نویز در ابرنقطه است.

مقدمه

فتوگرامتری به‌عنوان یکی از روش‌های اندازه‌گیری غیرتماسی سه‌بعدی برای کنترل ابعادی مطرح است، در این روش، با استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق نقاط بر روی تصاویر اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی مانند فاصله، ارتفاع، مساحت، حجم و شکل اجسام مختلف تعیین می‌شود. یکی از اهداف فتوگرامتری دستیابی به اطلاعات هندسی، رادیومتریکی و تشخیص عوارض در دنیای سه‌بعدی است. امروزه، ایجاد مدل‌های سه‌بعدی واقع‌بینانه و تجسم آن‌ها متداول شده و روزه‌روز محبوب‌تر می‌شوند. به عبارت دیگر، مدل‌های سه‌بعدی بخشی از عصر دیجیتال جدید هستند [۱]. روند کلی ایجاد مدل سه‌بعدی شامل اخذ تصاویر از شیء مورد نظر، ایجاد ارتباط بین تصاویر و در نهایت رسیدن به ابرنقطه از شیء مذکور است. روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر تصویر ایزاری مهم برای تولید مدل‌های سه‌بعدی بسیار کاربردی و به صرفه هستند. مدل‌های دقیق مبتنی بر تصویر می‌توانند هم‌زمان با تعیین کالیبراسیون دقیق دوربین، اطلاعات هندسی تصاویر را به‌دست آورند که امروزه به‌طور خودکار در بینایی کامپیوتر و فتوگرامتری انجام می‌شوند [۲].

تکنیک فتوگرامتری به‌عنوان یک ابزار ارزشمند در مستندسازی و انتشار بهره‌وری فرهنگی هستند. لراما، در سال ۲۰۱۳ بر اهمیت مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه در بازسازی و تعامل مجازی با میراث فرهنگی تأکید می‌کند [۳]. لونا در سال ۲۰۱۸ به بررسی نحوه این‌که چگونه فتوگرامتری می‌تواند اشیاء میراث فرهنگی را قابل دسترسی‌تر کند و یک مرور جامع از جریان کار فتوگرامتری ارائه می‌دهد [۴]. لورو در سال ۲۰۲۳، به نیاز به یک روش مشترک برای نقشه‌برداری فتوگرامتری در باستان‌شناسی پرداخته و یک جریان کار عملی برای نقشه‌برداری سه‌بعدی پیشنهاد می‌دهد [۵]. اوسلو در سال ۲۰۲۰ ترکیب فتوگرامتری، واقعیت افزوده، و تصویر مبتنی بر وب را برای ارائه تعاملی از میراث فرهنگی مورد بررسی قرار داد. به‌طور کلی، این مقالات توانایی فتوگرامتری را در بهبود مستندسازی، تصویرسازی و دسترسی به میراث فرهنگی نشان می‌دهند [۶].

مدل‌سازی مبتنی بر تصویر، یک روش مناسب برای ایجاد مدل‌های سه‌بعدی اشیاء مختلف است که با طراحی شبکه دوربین شروع می‌شود [۷]. با توجه به تأثیر مستقیم نحوه عکس‌برداری و انتخاب زاویه مناسب میان تصاویر اخذ شده بر دقت نهایی مدل سه‌بعدی، طراحی شبکه پروژه فتوگرامتری بردکوتاه در موفقیت و یا عدم موفقیت پروژه مؤثر است. در طول چند دهه گذشته، موضوع بهینه‌سازی شبکه یکی از موضوعات مورد علاقه و چالش‌برانگیز در فتوگرامتری بردکوتاه بوده است. هدف اصلی بهینه‌سازی یک شبکه چند ایستگاهی دستیابی به دقت و کیفیت

مورد نظر با کمترین میزان هزینه است [۸]. برای طراحی یک شبکه تصویربرداری متراکم، هزینه محاسباتی برای توجیه و تعیین مکان بهینه دوربین با مربع تعداد تصاویر افزایش می‌یابد [۹]. به همین علت تعداد تصاویر یک عامل بسیار مهم و تأثیرگذار بر دقت و همچنین زمان پردازش است. هدف از این طراحی، پیش‌بینی و تضمین کیفیت کلی اندازه‌گیری‌های فتوگرامتری است، در حالی که منظور از کیفیت به معنای یک پارامتر کلی شامل دقت، قابلیت اطمینان و هزینه است [۱۰]. در واقع، شبکه‌های عکس‌برداری که تصاویر اضافی ندارند با وجود استفاده از تعداد تصاویر کمتر و کاهش زمان پردازش، دقت را کاهش نمی‌دهند.

در طول دو دهه گذشته، فتوگرامتری بردکوتاه به ابزاری قدرتمند و گسترده برای مدل‌سازی سه‌بعدی تبدیل شده است [۷، ۱۲]. توسعه الگوریتم‌های استخراج اطلاعات سه‌بعدی مبتنی بر تصویر دو بعدی و مثلث‌بندی‌های فتوگرامتری به‌شدت کیفیت داده‌هایی که از همپوشانی جفت تصاویر استریو حاصل می‌شود را افزایش داده است [۱۳، ۱۴].

محققان با پیشرفت در علوم کامپیوتر به رویکرد جدیدی در زمینه تحلیل تصویری دست یافته‌اند که ساختار ناشی از حرکت (Structure from Motion) نامیده می‌شود [۱۵، ۱۶]. این روش به کنترل زمینی محدودی نیاز داشته و معمولاً تصاویر به‌دست آمده از دوربین‌های رقومی ارزان قیمت و غیرمتریک قابل استفاده هستند. این روش رو به رشد به علت ارزان بودن و سرعت بالا، برتری قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها مانند پوششگر لیزری دارد. در سال‌های اخیر استخراج داده‌های سه‌بعدی از سطح اشیاء و بازسازی و مدل‌سازی آن‌ها به دلیل کاربردهای متنوعی مانند ساخت قطعات صنعتی و برآورد احجام خاکی که در علوم مختلف دارند سبب شده است که روش‌های مختلفی جهت استخراج داده‌های سه‌بعدی به‌کار گرفته شوند [۱۷]. در این میان، استفاده از تصاویر متوالی یا همان روش ساختار ناشی از حرکت از جمله روش‌هایی است که به دلیل امکانات ارزان قیمت برای استفاده از آن، توجه خاص محققان را به خود جلب نموده است.

به‌طور مثال، مصطفوی در سال ۲۰۱۹ به کمک تکنیک ساختار از حرکت با استفاده از تصاویر هوایی پهپاد و تصاویر زمینی به منظور به‌دست آوردن ابرنقطه متراکم از مکان‌های تاریخی می‌پردازد [۱۸]. اسپودک در سال ۲۰۲۲ به بررسی استفاده از فتوگرامتری دیجیتال با دوربین‌های ارزان قیمت و نرم‌افزارهای موجود برای مستندسازی مکان‌های تاریخی دورافتاده، می‌پردازد [۱۹]. گونزالس-کوویو در سال ۲۰۲۱ کاربرد فتوگرامتری سه‌بعدی را در تجزیه و تحلیل، تصویرسازی و آثار باستانی بومی، شامل مکان‌های هنر غاری و مکان‌های دفن شده، نمایش می‌دهد [۲۰].

شبکه عکس برداری را با هدف اندازه گیری موقعیت، شکل و ابعاد شیء و تأمین همزمان قیود دید مورد بررسی قرار دادند [۲۹]. حسینی نوه و همکاران، روشی به نام Image Network Designer (IND) را برای مدل سازی مصنوعات موزه معرفی کردند [۳۰]. ونزل و همکاران، یک راهنما برای دستیابی به تصاویر مناسب به نام One panorama earth step را ارائه دادند [۳۱]. آل سادیک و همکاران، با به کارگیری الگوریتم های فازی، حداقل تعداد تصاویر را برای مدل سازی و بازسازی آثار باستانی تخمین زدند [۳۲، ۳۳]. همچنین، شریفی و قنبری پرمهر، تأثیر منتظم بودن شبکه عکس برداری بر دقت فتوگرامتری برد کوتاه را بررسی کردند [۳۴]. همچنین نعیمایی و قنبری پرمهر، تعداد بهینه تصاویر شبکه عکس برداری با توجه به حفظ دقت مدل سازی را بررسی کردند [۳۵].

تاکنون در تحقیقات انجام شده، معیار اصلی بهینه سازی شبکه های عکس برداری، بر مبنای افزایش دقت بوده است. اما در این مطالعه، علاوه بر ارزیابی دقت، مدل سازی جامع در نرم افزار به صورت اجرایی در حالت های مختلف با دو بافت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که بافت تصویر تأثیر مستقیم بر کیفیت ابرنقطه دارد، برای بررسی کیفیت ابرنقطه تولید شده به روش فتوگرامتری لازم است تا نقش بافت تصویر به همراه هندسه شبکه تصویربرداری به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند. از این رو، علاوه بر بررسی وضعیت هندسی شبکه عکس برداری، بافت تصاویر به عنوان یک شاخص رادیومتریکی مورد ارزیابی قرار گرفته و تأثیر این دو عامل بر کیفیت ابرنقطه تولید شده بررسی شده است. در نتیجه، تعداد بهینه تصویر با بافت مناسب برای ساخت یک مدل سه بعدی دقیق و باکیفیت تعیین شده است.

مواد و روش

در این مقاله، به بررسی تأثیر طراحی شبکه عکس برداری و بافت تصاویر برای ساخت مدل سه بعدی دقیق و باکیفیت، با تعداد بهینه تصویر با استفاده از دوربین عکس برداری رقومی پرداخته شده است. برای ارزیابی دقت مدل سه بعدی فتوگرامتری، عکس برداری از یک مکعب به ابعاد (۱۰×۱۰×۱۰) سانتی متر انجام شد. مکعب، به دلیل داشتن شکل هندسی ساده و معلوم برای ارزیابی کیفی هندسی مدل سه بعدی انتخاب گردید. برای عکس برداری از دوربین رقومی Canon مدل EOS 500D با حسگر CMOS و قدرت تفکیک مکانی ۱/۱۵ مگاپیکسل، به همراه عدسی متغیر (۵۵-۱۸ میلی متر) استفاده شد. برای بررسی وضعیت هندسی شبکه عکس برداری با رعایت نکات عکس برداری (مثل شرایط نوری عکس برداری، پس زمینه مناسب، فاصله ثابت تا شیء و ...) در فواصل زاویه ای متفاوت از شیء عکس برداری شد. در مرحله اول، ۳۶۰ عکس به صورت یک درجه یک درجه منتظم همانند شکل ۱ از جسم اخذ شده و ابرنقطه سه بعدی در نرم افزار ایجاد شد. در مرحله بعدی با در نظر گرفتن فاصله زاویه یکنواخت بین تصاویر، کاهش تعداد تصاویر تا رسیدن به ۲۳ تصویر حول شیء (با فاصله زاویه ای تقریباً ۱۶ درجه) ادامه یافت. در هر

استخراج مدل سه بعدی از یک شیء یا محیط تنها با به کارگیری تصاویر دو بعدی، یکی از مسائل اساسی در بینایی کامپیوتر است. از خصوصیات این روش می توان به امکان خودکار نمودن فرآیند استخراج داده های سه بعدی، قابلیت استفاده برای اجسام با ویژگی های مختلف، عدم نیاز به تماس مستقیم با جسم جهت اندازه گیری و حصول دقت های قابل قبول اشاره نمود [۲۱].

تکنیک مطرح شده، تنها یکی از تکنیک های بازسازی سه بعدی اشیاء از میان بسیاری از تکنیک های بازسازی سه بعدی است. تکنیک های دیگری نیز وجود دارد که می توان به اجمالی به مواردی همچون بازسازی بینایی استریو [۲۲]، نور ساخت یافته [۲۳] یا اسکن لیزری [۲۴] به عنوان مرجع اشاره کرد.

هر کدام از این روش ها، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققان قرار می دهند اما هر کدام بر روی یک نوع سطح و جسم و یا یک موضوع متمرکز شده اند تا تحت شرایط خاصی الگوریتم پایدارتری ارائه دهند. منابع دیگری همچون [۲۵، ۲۶] وجود دارد که بررسی های عمیق تری با استفاده از مجموعه داده های خود ارائه می دهند.

انتخاب درست نرم افزار مدل سازی در برد کوتاه همواره چالش و مورد بحث متخصصان و محققان بوده و هست و تحقیقات متعددی در این زمینه برای ارزیابی نرم افزارها در کاربردهای مختلف صورت گرفته است. ایوان نیکلو و همکاران، شش نرم افزار Memento، Context Capture، Reality Capture، Photoscan و Pix4D در مدل سازی شش جسم چالشی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، نرم افزارها به دو گروه تقسیم شدند. (۱) نرم افزارهایی که پایدار و بهینه هستند ولی توانایی ثبت جزئیات زیاد را ندارند. (۲) نرم افزارهایی که توانایی ثبت جزئیات زیادی را دارند ولی عملکرد پایینی دارند و اگر برخی شرایط محیطی برقرار نباشد مدل سازی به همراه نویز اتفاقی تولید می شود [۲۷].

گابارا و همکاران، سه نرم افزار Reality Capture، Photoscan و Pix4D در تولید دو محصول ابرنقطه مترکم و مش مقایسه کردند. به طور خلاصه هر نرم افزار محدودیت خاص خود را به همراه داشت. نرم افزار Reality Capture از نظر کامل بودن مدل، کاهش نویز و هندسه مش سه بعدی دارای بالاترین کیفیت بوده و از طرفی فضای کمتری از حافظه را هنگام پردازش اشغال می کند. Photoscan دارای استحکام بالاتری است اما در مدل سازی اشیاء نامنتظم ابرنقطه ناقصی تولید می کند. Pix4D در ساخت بافت تصویر به خوبی عمل می کند اما فضای زیادی از حافظه را اشغال می کند و ابرنقطه نویز داری تولید می کند [۲۸].

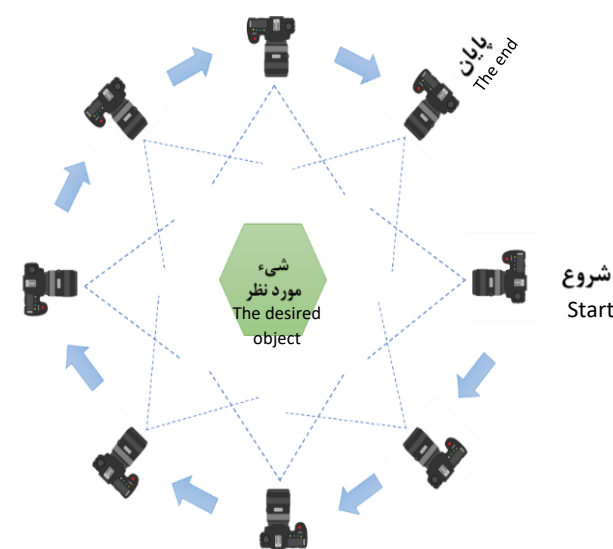
کاهش هزینه، مخصوصاً هزینه محاسباتی همواره مورد توجه محققان بوده و هست. انتخاب تعداد مناسب تصویر در مدل سازی هم در این مورد مستثنا نیست. از این رو، تحقیقات متعددی در سال های اخیر برای بررسی انتخاب صحیح تعداد تصاویر از میان مجموعه داده های بزرگ، برای ساخت مدل سه بعدی انجام شده است. سعادت سرشت و صمدزادگان، با استفاده از روش NSGA-II جانمایی ایستگاه دوربین در

(استریو) است و بر این اساس، جسم سه‌بعدی ساخته می‌شود [۳۸] و [۳۹]. این روش که برای تخمین مسیر حرکت دوربین مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر اساس ارتباط هندسی میان نقاط متناظر در دو یا چند تصویر از یک فضا شکل گرفته است که به آن هندسه چند منظر نیز گفته می‌شود. تحولات جدید در کامپیوتر بر اساس دید ساختار ناشی از حرکت یا فتوگرامتری استریو (MVS) مطالعات را تنها با یک دوربین دیجیتال برای جمع‌آوری مجموعه‌ای از داده‌های ارتفاعی باکیفیت بالا آسان نموده است [۱۵].

روش ساختار ناشی از حرکت امکان دستیابی سریع، خودکار و کم‌هزینه به داده‌های سه بعدی را فراهم می‌سازد [۱۷]. ساختار اصلی این روش به گونه‌ای است که با استفاده از تصاویر متوالی پوشش‌دار مربوط به یک شیء و پردازش تصویر، مدل سه بعدی دارای مختصات (x,y,z) ایجاد می‌کند ولی در روش‌های سنتی فتوگرامتری جهت تخمین موقعیت سه بعدی نقاط مدل با استفاده از تصاویر دوبعدی، با در دسترس داشتن موقعیت سه بعدی تعدادی نقاط کنترل از روش‌های ترفیع و تقاطع فتوگرامتری میسر است. در ترفیع فضایی تصویر، نقاط کنترل به صورت دستی در عکس‌های ورودی مشخص می‌شوند و از روند تصویر نقاط در عکس برای تعیین موقعیت دوربین استفاده می‌شود. برای تقاطع در صورت نبود پارامترهای توجیه خارجی دوربین، از مثلث‌بندی برای توجیه دوربین استفاده می‌شود [۴۰]. در حالی که روش ساختار ناشی از حرکت به هیچ‌یک از موارد فوق نیاز ندارد. فرآیند ساختار ناشی از حرکت شامل سه دسته است:

- تشخیص ویژگی‌های متناظر در دنباله تصاویر
 - محاسبه ساختار اولیه به‌عنوان نقطه شروع برای مرحله بعد
 - سرشکنی دسته اشعه (Bundle Adjustment)
- مهم‌ترین مرحله، تناظریابی و ایجاد ارتباط بین تصاویر و تشخیص ویژگی‌های متناظر دو تصویر است. تناظریابی، فرآیندی است که طی آن نقاط و یا عوارض مشترک تصاویر پوشش‌دار شناسایی می‌شوند و از طرفی به‌عنوان یک مرحله مهم و دشوار در فتوگرامتری و بینایی ماشین مطرح است [۴۱]. فرآیند ساختار ناشی از حرکت برای تشخیص ویژگی‌های نقاط متناظر در تصاویر از دو الگوریتم SURF و SIFT استفاده می‌کند.
- الگوریتم SIFT به منظور انجام فرآیند تناظریابی، برای هر عارضه استخراج شده، توصیف‌گر متمایزی با استفاده از تخصیص یک بردار از توزیع مقادیر اندازه و جهت گرادیان در اطراف آن ایجاد می‌کند [۴۲].
- [۴۳]. ایجاد این توصیف‌گر مطابق با پارامترهای مقیاس و جهت هر عارضه، انجام می‌شود تا فرآیند تناظریابی مستقل از مقیاس و دوران میان تصاویر قابل انجام باشد. علاوه بر این دو پارامتر، توصیف‌گر به‌گونه‌ای ایجاد می‌شود که در مقابل دیگر تغییرات نظیر روشنایی تا حد ممکن مستقل باشد. این الگوریتم شامل دو بخش استخراج عوارض محلی و ایجاد توصیف‌گر برای این عوارض است، این روش را می‌توان مهم‌ترین روش تناظریابی عارضه مبنا دانست [۴۴].

مرحله، مدل سه بعدی مستقلی ساخته شده و مدل‌های سه‌بعدی با یکدیگر مقایسه گردیدند. برای بررسی وضعیت بافت تصاویر عملیات عکس‌برداری از یک مکعب با بافت ساده و یکنواخت و از یک مکعب با بافت پیچیده انجام شد. در نهایت، با مقایسه کیفیت مدل‌های ایجاد شده از لحاظ کامل بودن و ارائه ساختار هندسی صحیح، تعداد بهینه تصاویر مورد نیاز برای ساخت یک مدل سه‌بعدی کامل و دقیق مشخص شد.



شکل ۱: روند عکس‌برداری در تولید ابرنقطه سه‌بعدی
Fig. 1: The flow of imaging to generate 3D point cloud

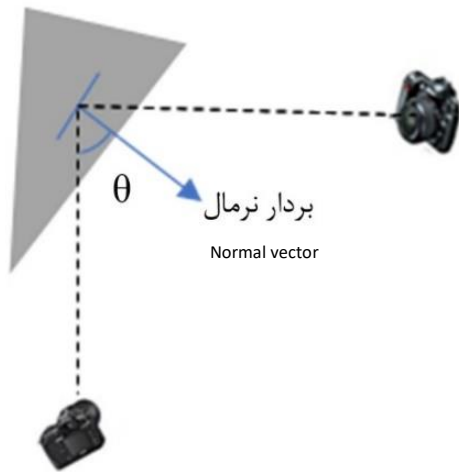
در این تحقیق، پردازش تصاویر در نرم‌افزار Agisoft و صحت ابرنقطه سه‌بعدی ایجاد شده شیء با شکل هندسی منظم (مکعب) ارزیابی شده است. دو نسخه نرم‌افزار Agisoft به نام‌های Photoscan و Metashape به عنوان نرم‌افزار مستقل امکان انجام پردازش‌های فتوگرامتری و تولید اطلاعات و داده‌های سه بعدی از تصاویر را برای بررسی دقیق‌تر تصاویر در حوزه سامانه اطلاعات جغرافیایی، میراث فرهنگی، ساخت جلوه‌های ویژه و همچنین، اندازه‌گیری غیرمستقیم اشیاء از مقیاس‌های مختلف را ممکن می‌سازند [۳۶، ۳۷].

در این بخش، روش رایج توجیه تصاویر و تولید ابرنقطه به همراه عوامل مؤثر بر هندسه و کیفیت مدل سه‌بعدی مانند بردار نرمال و میدان دید دوربین، بافت تصویر ارائه شده و در پایان ارزیابی صحت ابرنقاط حاصل با مقایسه با مدل مبنای ریاضی انجام می‌شود.

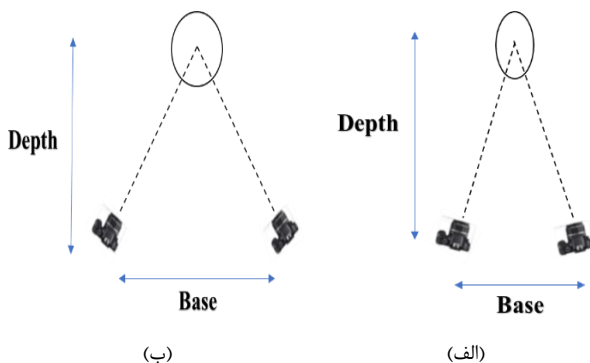
ساختار ناشی از حرکت (SfM)

اساس روش ساختار ناشی از حرکت، از نحوه ادراک اجسام توسط چشم انسان الگوبرداری شده است. انسان از طریق حرکت دادن چشم، اطلاعات زیادی در مورد ساختار سه بعدی در محیط اطراف خود درک می‌کند. هنگامی که ناظر حرکت می‌کند و اشیاء اطراف ناظر حرکت می‌کنند، اطلاعات مفید و در عین حال ثابت در تمام تصاویر شناسایی می‌شود. در حقیقت، نحوه عملکرد این روش بر اساس دید سه بعدی

نیاز دارد [۴۷]. زاویه بین بردار نرمال و محور دوربین ارتباط مستقیمی با نسبت B/D دارد. در واقع، با زیاد شدن نسبت B/D دقت بیشتری به دست می‌آید (شکل ۴) [۴۸]. در نتیجه، با حذف کردن تصاویر زائد یک شبکه عکس‌برداری با هندسه قوی به دست می‌آید و در نهایت با تعیین زاویه مناسب بین بردار نرمال و محوری نوری (θ) یک شبکه عکس‌برداری مستحکم حاصل می‌شود [۴۹، ۵۰].



شکل ۳: زاویه دید با استفاده از بردار نرمال بر سطح
Fig. 3: View angle using the normal vector of surface

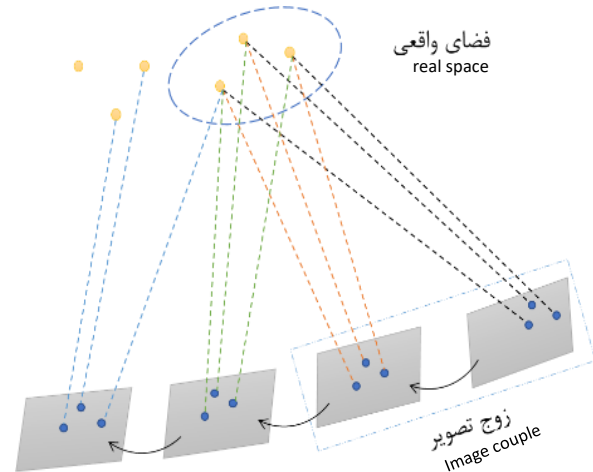


شکل ۴: تقاطع محورهای نوری و بیضی خطا. (الف) تقاطع هندسی ضعیف و نسبت B/D کم. (ب) تقاطع هندسی قوی و نسبت B/D زیاد
Fig. 4: The intersection of the optical rays and error ellipse. A) Poor geometrical intersection and low B/D ratio. B) Strong geometrical intersection and high B/D ratio

میدان دید دوربین

زاویه دید نقاط شیء از مکان‌های مختلف دوربین عامل مهمی در طول طراحی و حذف دوربین‌های زائد در شبکه تصویربرداری است. به عبارت دیگر، مکان و جهت‌های طراحی شده برای دوربین‌های تصویربرداری همان‌طور که در شکل ۵، نشان داده شد باید به گونه‌ای باشند که علی‌رغم پوشش تمامی وجه‌های شیء، هر وجه حداقل در دو تصویر حضور داشته باشد تا عمل تناظریابی صورت گیرد. چینش ایستگاه‌های عکس‌برداری شبکه باید به گونه‌ای انجام شود تا یک سازگاری و همبستگی هندسه‌ای میان ایستگاه‌های عکس‌برداری به وجود آید [۵۱].

الگوریتم SURF، یک ردیاب و توصیف‌گر ویژگی‌های محلی است. از این الگوریتم همانند الگوریتم SIFT در بینایی ماشین برای تناظریابی، شناسایی اشیاء و طبقه‌بندی استفاده می‌شود. الگوریتم SURF تا حد زیادی عملکردی مشابه به توصیف‌گر SIFT دارد و چندین برابر سریع‌تر از SIFT عمل می‌کند [۴۵].



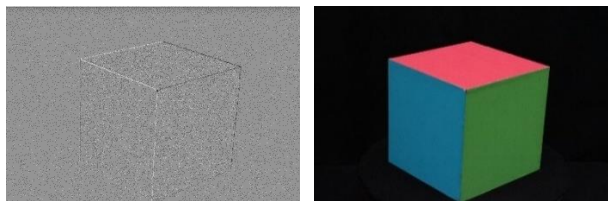
شکل ۲: مراحل تخمین مسیر دوربین در روش SfM
Fig. 2: Camera path estimation steps in SfM method

استخراج ساختار شبکه، معمولاً بر اساس خط مشی‌های متفاوتی انجام می‌گیرد که رویکرد افزایشی بیشتر از سایر رویکردها مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، تخمین ساختار و موقعیت دوربین از دنباله تصاویر معمولاً با یک گام تشخیص و انطباق (ردیابی) ویژگی برای دو تصویر متوالی آغاز می‌شود. بر اساس تناظر صورت گرفته میان دو تصویر و با کمک روش مثلث‌بندی، یک مدل سه‌بعدی اولیه از فضا ایجاد می‌شود. البته باید توجه داشت که بایستی فاصله میان دو دوربین در این دو تصویر به اندازه کافی زیاد باشد تا نتایج محاسبات اپی‌پلار (Epipolar) قابل اعتماد باشد. سپس به صورت افزایشی، همانند شکل ۲ موقعیت دوربین در تصاویر جدید بر اساس تناظر نقاط سه بعدی فضا و ویژگی‌های دو بعدی ردیابی شده در تصاویر جدید محاسبه می‌شود. با دریافت تصاویر جدید، بخش‌های جدیدی از فضا نیز قابل مشاهده خواهد بود. از این‌رو، توسعه مدل سه بعدی صحنه با استفاده از نقاط جدید و الگوریتم مثلث‌بندی ضروری است. شکل ۲، نمایی از مراحل گفته شده برای تخمین مسیر حرکت دوربین با استفاده از رویکرد افزایشی را نشان می‌دهد [۴۶].

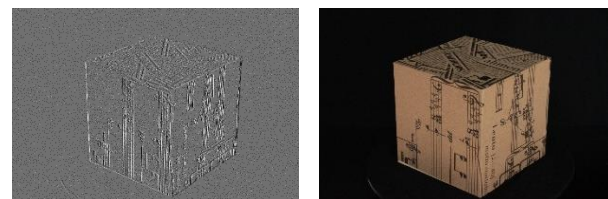
بردارهای نرمال بر سطح

در ابرنقطه تولید شده پس از تناظریابی، به ازای هر سه نقطه یک سطح تولید می‌شود و هر سطح یک بردار نرمال دارد. از بردارهای نرمال سطح برای آزمایش دید نقاط در هر دوربین استفاده می‌شود (شکل ۳). تناظریابی ابرنقاط و بازسازی مدل سه بعدی با دقت مناسب، به درصد کافی از همپوشانی، شباهت میان تصاویر و همچنین نسبت خوب B/D

خاکستری تشکیل شده باشد، جهات گرادیان محاسبه شده همسو نبوده (شکل ۸) و از یک پیکسل به پیکسل بعدی متفاوت است.



شکل ۷: (راست) تصویر اصلی با بافت ساده. (چپ) گرادیان تصویر
Fig. 7: (Right) Original image with simple texture. (Left) Image gradient



شکل ۸: (راست) تصویر اصلی با بافت پیچیده. (چپ) گرادیان تصویر
Fig. 8: (Right) Original image with complex texture. (Left) Image gradient

ارزیابی دقت ابرنقطه

به منظور ارزیابی صحت و دقت ابرنقاط تولید شده در حالت‌های مختلف در دو گروه کلی تصاویر با بافت ساده و با بافت پیچیده در مقایسه با یک مدل ریاضی از مکعب، جذر میانگین مربعات خطا مورد استفاده قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}} \quad (\text{معادله ۱})$$

که $(\hat{x}_i - x_i)$ اختلاف فاصله نقاط ابرنقطه سه بعدی و مدل ریاضی (خطا)، n تعداد نقاط و i نیز شماره نقاط است.

روند کار

هدف از اجرای این تحقیق، بررسی تأثیر طراحی شبکه عکس برداری و بافت تصاویر بر کیفیت ساخت مدل سه بعدی دقیق و تولید ابرنقطه با حداقل تعداد عکس در یک نوار با استفاده از دوربین عکس برداری رقومی است. کلیات روش پیشنهادی به طور شماتیک در فلوچارت شکل ۹ ارائه شده است.

در این تحقیق، پس از تولید ابرنقاط در دو نسخه از نرم افزار Agisoft به کارگیری دو سری تصاویر با بافت ساده و بافت پیچیده کیفیت ابرنقاط از نظر بصری و آماری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند. در روند کار برای ارزیابی کیفیت ابرنقطه در ابتدا نحوه قرارگیری ایستگاه‌های دوربین حول شیء یا به اصطلاح هندسه شبکه عکس برداری مورد بررسی قرار گرفت. به همین جهت طبق شکل ۱، پنج حالت برای شبکه عکس برداری انتخاب شد. در ادامه، همراه با تعیین زاویه بین محورهای نوری تصاویر، جهت تعریف حالت‌های عکس برداری، بافت تصاویر نیز مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از شیء با بافت پیچیده موجب تناظریابی بهتر عوارض می‌شود. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شد، تصاویر با بافت پیچیده



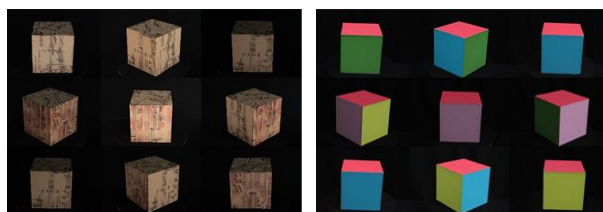
شکل ۵: محل قرارگیری دوربین‌ها. (الف) علی‌رغم حفظ پوشش تمامی وجه‌های مکعب، هر وجه در دو تصویر حضور دارد. (ب) حفظ پوشش تمامی وجه‌های مکعب، هر وجه تنها در یک تصویر حضور دارد

Fig. 5: Location of cameras. A) Despite maintaining the coverage of all the faces of the cube, each face is present in two images. B) To maintain the coverage of all the faces of the cube, each face is present in only one image

در طراحی شبکه و تعیین ایستگاه‌های دوربین، همانند شکل ۵-الف ایستگاه‌ها باید در مکان‌هایی قرار گیرند که علاوه بر پوشش تمامی وجه‌های شیء، بتوان از تصاویر اخذ شده در تناظریابی نیز استفاده نمود. نمی‌توان از تصاویر اخذ شده شکل ۵-ب در تناظریابی استفاده نمود. در مورد اجسامی که شکل هندسی منظم و مشخصی دارند مانند مکعب، توصیه می‌شود ایستگاه‌های اولیه و اصلی مقابل رئوس شیء تعیین شوند تا دو وجه شیء در میدان دید دوربین قرار گیرد.

بافت تصویر

در طراحی شبکه و تعیین ایستگاه‌های دوربین، همانند شکل ۵-الف ایستگاه‌ها باید در مکان‌هایی قرار گیرند که علاوه بر پوشش تمامی وجه‌های شیء، بتوان از تصاویر اخذ شده در تناظریابی نیز استفاده نمود. نمی‌توان از تصاویر اخذ شده شکل ۵-ب در تناظریابی استفاده نمود. در مورد اجسامی که شکل هندسی منظم و مشخصی دارند مانند مکعب، توصیه می‌شود ایستگاه‌های اولیه و اصلی مقابل رئوس شیء تعیین شوند تا دو وجه شیء در میدان دید دوربین قرار گیرد.

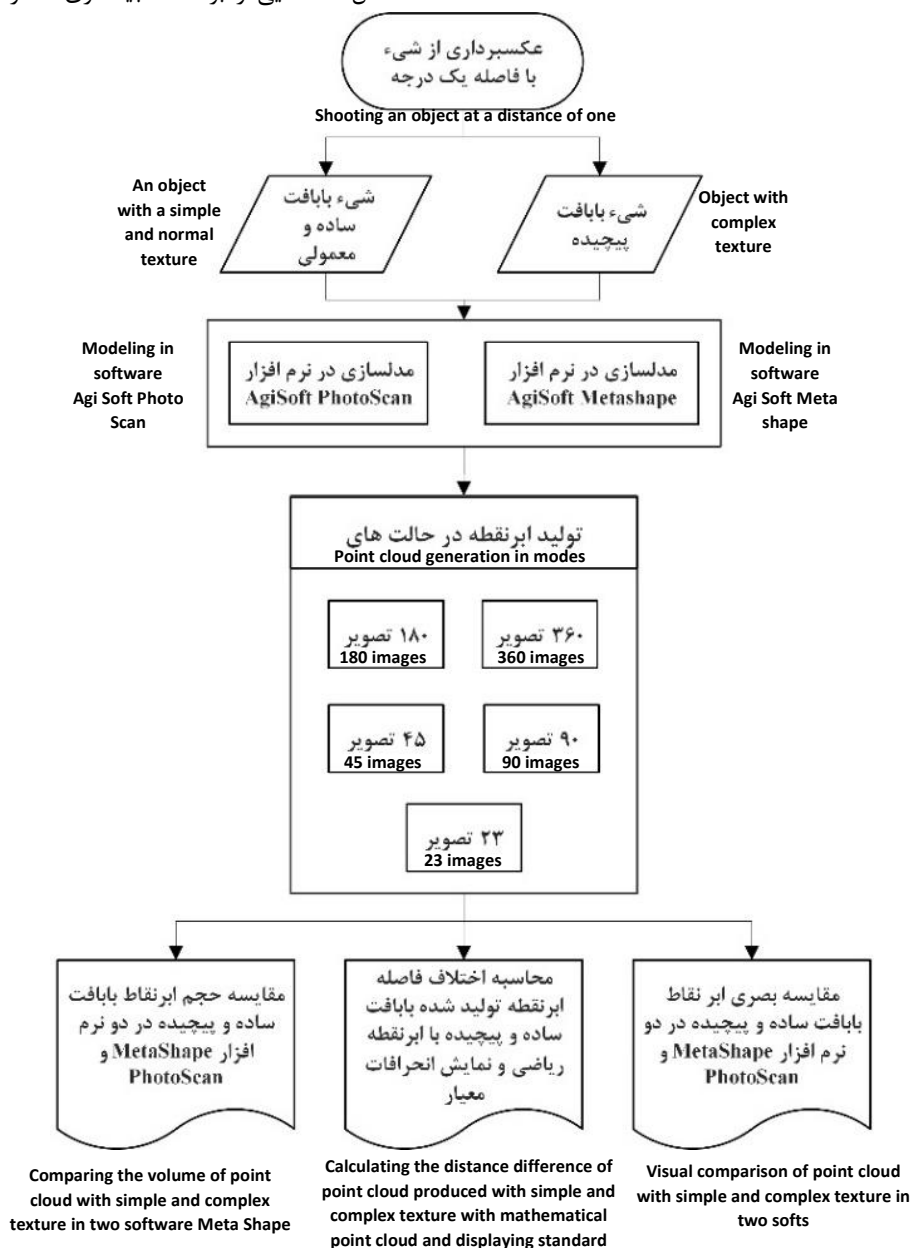


شکل ۶: (راست) تصاویر با بافت ساده و (چپ) تصاویر با بافت پیچیده
Fig. 6: (right) images with simple texture and (left) images with complex texture

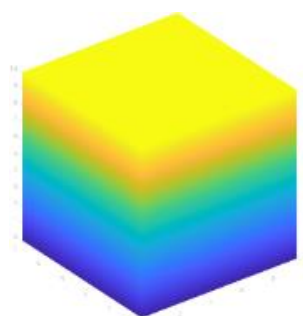
یکی از راه‌های نشان دادن وجود یا عدم وجود بافت در تصاویر استفاده از گرادیان تصویر است. چنانچه شیء مورد نظر مانند شکل ۷، دارای بافت ثابت و از طیف رنگی محدودی تشکیل شده باشد، جهات محاسبه شده توسط اپراتورهای گرادیان، همگی هم‌سو بوده و تنها لبه‌های عارضه مشخص می‌شود. در واقع، از نظر گرادیان اضلاع مکعب با گرادیان پس‌زمینه تفاوت چندانی ندارد. ولی چنانچه مانند شکل ۸-الف شیء مورد نظر دارای بافت پیچیده و الگوی غیرثابت از مقادیر درجات

برای مقایسه کیفیت ابرنقطه ایجاد شده از یک مدل ریاضی عاری از خطا استفاده می‌شود. این مدل ریاضی به صورت یک مکعب (با ابعاد واقعی شیء $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) به صورت ابرنقطه با تراکم مناسب شبیه‌سازی شد. شکل ۱۰ شمایی از ابرنقطه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

گرادین‌های پیچیده و به دنبال آن جهت‌های گرادین غیر هم‌سو تولید می‌کنند و در مقابل آن می‌توان به شکل ۷ اشاره کرد که تصاویر با بافت ساده گرادین‌های یکسان تولید می‌کنند.



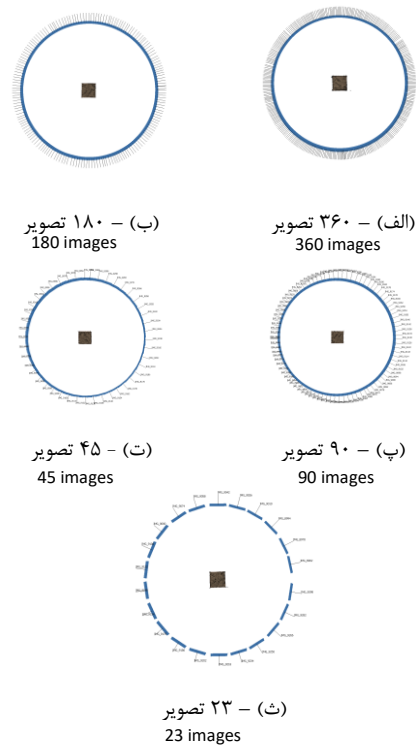
شکل ۹: روند نمای کلی روش پیشنهادی
Fig. 9: Overview process of the proposed method



شکل ۱۰: ابرنقطه ریاضی که بر اساس ارتفاع رنگ‌آمیزی شد.
Fig. 10: Reference point cloud which was colored based on height

تولید ابرنقطه

برای بررسی تأثیر بافت تصویر بر کیفیت ابرنقطه، ابرنقطه برای مکعب با بافت ساده و پیچیده تولید شد و برای بررسی تأثیر تعداد ایستگاه‌های عکس‌برداری دوربین ۳۶۰ عکس با فاصله زاویه‌ای یک درجه (به صورت یک درجه یک درجه) از جسم اخذ شد. در مرحله بعدی با در نظر گرفتن فاصله زاویه یکنواخت بین تصاویر، از تعداد تصاویر کاسته شد. پنج حالت برای تصاویر با بافت ساده و پیچیده در نظر گرفته شد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱: ایستگاه‌های تصویربرداری در حالت‌های مختلف
Fig. 11: Image location in different modes

مقایسه عملکرد *Metashape* و *Photoscan*

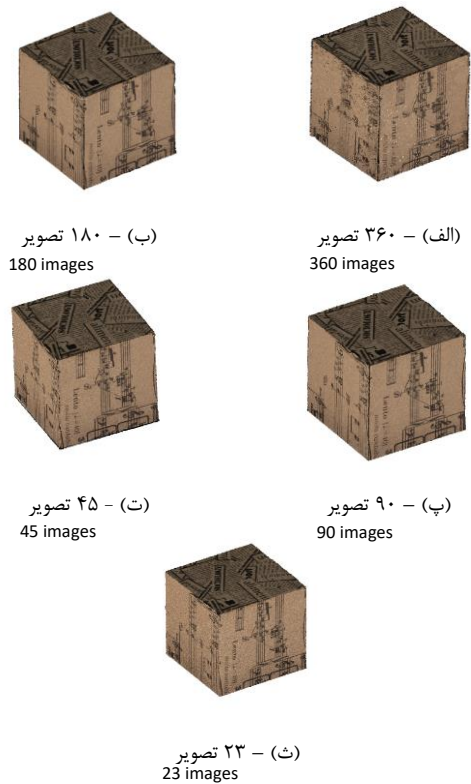
طی چند دهه گذشته نرم‌افزارهای متعددی مبتنی بر تکنیک SfM توسعه داده شدند. از جمله نرم‌افزارهای تولید مدل سه بعدی با بهره‌گیری از تصاویر، می‌توان نرم‌افزار *Agisoft* را نام برد. در این تحقیق، دو نسخه از نرم‌افزار *Agisoft* با نام‌های *Photoscan* (1.4.0.5076) و *Agisoft* (1.5.2.7838) از نظر تولید ابرنقطه سه بعدی و تشخیص نقاط متناظر با یکدیگر مقایسه می‌شوند. ابرنقطه با استفاده از دو نسخه نرم‌افزار *Agisoft* انجام شده و تحلیل‌های بصری و هندسی بر روی خروجی‌های این نرم‌افزار انجام شد. [۳۶، ۳۷].

در شکل ۱۲ نتایج ابرنقاط تولید شده از تصاویر با بافت ساده در نسخه *Photoscan* نمایش داده شد. مقایسه بصری ابرنقاط تولید شده حاکی از آن است که بهترین نتیجه در حالت چهارم یعنی ابرنقطه حاصل از ۴۵ به دست آمده است. به دلیل ایجاد شبکه تصویربرداری قوی ابرنقطه ایجاد شده تمامی بخش‌های مکعب را شامل شده است و هیچ‌گونه نویزی در لبه‌ها دیده نمی‌شود. پس از حالت چهارم می‌توان به حالت سوم (شکل ۱۲-پ) اشاره کرد که ابرنقطه ایجاد شده بسیار شبیه ابرنقطه

حالت چهارم است، تنها با این تفاوت که به علت وجود تصاویر اضافی حساسیت نرم‌افزار برای یافتن نقاط متناظر بالا رفته و در نتیجه، ابرنقطه حجیم‌تری تولید کرده است. در حالت‌های اول و دوم (به ترتیب ۳۶۰ و ۱۸۰ تصویر) نرم‌افزار نیز در حساس‌ترین حالت قرار گرفته و ابرنقطه کاملی از مکعب ایجاد شده است. در حالت پنجم (۲۳ تصویر) ابرنقطه ایجاد شده به علت کمبود عکس ناقص بوده و نرم‌افزار در تناظریابی وجه‌هایی از مکعب دچار مشکل شده است. علت نقص‌های موجود را می‌توان به عدم حضور نقاط شیء در حداقل دو تا سه تصویر و ناتوانی الگوریتم‌های تناظریابی در شناسایی نقاط متناظر اشاره کرد. در شکل ۱۳ نتایج ابرنقاط تولید شده از تصاویر با بافت پیچیده در نسخه *Photoscan* نمایش داده شد. در همه حالت‌ها، ابرنقطه کامل و بدون هیچ‌گونه نقصی ایجاد شده است و تنها تفاوت حالت‌های مختلف، حجم ابرنقطه و زمان پردازش است. با به کارگیری از بافت‌های پیچیده در تصاویر اخذ شده، عوارض تصویر افزایش پیدا می‌کند و حضور عوارض اضافی در تصاویر در روند تناظریابی بسیار مؤثر بوده است.

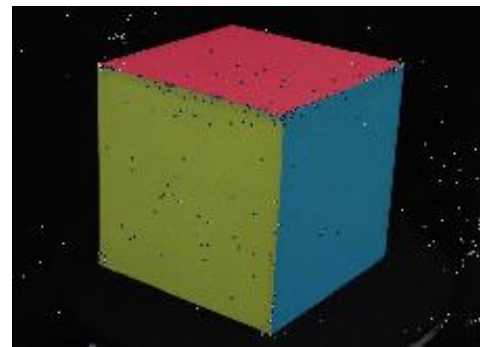
شکل ۱۴ نتایج ابرنقاط تولید شده از تصاویر با بافت ساده در نسخه *Metashape* را نمایش می‌دهد. با تفسیر بصری آن می‌توان دریافت که در حالت اول و دوم که از تصاویر با زاویه بین محورهای نوری یک و دو درجه استفاده شده، شبکه تصویربرداری ضعیفی را ایجاد کرده است. در این دو حالت، ابرنقطه دچار نقصان شده و این نسخه نرم‌افزار نتوانسته به خوبی ابرنقطه کاملی را ایجاد کند. برخلاف نسخه *PhotoScan*، بهترین ابرنقطه ساخته شده در نسخه *Metashape* مربوط به حالت سوم (۹۰ عکس) بوده و بعد از آن می‌توان به حالت چهارم (۴۵ عکس) اشاره کرد. ابرنقاط تولید شده در نسخه *Metashape* با وجود کامل نبودن در تعدادی از حالت‌ها، دارای نقاط زائد و نویز کمتری در اطراف لبه‌ها هستند. در حالت شکل ۱۴-ث ابرنقطه ایجاد شده ناقص بوده و همانند *Photoscan* علت نقص موجود در این حالت را می‌توان به عدم حضور نقاط شیء در حداقل دو تا سه تصویر اشاره کرد. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده، ابرنقاط تولید شده با استفاده از تصاویر با بافت پیچیده در حالت‌های مختلف از نظر بصری مشابه نتایج *Photoscan* (شکل ۱۳) در حالات مختلف هستند.

برای ساخت ابرنقاط با تعداد تصاویر کم‌تر از ۴۵ تصویر علاوه بر شبکه‌ای مستحکم، وجود عوارض مختلف در تصویر الزامی است. همان‌طور در شکل ۱۶ نشان داده شده در هنگام استفاده از تصاویر با بافت ساده الگوریتم‌های تناظریابی در پس‌زمینه تصویر نقاط متناظر را شناسایی کرده‌اند. به عبارت دیگر، توصیف‌گرهای ایجاد شده برای نقاط صفحات مکعب وابستگی بالایی با توصیف‌گرهای ایجاد شده با نقاط پس‌زمینه دارند. از طرفی الگوریتم‌های تناظریابی به علت وجود ویژگی‌های زیاد، توصیف‌گرهای مستقل و قدرتمندی تولید کرده‌اند که وابستگی بسیار کمی با توصیف‌گرهای پس‌زمینه دارد و به همین دلیل تمامی نقاط بر روی اضلاع مکعب مشخص شدند. پس از مشاهده نتایج ابرنقطه تولید شده با تصاویری با بافت پیچیده و تفسیر بصری می‌توان دریافت که حضور بافت‌های پیچیده در تصاویر در مقایسه با ابرنقاط تولید شده با بافت ساده تأثیر بسزایی دارند.

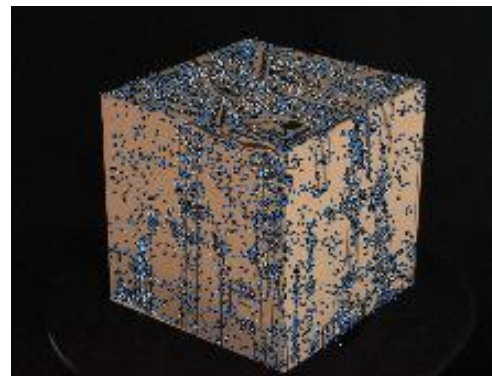


شکل ۱۴: ابرنقطه‌های متراکم ایجاد شده در حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت پیچیده در نرم‌افزار Photoscan

Fig. 14: Dense cloud created in various modes with complex textured images in Photoscan software



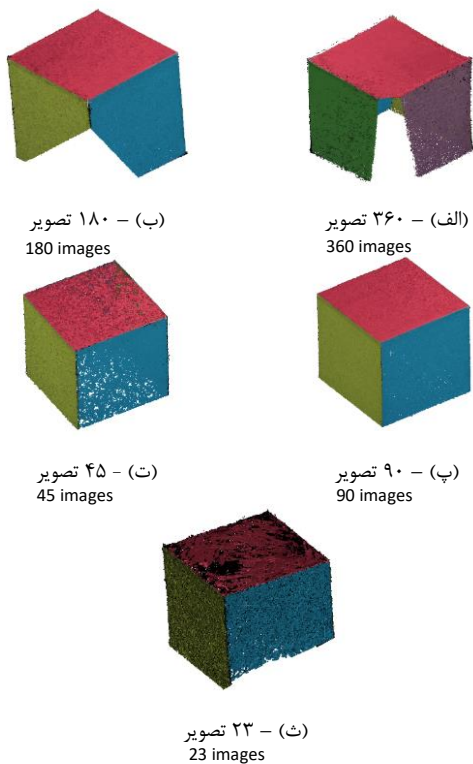
(الف)



(ب)

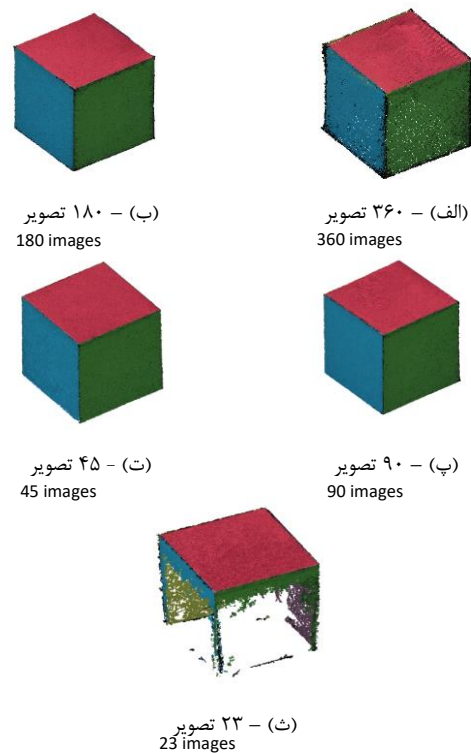
شکل ۱۲: تأثیر بافت در تناظریابی نقاط. (الف) تصاویر با بافت ساده. (ب) تصاویر با بافت پیچیده.

Fig. 12: The effect of texture on matching points. (A) Images with simple texture. (B) Images with complex texture



شکل ۱۵: ابرنقطه‌های متراکم ایجاد شده در حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت ساده در نرم‌افزار Metashape

Fig. 15: Dense cloud created in various modes with simple textured images in Metashape software



شکل ۱۳: ابرنقطه‌های متراکم ایجاد شده در حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت ساده در نرم‌افزار Photoscan

Fig. 13: Dense cloud created in various modes with simple textured images in Photoscan software

جدول ۱: مقایسه خطای کمترین مربعات (میلی‌متر) ابرنقاط

برای حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت ساده در نرم‌افزار Photoscan و Metashape

Table 1: Comparison of the least squares error (mm) of the point cloud for different modes on images with simple texture in Photoscan and Metashape software

RMSE (mm)		حالت state of
PhotoScan	Metashape	
0.47	0.10	اول (۳۶۰ تصویر) First (360 images).
0.02	0.03	دوم (۱۸۰ تصویر) Second (180 images).
0.05	0.05	سوم (۹۰ تصویر) Third (90 images).
0.01	0.09	چهارم (۴۵ تصویر) Fourth (45 pictures).
0.15	0.46	پنجم (۲۳ تصویر) Fifth (23 pictures).

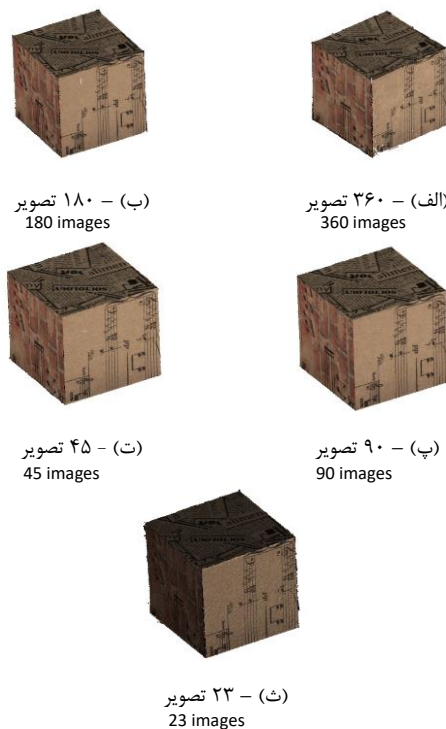
جدول ۲: مقایسه خطای کمترین مربعات (میلی‌متر) ابرنقاط برای حالت‌های مختلف

با تصاویر با بافت پیچیده در نرم‌افزار Photoscan و Metashape

Table 2: Comparison of the least squares error (mm) of the point cloud for different modes on images with complex texture in Photoscan and Metashape software

RMSE (mm)		حالت state of
PhotoScan	Metashape	
0.03	0.06	اول (۳۶۰ تصویر) First (360 images)
0.04	0.04	دوم (۱۸۰ تصویر) Second (180 images)
0.03	0.04	سوم (۹۰ تصویر) Third (90 images)
0.02	0.05	چهارم (۴۵ تصویر) Fourth (45 pictures)
0.11	0.46	پنجم (۲۳ تصویر) Fifth (23 pictures)

همین‌طور، تغییرات مشابه توضیحات قبل در ستون Metashape در حالت دوم (۱۸۰ تصویر) نسبت به حالت سوم (۹۰ تصویر) دیده می‌شود. جدول ۲ نیز مقادیر خطای کمترین مربعات مربوط به ابرنقاط ساخته‌شده توسط تصاویر با بافت پیچیده در دو نرم‌افزار Metashape و Photoscan را نشان می‌دهد. نتایج بهترین ابرنقطه در جدول ۲ مربوط به حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۲ میلی‌متر در نرم‌افزار Photoscan و حالت سوم (۹۰ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۴ میلی‌متر در نرم‌افزار Metashape است.

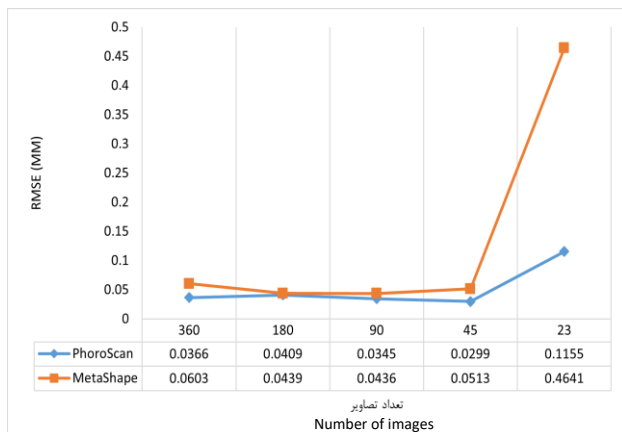


شکل ۱۶: ابرنقطه‌های متراکم ایجادشده در حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت پیچیده در نرم‌افزار Metashape

Fig. 16: Dense cloud created in various modes with simple textured images in Metashape software

ارزیابی و صحت‌سنجی ابرنقاط

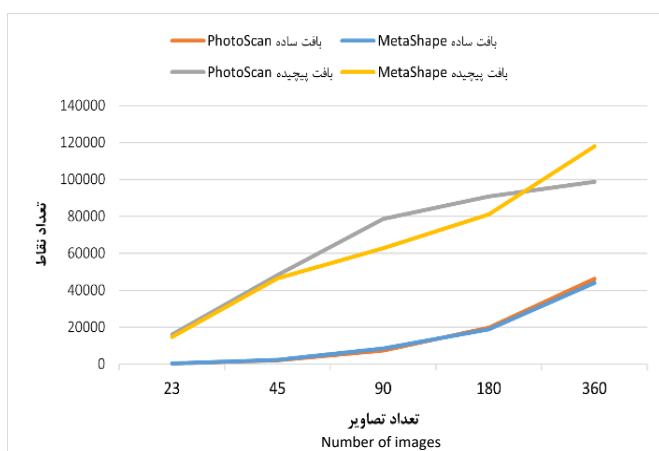
برای ارزیابی ابرنقاط تولید شده در حالات مختلف با استفاده از تصاویر نمی‌توان تنها به تفسیر بصری اکتفا کرد. از این‌رو، برای صحت‌سنجی ابرنقاط تولید شده از تکنیک‌های آماری و هندسی استفاده شد. در این بخش، ابرنقاط تولید شده از طریق روش فتوگرامتری با ابرنقطه‌ای که به روش ریاضی تولید شده بود، مقایسه شدند و در نهایت میزان اختلاف این ابرنقاط با هم محاسبه شد. جدول ۱ مقادیر خطای کمترین مربعات مربوط به ابرنقاط ساخته شده توسط تصاویر با بافت ساده در دو نرم‌افزار Photoscan و Metashape را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، تفسیر بصری بخش (۲-۳) در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. در ستون مربوط به نرم‌افزار Photoscan با افزایش تعداد تصاویر علاوه بر نویزی شدن ابرنقطه، میزان شباهت مدل ساخته شده به مکعب نیز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج، بهترین مدل سه‌بعدی که شباهت زیادی با مکعب دارد مربوط به حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۱ میلی‌متر است. در مورد نرم‌افزار Metashape بهترین مدل مربوط به حالت سوم (۹۰ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۵ میلی‌متر است. طبق جدول ۱ در ستون مربوط به Photoscan، مقدار خطای کمترین مربعات حالت پنجم (۲۳ تصویر) کم‌تر از حالت اول (۳۶۰ تصویر) به‌دست آمده است. این نتیجه به دلیل وجود نقص در ابرنقطه حالت پنجم است. به‌عبارت‌دیگر، الگوریتم تناظریابی توانسته تعداد نقاط کمی را تشخیص دهد که اختلاف کمی با نقاط متناظرشان در ابرنقطه ریاضی داشته و به همین علت مقدار خطای کمترین مربعات آن کمتر از حالت اول محاسبه شد.



شکل ۱۸: نمودار خطای کمترین مربعات (میلی‌متر) ابرنقاط برای حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت پیچیده در نرم‌افزار PhotoScan و MetaShape

Fig. 18: Least squares (mm) error diagram of superpoints for different modes on images with complex texture in Photoscan and Metashape software

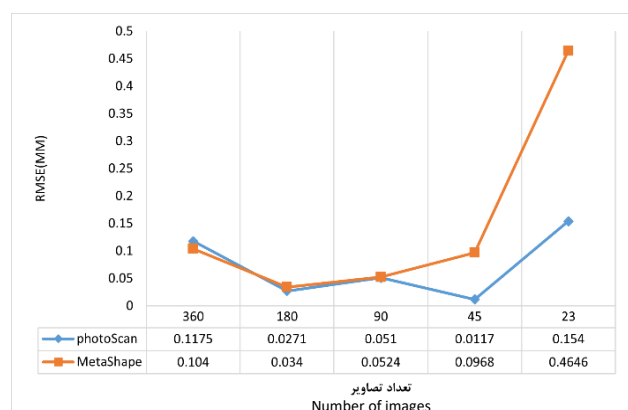
در شکل ۲۱ تا ۲۴ اختلاف فاصله بین ابرنقطه مدل‌سازی شده و ابرنقطه ریاضی در حالت‌های مختلف به صورت بصری نمایش داده شده است. به طور کلی در تمامی حالات مربوط به نرم‌افزارهای Photoscan و Metashape اختلاف فاصله در لبه‌ها بیشتر دیده می‌شود. به عبارت دیگر در مدل‌های ایجادشده لبه‌ها به سمت بیرون کشیده شده‌اند و این بیرون‌زدگی لبه‌ها ابرنقاط حاصل از تصاویر با بافت ساده بیشتر دیده می‌شود (شکل ۲۱ و ۲۳). محدوده خطای تمامی حالت‌ها به جز حالتی که از ۲۳ تصویر استفاده شد، نزدیک یکدیگر هستند و تفاوت چندانی ندارند؛ اما حالاتی که مربوط به اختلاف فاصله ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر با بافت پیچیده در Photoscan است (شکل ۲۲) دارای خطای کمتری نسبت به بقیه حالت‌ها است. در شکل ۲۴ با افزایش تعداد تصاویر مقدار اختلاف بین دو ابرنقطه ریاضی و مدل‌سازی شده بیشتر می‌شود و این اختلاف در حالت ۱۸۰ تصویر بیشتر از بقیه حالت‌ها مشاهده می‌شود. در این شکل برخلاف حالت‌های دیگر علاوه بر لبه‌ها، سطح مکعب نیز با ابرنقطه ریاضی دارای اختلاف است.



شکل ۱۹ - نمودار تراکم ابرنقاط تنک
Fig. 19: Number of points in thin point cloud

با توجه نتایج مقدار خطای کمترین مربعات از اختلاف فاصله بین ابرنقطه مدل‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزارها و ابرنقطه ریاضی در بیشتر حالت‌ها شبیه هم هستند. در حالت‌هایی که از ۳۶۰، ۱۸۰ و یا ۹۰ تصویر برای مدل‌سازی استفاده شد اختلاف خطای کمترین مربعات تقریباً ۰/۰۱ میلی‌متر بوده ولی در حالت ۴۵ و ۲۳ تصویر این اختلاف به ترتیب به ۰/۰۸ و ۰/۳۱ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱۷). نمودار تغییرات خطای کمترین مربعات ابرنقطه حاصل از تصاویری با بافت پیچیده را نشان می‌دهد. نتایج ابرنقطه با بافت پیچیده در نمودار شکل ۱۸ نمایش داده شد که همانند نمودار شکل ۱۷ در ابرنقاط حاصل از ۳۶۰، ۱۸۰ و ۹۰ تصویر است و اختلاف زیادی بین نتایج دو نرم‌افزار مشاهده نمی‌شود. در حالتی که از ۴۵ تصویر استفاده شد این اختلاف به ۰/۰۲ میلی‌متر رسیده و در مقایسه با تصاویر با بافت ساده ۰/۰۶ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. همچنین، در حالت ۲۳ تصویر این اختلاف به ۰/۰۴ میلی‌متر رسیده است.

نتایج شکل ۱۹ و ۲۰ تعداد ابرنقطه تنک و ابرنقطه متراکم را نشان می‌دهد طبق شکل ۱۹ ابرنقطه تنک تولید شده در نرم‌افزار Photoscan در اکثر حالت‌ها بیشتر از نرم‌افزار Metashape است و علت آن را می‌توان وجود نویز در ابرنقاط در Photoscan که در بخش تفسیر بصری توضیح داده شد، اشاره کرد. در این حالت، نمودار تغییرات تراکم ابرنقاط تنک نمایش داده شد که روند صعودی تراکم ابرنقاط را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل، ابرنقطه تولید شده حاصل از تصاویر با بافت پیچیده به علت وجود الگوهای متفاوت برای تناظریابی، ابرنقطه متراکم‌تری نسبت به ابرنقاط تولید شده حاصل از تصاویر با بافت ساده ارائه می‌دهد. ولی در شکل ۲۰ با وجود صعودی بودن تراکم ابرنقاط، تصاویر با بافت ساده تعداد نقاط بیشتری تولید می‌کنند که وجود نویز نیز در افزایش این حجم ابرنقطه بی‌تأثیر نیست. در این حالت، روند کلی افزایش تعداد ابرنقاط در ابرنقاط متراکم، مشابه ابرنقطه تنک بوده و اختلاف چندانی بین آن‌ها مشاهده نمی‌شود.

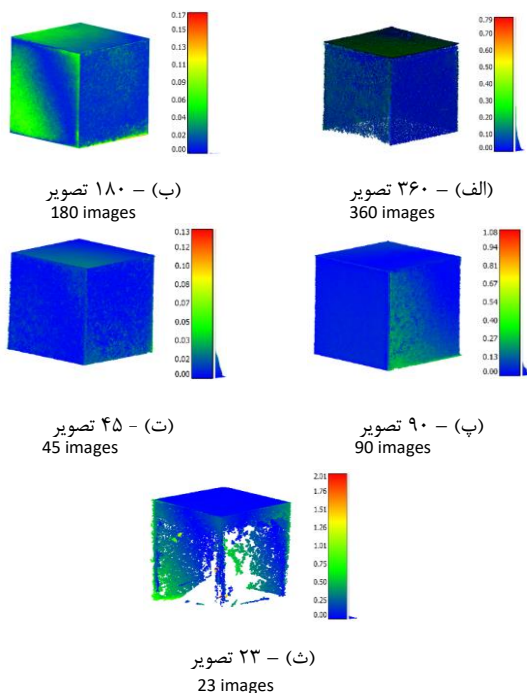


شکل ۱۷: نمودار خطای کمترین مربعات (میلی‌متر) ابرنقاط برای حالت‌های مختلف با تصاویر با بافت ساده در نرم‌افزار PhotoScan و MetaShape

Fig. 17: Least squares (mm) error diagram of point cloud for different modes on images with simple texture in Photoscan and Metashape software

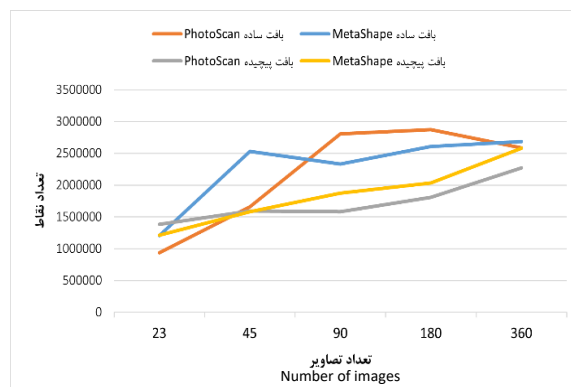
در کنار ارزیابی‌های کمی صورت گرفته، مقدار تغییرات و انحراف معیارهای ابرنقاط نسبت به ابرنقطه ریاضی به صورت بصری در شکل ۲۱ تا ۲۴ نشان داده شدند. به طور کلی در تمامی حالات مربوط به نرم‌افزارهای Photoscan و Metashape اختلاف ابرنقطه مبنا (ابرنقطه ریاضی) در لبه‌ها بیشتر دیده می‌شود. در بین این حالت‌ها در شکل ۲۳ که مربوط به اختلاف فاصله ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر با بافت پیچیده در Photoscan است، خطای کمتری نسبت به بقیه حالت‌ها مشاهده می‌شود. فقط در حالتی که از ۴۵ تصویر استفاده شد مقداری در لبه‌ها با ابرنقطه ریاضی تفاوت وجود دارد که این برتری نسخه Photoscan را نشان می‌دهد. در انتها پارامترهای کالیبراسیون برای حالات بهینه یعنی استفاده از ۴۵ تصویر برای تصاویر با بافت پیچیده و بافت ساده اجرا شد و اختلاف چشم‌گیری مشاهده نشد.

در کنار ارزیابی و تحلیل نتایج نیاز است تا به محدودیت‌های روش پیشنهاد شده در این تحقیق اشاره کرد. از جمله محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به دو مورد جنس اشیا و شبکه عکسبرداری اشاره نمود. روش اجرا شده در مواجهه با اشیایی که سطح شیشه‌ای و یا براق دارند، کارایی ندارد. زیرا تکنیک ساختار ناشی از حرکت همان‌طور که پیشتر بیان شد، تنها توانایی مدل‌سازی اشیایی را دارد که دارای بافت مناسب هستند. از طرفی روند عکس‌برداری، تنها در یک ردیف انجام شده است. به عبارت دیگر شبکه عکس‌برداری به صورت نیم‌کره اجرا نشده است. در روش اجرا شده در این تحقیق، در صورت استفاده از اشیای پیچیده که شکل هندسی مشخصی ندارد (همانند آثار باستانی)، امکان ایجاد نواحی پنهان زیاد می‌شود و نیاز است تا به صورت نیم‌کره و بیشتر از یک ردیف از شیء مدنظر عکس‌برداری کرد.



شکل ۲۱: توزیع مکانی باقی‌مانده (میلی‌متر) ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر بافت ساده در Photoscan

Fig. 21: Spatial distribution of residuals (mm) Reference point cloud and point cloud with simple texture images in Photoscan



شکل ۲۰: نمودار تراکم ابرنقاط متراکم

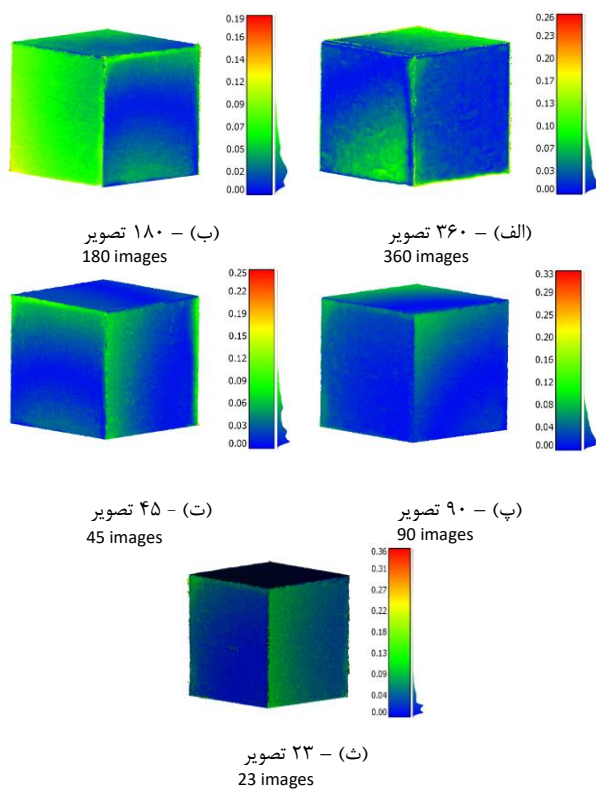
Fig. 20: Number of points in thin point cloud

تحلیل نتایج

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در این تحقیق، پس از تولید ابرنقاط در دو نسخه از نرم‌افزار Agisoft و به کارگیری دو سری تصاویر با بافت ساده و بافت پیچیده کیفیت ابرنقاط از نظر بصری و آماری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفتند.

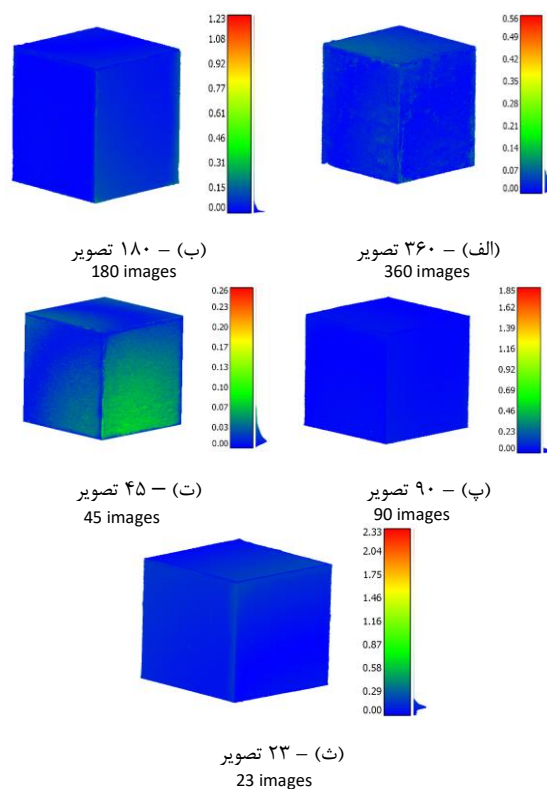
ارزیابی آماری ابرنقاط و مقایسه آن با ابرنقاط ریاضی تکمیل‌کننده ارزیابی و مشاهدات بصری ابرنقاط است. طبق جدول ۱ بهترین ابرنقطه با استفاده از تصاویر با بافت ساده در نرم‌افزار Photoscan در حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۱ میلی‌متر و همچنین حالت ذکر شده در نرم‌افزار Metashape نیز با دقت کمتری ۰/۰۹ میلی‌متر تولید شد. طبق نتایج جدول ۲ بهترین ابرنقطه تولید شده با استفاده از تصاویر با بافت پیچیده در نرم‌افزار Photoscan در حالت چهارم (۴۵ تصویر) با مقدار خطای ۰/۰۲ میلی‌متر و همچنین حالت ذکر شده در نرم‌افزار Metashape نیز با دقت کمتری ۰/۰۵ میلی‌متر تولید شد. بهترین مدل تولید شده در نرم‌افزار Metashape مربوط به حالت سوم (۹۰ تصویر) با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر در تصاویر با بافت ساده و ۰/۰۴ میلی‌متر در تصاویر با بافت پیچیده است؛ که نشان می‌دهد نرم‌افزار Photoscan توانسته در این زمینه بهتر از Metashape عمل کند. در مورد وجود نویز و نقاط اضافی در ابرنقطه Metashape توانسته این موضوع را مدیریت کند ولی طبق شکل ۱۴ در مورد کامل بودن ابرنقطه تولید شده و وجود نقص هنگام استفاده از تصاویر با بافت ساده نسخه Metashape دچار مشکل شده و Photoscan در این زمینه بهتر عمل کرده است.

پس از بررسی کیفیت و ارزیابی ابرنقاط، تراکم نقاط تولید شده دو نرم‌افزار در حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. طبق جدول ۳ حجم ابرنقطه تنک تولید شده در نرم‌افزار Photoscan در اکثر حالت‌ها بیشتر از نرم‌افزار Metashape است. طبق نتایج نمودارهای شکل ۱۹ و ۲۰ روند افزایش حجم ابرنقاط صعودی است. با توجه به نتایج، تصاویر با بافت پیچیده ابرنقطه حجیم‌تری نسبت به تصاویر با بافت ساده تولید می‌کنند. از طرف دیگر، در شکل ۱۹ اختلاف زیادی بین نمودارها تغییرات حجم ابرنقطه تولید شده با تصاویر با بافت ساده و با بافت پیچیده وجود دارد که اختلاف زیادی در بین نمودارهای شکل ۲۰ مشاهده نمی‌شود.



شکل ۲۴: توزیع مکانی باقی‌مانده (میلی‌متر) ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر با بافت پیچیده در Metashape

Fig. 24: Spatial distribution of residuals (mm) of Reference point cloud and point cloud with complex texture images in Metashape

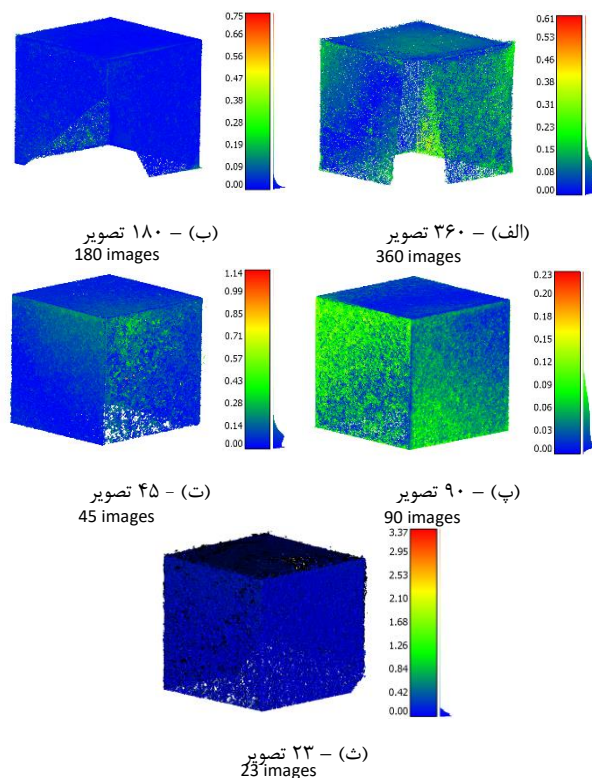


شکل ۲۲: توزیع مکانی باقی‌مانده (میلی‌متر) ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر با بافت پیچیده در Photoscan

Fig. 22: Spatial distribution of residuals (mm) Reference point cloud and point cloud with complex texture images in Photoscan

نتیجه‌گیری

تعداد بهینه عکس برای تهیه یک مدل سه بعدی همواره یک چالش اصلی در مدل‌سازی سه بعدی به روش فتوگرامتری است. تحقیقات انجام‌شده در این خصوص بیشتر بر روی دقت نهایی اندازه‌گیری‌های سه بعدی متمرکز بوده و کیفیت سطح (رویه) ایجاد شده سه بعدی مورد توجه قرار نگرفته است. از این‌رو، در این تحقیق برای اولین بار کیفیت رویه تولید شده به روش فتوگرامتری توسط دو نسخه رایج نرم‌افزار Agisoft که محبوبیت زیادی در تولید مدل سه بعدی با استفاده از عکس‌های رقومی دارد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این مقاله، به بررسی تأثیر طراحی شبکه عکس‌برداری و بافت تصاویر برای ساخت مدل سه بعدی دقیق و باکیفیت، با حداقل تعداد عکس در یک نوار عکس‌برداری با استفاده از دوربین عکس‌برداری رقومی پرداخته شد. برای ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی فتوگرامتری با تعداد تصاویر مختلف، از یک مکعب به دلیل داشتن شکل هندسی ساده و معلوم استفاده شد. در کنار تحلیل هندسی شبکه عکس‌برداری، کیفیت و تأثیر بافت تصاویر بر کیفیت ابرنقطه نیز مورد بررسی قرار گرفت. به همین جهت، از دو بافت متفاوت به‌عنوان یک معیار مستقل استفاده شد تا تأثیر بافت ساده و پیچیده در تناظرایی نقاط و در نهایت در تولید ابرنقطه بررسی شود. لازم به ذکر است که تعداد عکس‌ها برای تولید مدل سه بعدی در هیچ مرجعی بیان نشده و همیشه بیشترین تعداد عکس توصیه شده است. با توجه به تحقیق صورت گرفته این موضوع در عمل همواره صحیح نبوده



شکل ۲۳: توزیع مکانی باقی‌مانده (میلی‌متر) ابرنقطه ریاضی و ابرنقطه با تصاویر با بافت ساده در Metashape

Fig. 23: Spatial distribution of residuals (mm) Reference point cloud and point cloud with simple texture images in Metashape

- [14] Lane, S., T. James, and M. Crowell, Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record*, 2000. 16(95): p. 793-821.
- [15] Fonstad, M.A., et al., Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and Landforms*, 2013. 38(4): p. 421-430.
- [16] Westoby, M.J., et al., 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 2012. 179: p. 300-314.
- [17] Natan, M., C. Jim, and L. Stuart N., Structure from motion (SFM) photogrammetry. 2015.
- [18] Mostafavi, A., M. Scaioni, and V. Jordanov, Photogrammetric solutions for 3d modeling of cultural heritage sites in remote areas. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019. 42: p. 765-772.
- [19] Spodek, J.C. and C.K. Harrison, Creating Virtual Models with Digital Photogrammetry: Pertev Paşa Mosque (İzmit, Turkey). *Preservation Education & Research*, 2020. 12(1): p. 96-115.
- [20] Grau González-Quevedo, E.R., et al., The Use of 3D Photogrammetry in the Analysis, Visualization, and Dissemination of the Indigenous Archaeological Heritage of the Greater Antilles. *Open Archaeology*, 2021. 7(1): p. 435-453.
- [21] Esmaeelpour, M., Evaluation of a method for justifying video-based video frames for 3D image reconstruction. 2009, M. Sc. Thesis, Department of Surveying Engineering, University of Tehran. (In
- [22] Ahmadabadian, A.H., et al., A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013. 78: p. 157-167.
- [23] Izadi, S., et al. KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera. in *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*. 2011.
- [24] Kaartinen, H., et al., Benchmarking the performance of mobile laser scanning systems using a permanent test field. *Sensors*, 2012. 12(9): p. 12814-12835.
- [25] Bräuer-Burchardt, C., P. Kühmstedt, and G. Notni. Combination of air-and water-calibration for a fringe projection based underwater 3d-scanner. in *International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*. 2015. Springer.
- [26] Singh, S.P., K. Jain, and V.R. Mandla, 3D scene reconstruction from video camera for virtual 3d city modeling. *American Journal of Engineering Research*, 2014. 3(1): p. 140-148.
- [27] Nikolov, I. and C. Madsen. Benchmarking close-range structure from motion 3D reconstruction software under varying capturing conditions. in *Euro-Mediterranean Conference*. 2016. Springer.
- [28] Gabara, G. and P. Sawicki. Accuracy study of close range 3D object reconstruction based on point clouds. in *2017 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*. 2017. IEEE.
- [29] Saadat Sarasht, M., Samadzadegan, Farhad. Camera placement in industrial photogrammetry, multi-evolutionary optimization approach.
- [30] Hosseininaveh, A., et al. Automatic image selection in photogrammetric multi-view stereo methods. 2012. *Eurographics Association*.
- [31] Wenzel, K., et al., Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 2013. 5: p. W1.
- [32] Alsadik, B., M. Gerke, and G. Vosselman, Optimal camera network design for 3D modeling of cultural heritage. *ISPRS Annals of*

و در مواردی با وجود عکس‌های زیاد کیفیت مدل سه‌بعدی علی‌رغم صرف زمان پردازش زیاد افزایش نیافته و تنها موجب تراکم ابرنقطه شده که این افزایش تراکم به دلیل افزایش نویز در ابرنقطه است.

مشارکت نویسندگان

در این مقاله، نویسندگان به نسبت سهم برابر مشارکت داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمام افرادی که در جمع‌آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها ما را در این تحقیق یاری رساندند، تشکر و تقدیر می‌نمایند.

تعارض منافع

«هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

- [1] Quan, L., *Image-based modeling*. 2010: Springer Science & Business Media.
- [2] Alsadik, B., et al., Robust extraction of image correspondences exploiting the image scene geometry and approximate camera orientation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013. 5: p. W1.
- [3] Lerma García, J.L., et al., From digital photography to photogrammetry for cultural heritage documentation and dissemination. *Disegnarecon*, 2013. 6(12): p. 1-8.
- [4] Luna, O., Basics of photogrammetry for VR professionals: 3D visualization of cultural heritage objects. *Visual Resources Association Bulletin*, 2018. 45(1).
- [5] Lauro, V. and V. Lombardo, The Cataloging and Conservation of Digital Survey in Archaeology: A Photogrammetry Protocol in the Context of Digital Data Curation. *Heritage*, 2023. 6(3): p. 3113-3136.
- [6] Ahmet, U. and M. Uysal, Kültürel mirasın etkileşimli keşfi için mobil artırılmış gerçeklik ve web tabanlı görselleştirme teknolojilerinin kullanılması: Sfenks heykeli örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020. 20(6): p. 1024-1031.
- [7] Remondino, F. and S. El-Hakim, Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, 2006. 21(115): p. 269-291.
- [8] Kiamehr, R., Multi object optimization of geodetic Network. *NCC Geomatics*, 2003. 82.
- [9] Barazzetti, L., M. Scaioni, and F. Remondino, Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 2010. 25(132): p. 356-381.
- [10] FRASER, C., Limiting error propagation in network design((in photogrammetry)). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1987. 53: p. 487-493.
- [11] Fraser, C.S., Network design considerations for non-topographic photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1984. 50(8): p. 1115-1126.
- [12] Fraser, C.S. and S. Cronk, A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2009. 64(3): p. 328-333.
- [13] Chandler, J., Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999. 24(1): p. 51-63.

- [48] Fraser, C., Non Topographic Photogrammetry, ed. Edwards Brothers Inc., Virginia, 1989.
- [49] Alsadik, B., et al., Minimal camera networks for 3D image based modeling of cultural heritage objects. *Sensors*, 2014. 14(4): p. 5785-5804.
- [50] Haala, N. Multiray photogrammetry and dense image matching. in *Photogrammetric Week*. 2011. VDE Verlag.
- [51] Hullo, J.-F., P. Grussenmeyer, and S. Farès, Photogrammetry and dense stereo matching approach applied to the documentation of the cultural heritage site of Kilwa (Saudi Arabia). 2010.

the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012. 3: p. 7-12.

- [33] Alsadik, B., M. Gerke, and G. Vosselman, Automated camera network design for 3D modeling of cultural heritage objects. *Journal of Cultural Heritage*, 2013. 14(6): p. 515-526.
- [34] Sharifi, A., Ghanbari Parmehar, I., improving the accuracy of short-range photogrammetry using regular photography network, 25th and 3rd National Geomatics and Geomatics and Geospatial Information Technology Conference and Exhibition 2017.
- [35] Naimaei, R., Ghanbari Parmehar, I., Determining the optimal number of photos for 3D modeling of objects in photogrammetry, 12th National Congress of Civil Engineering.

[36] Agisoft, L., Agisoft PhotoScan user manual. Professional edition, version 0.9. 0. St. Petersburg: Agisoft LLC. Retrieved November, 2013. 8: p. 2018.

[37] Agisoft, L., Agisoft metashape user manual, Professional edition, Version 1.5. Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia, from https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf, accessed June, 2018. 2: p. 2019.

[38] Shapiro, L.G. and G.C. Stockman, *Computer vision*. 2001: Prentice Hall.

[39] Ullman, S., The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 1979. 203(1153): p. 405-426.

[40] Snavely, K., Scene reconstruction and visualization from internet photo collections. 2008, Ph. D. thesis, University of Washington, Seattle, Washington, USA.

[41] Zhu, Q., B. Wu, and Y. Tian, Propagation strategies for stereo image matching based on the dynamic triangle constraint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007. 62(4): p. 295-308.

[42] Lowe, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. in *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. 1999. Ieee.

[43] Lowe, D.G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 2004. 60(2): p. 91-110.

[44] Liu, Z., J. An, and Y. Jing, A simple and robust feature point matching algorithm based on restricted spatial order constraints for aerial image registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. 50(2): p. 514-527.

[45] Bay, H., et al., Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*. 2008. 110(3): p. 346-359.

[46] Hartley, R. and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2003: Cambridge University Press.

[47] Remondino, F., et al. Design and implement a reality-based 3D digitisation and modelling project. in *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*. 2013. IEEE.

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



رضا نعیمایی در سال ۱۳۹۹ مدرک کارشناسی مهندسی نقشه برداری خود را از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل اخذ نموده و پس از آن در سال ۱۴۰۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری گرایش فتوگرامتری خود را از دانشگاه تهران دریافت نموده است. زمینه تخصصی ایشان بینایی ماشین، فتوگرامتری برد کوتاه و پردازش تصویر می باشد.

Naimaei, R. School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
✉ r.naimaei@ut.ac.ir



عبادت قنبری پرمهر دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی نقشه برداری (گرایش فتوگرامتری) از دانشگاه ملیبورن استرالیا می باشد. پس از اخذ دکتری، ایشان به مدت دو سال به عنوان پژوهشگر پسادکتر در دانشگاه RMIT استرالیا و از سال ۱۳۹۵ تا کنون به عنوان استادیار در گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه

صنعتی نوشیروانی بابل مشغول به فعالیت بودند. ایشان تا کنون موفق به چاپ بیش از ۳۰ مقاله در مجلات و کنفرانس های معتبر بین المللی شده اند. زمینه های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، پردازش تصاویر، کاربرد یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در کشاورزی و سنجش از دور.

Parmehr, E. G. Assistant Professor at Department of Geomatics Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
✉ parmehr@nit.ac.ir

Citation (Vancouver): Naeimaei R, Ghanbari Parmehr E. [Assessing the Influence of Image Network and Image Texture on the Quality of 3D Point Cloud Production in Close-Range Photogrammetry]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2023; 1(2): 189-204

<https://doi.org/10.22061/jrsg.2023.2010>



COPYRIGHTS



© 2023 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)