نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی ، دوره هفتم ، شماره ۲ ، خرداد ماه ۱۳۹۵

تلفیق داده‌های لیزراسکن زمینی و فتوگرامتری برد کوتاه با روش ماتریس نگاشت، جهت تولید مدل سه‌بعدی با بافت واقعی

حسن امامی*[1]، محمد سعادت سرشت[2]، عبدالرضا صفری[3]

[1]دانشجوی دکتری فتوگرامتری و سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
h_emami@ut.ac.ir

[2]استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
msaadat@ut.ac.ir

[3]دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
asafari@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۴، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۴)

چکیده

امروزه ترکیب داده‌های فتوگرامتری بردکوتاه و لیزر اسکن زمینی بعنوان روش موثر و دقیق برای مستندسازی و مدلسازی سه بعدی از ساختمان های پیچیده و سایت‌های است که مورد توجه بسیاری از موسسات و سازمان‌ها بوده و هست. در کنار روشهای متداول تولید ارتوفتو و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی، فتوگرامتری بردکوتاه و لیزراسکن، مکمل هم بوده و ترکیب داده‌های آنها در اغلب کاربردها بطور فزاینده‌ای معمول گردیده است. لیزراسکنرها درحین جمع‌آوری داده‌های سه بعدی، قادر به تهیه تصاویر بافت نیز هستند ولی به دلایلی این تصاویر در کاربردهای نگاشت بافت، قابل استفاده نیستند. تصاویر بافت، جداگانه با کیفیت خوب، در زمان مناسب و از موقعیت‌های مطلوب با استفاده از اصول فتوگرامتری تهیه می‌شوند. این مقاله، به بررسی جامع روند بازسازی بناهای باستانی به روش ماتریس نگاشت پرداخته است. تحقیق حاضر، مطالعه موردی بر روی دو سری داده‌های واقعی از ابنیه‌های باستانی کشورمان، گنبد ابرکوه استان یزد و پل سنگی لرستان، بوده که می‌تواند هم برای تهیه مستندات لازم جهت تثبیت ملی یا جهانی و هم در مدلسازی سه بعدی برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق، علاوه بر روش ماتریس نگاشت، مدل‌های ریاضی مختلف در ادغام داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و از چندین تصاویر بافت استفاده گردید که بکارگیری چندین تصویر بافت علاوه بر ارتقاء کیفیت، باعث بهبود هندسه و دقت نتایج می‌گردد. بررسی نتایج نشان داد که خطاها و اعوجاجات رنگی، علاوه بر نوع مدل ریاضی مورد استفاده، به دقت نقاط اندازه گیری در فضای تصویر و ابر نقاط نیز وابستگی شدید دارد. همچنین، بررسی و آنالیز خطاهای حاصل از دو روش، تبدیل خطی مستقیم تکراری و روش ماتریس نگاشت، نشان داد که میانگین خطاها در دو جهت مختصات طولی و عرضی در روش ماتریس نگاشت به ترتیب، در ابرنقاط پل سنگی لرستان۰٫۱۵ و ۰٫۳۳ در واحد پیکسل و در ابرنقاط ابرکوه یزد 4.24E-13- و 7.67E-14 در واحد پیکسل بود. در مقابل، این خطاها برای روش تبدیل خطی مستقیم تکراری به ترتیب 2.38- و 5.79E-10- برای ابر نقاط اول و 5.40E-5 و 3.64E-5 در واحد پیکسل برای ابر نقاط دوم محاسبه گردید. لذا علاوه بر کاهش میزان خطاها در روش ماتریس نگاشت، بیانگر مناسب بودن این روش نسبت به سایر روش‌های بکار رفته دارد. همچنین، مزیت اصلی این روش این است که نیاز به مقادیر اولیه ندارد و به صورت ضرب ماتریسی عمل می‌کند که استفاده از آن بعنوان یک روش با ثبات برای تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: مستندنگاری، بناهای تاریخی، لیزر اسکن زمینی، ابر نقاط، فتوگرامتری بردکوتاه، ادغام، ماتریس نگاشت

---

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

امروزه؛ مدلسازی سه بعدی و نمایش فضای محیط اطراف با قابلیت اندازه‌گیری در این مدل‌ها، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مدلهای سه بعدی تهیه شده با بافت واقعی، می‌توانند در زمینه‌های مختلف مانند، مستند سازی و تثبیت آثار و ابنیه‌های باستانی [۱۴]، تهیه مدلهای مجازی سه بعدی[۲۰]، بازیهای رایانه‌ای[۱۶]، ناوبری[۳]، سیستم‌های هوشمند با قابلیت درک از محیط و تصمیم‌گیری [۱۵] و غیره کاربرد متنوعی داشته باشند. یکی از مهمترین اهداف در فتوگرامتری و بینایی کامپیوتر نیز، تهیه داده‌های سه بعدی از سطوح اجسام و مدل‌سازی سه بعدی با بافت واقعی آنها می‌باشد که کاربردهای مختلف آن از جمله در مهندسی معکوس، کنترل کیفیت کارخانجات صنعتی، هدایت ربات‌ها، میراث فرهنگی و ابنیه‌های تاریخی، بازسازی صورت انسان برای کاربردهای انیمیشن، سبب انجام تحقیقات گسترده ای در این زمینه شده است. در این راستا تکنیک‌ها و روش‌های مختلفی برای استخراج و تهیه داده‌های سه بعدی از سطح اشیاء و ادغام آن با تصاویر رنگی بافت، ارائه گردیده است[۱۴]. در انتخاب نوع روش اندازه‌گیری، عواملی نظیر دقت مورد نیاز، خصوصیات محیط کاری، بافت و رنگ سطح شیء، امکان دسترسی به شیء، هزینه و برخی عوامل دیگر تاثیرگذار خواهند بود. تلفیق داده‌های لیزراسکن زمینی و فتوگرامتری برد کوتاه به عنوان روش‌های نقشه برداری نوین از آثار و بناهای تاریخی-باستانی، فرآیند مدلسازی، مطالعه، مستندسازی و اجرای مرمت را دقیق‌تر کرده و سرعت بخشیده است. در حال حاضر نقشه‌برداری و مستندنگاری آثار باستانی و میراث فرهنگی به صورت مدل سه بعدی با بافت واقعی در محوطه‌ها و ابنیه‌های تاریخی با دقت میلی‌متری را امکان‌پذیر ساخته است.

باستان‌شناسان و کارشناسان آثار تاریخی، با مدلسازی سه بعدی با بافت واقعی، می‌توانند در سرتاسر دنیا روی تصاویر مجازی بنای مورد نظر کار کنند و بدون آن که نیازمند صرف وقت و هزینه برای سفر به آن مکان باشند و هر نوع مطالعه‌ای را از جهت تاریخی، موادشناسی و فن‌شناسی انجام دهند. یکی دیگر از کاربردهای بسیار مهم مدلسازی سه بعدی با بافت واقعی، جهانی کردن آثار میراث فرهنگی است؛ ثبت جهانی آثار تاریخی نیازمند مستندات و نقشه‌های دقیق از وضعیت موجود بافت و اثر تاریخی است که خود نیازمند، روش‌های جدید در عرصه مهندسی نقشه‌برداری است. در حال حاضر نمی‌توان ادعا کرد که نقشه‌های جامعی از آثار تاریخی کشورمان تهیه شده است، در حالی که اگر نقشه‌های دقیقی از بافت‌های تاریخی تهیه شود می‌توان در صورت از بین رفتن بافت، عملیات بازسازی را با الگوبرداری از نقشه‌های قبلی به روش دقیق و منطبق بر طرح‌های پیشین انجام داد. بدیهی است هم‌اکنون نبود نقشه‌های دقیق از ارگ بم یکی از عوامل چالش‌برانگیز در بازسازی ارگ می باشد. اگر پیش از زلزله، نقشه کاملی از ارگ تهیه شده بود، می‌توانستند آن را به عنوان یک مرجع برای بازسازی مورد استفاده مناسب قرار دهند. همچنین، بحث موزه‌ها و سایت‌های مجازی یکی دیگر از بسترهای لازم برای تهیه نقشه‌های سه بعدی از آثار تاریخی است، چنانچه جایگاه این روش نوین در جذب توریست و گردشگری بسیار مهم است و ایجاد موزه‌های مجازی سه بعدی از اماکن تاریخی و گردشگری این امکان را فراهم می‌کند تا یک گردش مجازی در آن سایت امکان‌پذیر باشد. با این روش، توریست پیش از ورود به کشور، از طریق اینترنت، یک گردش مجازی در فضاهای تاریخی ایران انجام می‌دهد که این گردش نقش ویژه‌ای را در ایجاد انگیزه برای سفر به ایران ایجاد خواهد کرد؛ بنابراین فناوریهای نوین در مهندسی نقشه‌برداری باعث می‌شود تصویر و شمایی جذاب از بافت‌ها و آثار تاریخی با ارزش کشورمان ایجاد شود و جایگاه تبلیغاتی مهمی را برای جذب توریست به وجود آورد. علاوه بر آنها، سینمای سه بعدی در مناطق ورودیهای آثار تاریخی یکی دیگر از زمینه‌های استفاده از نقشه‌برداری نوین بافت‌های تاریخی است تا پیش از ورود به بافت، گردشگر بداند که در این بافت، چه فضاهایی را می‌تواند ببیند.

بازسازی مدل‌های سه‌بعدی با بافت واقعی از شهرها، ساختمان‌ها و اشیاء مورد نظر مستلزم نمایش یک مدل سه بعدی ساده و نگاشت تصاویر بافت است. روش‌های قبلی مدلسازی سه بعدی با بافت واقعی مبتنی بر عکس‌برداری و اندازه‌گیری از روی عکس بود که علاوه بر وقت‌گیر و پرهزینه بودن، کارآیی مناسبی نداشت، اما در حال حاضر با تلفیق فتوگرامتری برد کوتاه با لیزر اسکن زمینی، این امکان فراهم شده است تا تهیه مدل‌های سه

بعدی با دقت بالا از وضعیت موجود بافت‌های تاریخی، ابنیه‌ها و فضاهای شهری و غیره فراهم شود. روشهای مختلفی وجود دارد که جهت ادغام اطلاعات طیف رنگی از تصاویر دو بعدی با داده‌های سه بعدی لیزراسکن بکار گرفته می‌شود. اگر حین برداشت با استفاده از دوربین‌های خود اسکنرهای زمینی، نگاشت بافت به صورت آنی انجام گیرد در عمل محدودیت‌هایی وجود دارد که این تصاویر بافت مستقیماً قابل استفاده نیستند، زیرا تصاویری که خوداسکنرها می‌گیرند در یک قدرت تفکیک بوده و در زمانی اخذ می‌گردد که مطلوب نیست مثلاً یک طرف صحنه مورد نظر سایه افتاده و وجه دیگر با نور خورشید زیاد روشن شده است در نتیجه کنتراست و کیفیت تصاویر در قسمت‌های مختلف آن یکسان نیست. همچنین در هر ایستگاه برداشت در لیزراسکن‌ها، تصویر اخذ شده دارای بزرگنمایی های ثابت بوده و جزئیات مختلف که در بافت زنی برای مدل‌های سه بعدی واقعی و ارتوفتو صحیح نیاز داریم، نمایان نیست و این تصاویر بطورکلی در مقایسه با تصویر بافت که بطور جداگانه و با اصول فتوگرامتری برد کوتاه تهیه می‌گردد، از کیفیت خوبی برخوردار نیستند. نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده توسط خود دوربین اسکنر و تصاویر بافت که جداگانه‌ای اخذ شده‌اند، در شکل (۱ الف و ب) نمایش داده شده است.

(الف) (ب)

شکل۱- نمونه‌ای از تصاویر بافت اخذ شده؛ (الف) با اصول فتوگرامتری برد کوتاه، (ب) با دوربین اسکنر

همانطوریکه در شکل (۱) نیز نمایان است، تصاویر بافت که بصورت جداگانه اخذ می‌شود، دارای مزیت‌هایی از جمله اینکه اخذ تصاویر در زمانهای مناسب، با حداقل سایه در محیط اندازه‌گیری، یکنواخت بودن نورخورشید در محیط و جمع‌آوری تصاویر از زوایای مختلف و مناسب هستند. این تصاویر با قدرت تفکیک و بزرگنمایی‌های مختلف اخذ می‌شوند و قادرند جزئیات متفاوت از صحنه مورد نظر را به بهترین شکل ممکن نمایان کنند، که در تصاویر خوداسکنر چنین خصوصیاتی وجود ندارد. مقاله حاضر، به بررسی جامع روند بازسازی بناهای باستانی به روش ماتریس نگاشت پرداخته است. برای این منظور، با مطالعه موردی بر روی دو سری داده‌های واقعی از ابنیه-های باستانی کشورمان، گنبد ابرکوه استان یزد و پل سنگی لرستان، بصورت عملی بکار گرفته است، که می-تواند هم برای تهیه مستندات لازم جهت تثبیت ملی یا جهانی و هم در مدلسازی سه بعدی برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

بخشهای مختلف این مقاله بصورت زیر سازماندهی گردیده است: بعد از یک مقدمه، ضرورت ادغام داده‌های لیزراسکن زمینی و فتوگرامتری برد کوتاه بیان شده است که نیازمند توسعه روشها و الگوریتم‌های جدید در این خصوص است. در بخش بعدی، به مبانی تئوری و مدل‌های ریاضی مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است و سپس با استفاده از این الگوریتم‌های ریاضی، موقعیت و وضعیت دوربین در منظرهای مختلف صحنه تعیین گردیده است. در ادامه، ارتباط بین فضای سه بعدی نقاط لیزر اسکنر و فضای دو بعدی تصویر با استفاده از معادلات تبدیل خطی مستقیم تکراری[۱] و روش ماتریس نگاشت[۲] انجام گرفت و این دو روش با هم مقایسه و پتانسیل هر کدام در ادغام داده‌های فتوگرامتری و لیزراسکن زمینی مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، ادغام تصاویر بافت با مدل سه بعدی نقاط بر روی دو سری از داده های ابنیه و آثار باستانی کشورمان، گنبد ابرکوه استان یزد و پل سنگی لرستان، انجام گرفت و تمامی مراحل اجرایی ارزیابی و نتیجه‌گیری از این تحقیق آنالیز و بررسی گردیده است.

۲- ضرورت تلفیق داده‌های لیزراسکن زمینی و فتوگرامتری برد کوتاه

در فتوگرامتری دستگاههای جمع‌آوری داده‌های دو بعدی نظیر دوربین‌های عکسبرداری، اسکنرها و دیجیتایزها، ابزارهای اصلی هستند که مورد استفاده قرار می‌گیرند. علم فتوگرامتری با استفاده از تصاویر دو بعدی و

۱ Iterative Direct Linear Transformation
۲ Projection Matrix

سه بعدی می‌تواند برای اندازه‌گیری تغییرات سطح اشیاء، اندازه و موقعیت‌های مختلف اشیاء در صحنه مورد نظر، بکار گرفته شود و اغلب برای بازسازی مدل سه بعدی اشیای صحنه، جهت نمایش گرافیکی آن از روش‌های مختلفی استفاده می‌کند[۱۱]. همچنین، برای محاسبه موقعیت و وضعیت دوربین‌ها با در نظر گرفتن سیستم مختصات شئی در صحنه مورد نظر، از ترفیع فضایی تصاویر و تبدیلات مختلف ریاضی استفاده می‌شود. استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه بدون حضور لیزر اسکنر، برای تهیه نقشه از سازه‌های عظیم و پیچیده کاری زمانبر و پرهزینه می‌باشد. بدلیل اینکه با روش فتوگرامتری، ابتدا بایستی تصاویر نسبت به یکدیگر و نسبت به سیستم مختصات مبنا توجیه شوند. سپس برای اندازه گیری یک نقطه روی شیء موردنظر، بایستی آن را حداقل در سه تصویر اندازه‌گیری کرد. در حالیکه لیزراسکنر زمینی در هر ثانیه میلیونها نقطه برداشت می‌نماید که با تلفیق این نقاط با تصاویر اخذ شده توسط فتوگرامتری، میلیونها نقطه روی تصویر ظاهر می‌گردد.

لیزراسکنرها مستقیماً نقاط سه بعدی را از صحنه مورد نظر برداشت کرده و قادرند به صورت اتوماتیک میلیون‌ها نقطه در کمترین زمان با دقتی در حد میلیمتر جمع‌آوری - کنند. روش انجام کار توسط لیزراسکنر زمینی دارای سه مرحله اصلی می باشد؛ اولین مرحله، برداشت زمینی است. در این مرحله با استقرار دستگاه در محل های مورد نظر نسبت به جمع‌آوری اطلاعات (برداشت نقاط) اقدام می شود. برای این منظور، لازم است شبکه نقاط برداشت به گونه‌ای طراحی شود که هر قسمت از بنا، حداقل از یک استقرار قابل مشاهده باشد. همچنین، لازم است به منظور امکان یکپارچه سازی برداشت‌ها از استقرارهای مختلف، در هر استقرار عوارضی از دیگر استقرارها نیز مشاهده و برداشت شوند. این عوارض می توانند به صورت مصنوعی و با استفاده از تارگت خاصی در محل مناسب ایجاد شوند. مرحله دوم، یکپارچه سازی و ویرایش داده‌هاست. پس از تکمیل عملیات برداشت، مجموعه ای از ابر نقاط به صورت منفرد به دست می‌آید که لازم است برای داشتن ابر نقاط یکپارچه از کل یک بنا، این ابرهای نقاط با یکدیگر تلفیق شوند. برای تلفیق دو به دوی ابرهای نقاط، یکی از ابرهای نقاط به عنوان پایه در نظر گرفته می شود و ابر نقطه استقرار دیگر به آن متصل می شود. اتصال دو ابر نقطه به یکدیگر بدون نیاز به اطلاعات تکمیلی (مانند مختصات دو استقرار) قابل انجام است و صرفاً با داشتن حداقل سه نقطه مشترک بر روی عوارض برداشت شده یا تارگت‌های مصنوعی قابل انجام است. پس از تلفیق، داده‌ها بایستی ویرایش شوند. ویرایش دارای دو بخش عمده، حذف اطلاعات اضافه و انتقال اطلاعات به سیستم مختصات مورد نیاز می باشد. پس از برداشت نقاط با تراکم مورد نیاز و یکپارچه سازی ابرهای نقاط ، مدل سه بعدی مجازی بنا کاملاً در دسترس می باشد و می‌توان کلیه مدلسازی‌ها و اندازه‌گیری های موردنیاز را بر روی آنها انجام داد. این مدلسازی‌ها می‌توانند شامل مثلث بندی، برازش رویه به سطوح، تهیه منحنی میزان، تهیه مقاطع در زوایا و موقعیت های مختلف و غیره باشند[۱۹]. بدیهی است همانند فتوگرامتری، داده‌های لیزراسکن زمینی ممکن است برای تولید مدل سه بعدی مورد استفاده قرار گیرند اما دارای محدودیت‌هایی در نمایش رنگ و بافت واقعی روی مدل‌های سه بعدی هستند. طبق نظر[۱۲]، لیزراسکن‌ها دارای مزیت-هایی هستند که می‌توانند جزئیات ریز از اشیاء را در صحنه جمع‌آوری کنند، داده‌های جمع‌آوری شده تراکم بالایی داشته در حالیکه محدودیت‌هایی در رنگ و نمایش بافت واقعی روی مدل های سه بعدی دارند. قابلیت‌های خوب لیزر اسکنرها در تهیه نقاط سه بعدی بصورت مستقیم، ارائه نتایج در مدت زمان کم، توانایی استخراج داده‌های سه بعدی از روی سطوح نامنظم با شکستگی‌ها و برجستگی‌ها، سبب گسترش روز افزون استفاده از آن در سال‌های اخیر شده است[۱۸]. ولی تکنولوژی لیزر اسکنر زمینی تنها قادر به تهیه اطلاعات هندسی سطح اشیاء می‌باشد و اطلاعات بافت سطح مورد نظر را یا ثبت نمی‌کند و در صورت اخذ تصاویر بافت، نسبت به فتوگرامتری برد کوتاه قدرت تفکیک و کیفیت پایینی دارد [۱۸]. لذا استفاده از لیزر اسکنر زمینی در مدلسازی سه بعدی با بافت واقعی، به تنهایی و بدون حضور فتوگرامتری بردکوتاه کاربردی موثر نداشته و به نتیجه مطلوب نمی‌انجامد. بدلیل اینکه تشخیص عوارض و اجسام از بین میلیونها نقطه کاری تقریباً غیر ممکن است، لذا تنها ابزاری که می تواند اشیاء مورد نظر را از میان این میلیونها نقطه بارز نماید، تصویری است که روی آن قرار گرفته باشد. لذا فتوگرامتری برد کوتاه و لیزر اسکنر زمینی دارای تفاوت-هایی بوده ولی مکمل هم هستند، طوریکه با استفاده از فتوگرامتری، زمان کمتری نسبت به لیزر اسکنر زمینی برای جمع آوری اطلاعات در یک استقرار لازم است. در حالیکه، در

فتوگرامتری بیشترین زمان به منظور استقرار دوربین عکسبرداری تارگت‌ها صرف می شود ولی لیزر اسکنر زمینی ، زمان برداشت خصوصاً در مواردی که تراکم بالای نقاط مد نظر است قابل توجه خواهد بود. در فتوگرامتری بردکوتاه، اطلاعات کامل است. به عبارتی در عکسبرداری، کلیه اطلاعات در محدوده پوشش داده شده، به عکس منتقل می شود ولی در لیزر اسکنر زمینی، با توجه به تراکم نقاط از یکدیگر ممکن بعضی از جزئیات با اندکی جابجایی مدلسازی شوند. در فتوگرامتری برای بدست آوردن اطلاعات سه بعدی نیاز به داشتن زوج عکس برای هر مکان، نیازمند دو استقرار دوربین عکسبرداری با موقعیت نسبی مشخص می باشد، که در فضاهای کوچک، ممکن است امکان استقرار در دو موقعیت مختلف وجود نداشته باشد و یا نتوان کلیه عوارض را از دو استقرار مشاهده نمود. این مشکل در لیزر اسکنر زمینی کاملاً مرتفع شده است. زیرا برای تهیه مدل هر فضا از ساختمان ابنیه‌های باستانی، فقط داشتن دید از یک استقرار کفایت می کند. در فتوگرامتری، موقعیت نسبی استقرار دوربین در زمان عکسبرداری بسیار مهم است؛ بنابراین طراحی دقیقی برای موقعیت دوربین های عکسبرداری لازم است و اگر طراحی اولیه کلیه فضاها را به طور کامل پوشش ندهد، نیازمند طراحی مجدد می باشیم که باعث می شود نیروهای متخصص در محل عملیات میدانی حضور داشته باشند ولی در تهیه مدل سه بعدی توسط اسکنر، موقعیت استقرارها نسبت به یکدیگر اهمیت چندانی ندارد. در نتیجه، لیزراسکن‌ها در کاربردهای مختلف فتوگرامتری قابل ادغام هستند از جمله[۲, ۱۳]:

الف) در کاربردهای حفظ آثار باستانی و معماری شامل مدلسازی شهری، حفظ و بازسازی آثار باستانی و آنالیزهای فرهنگی و هنری

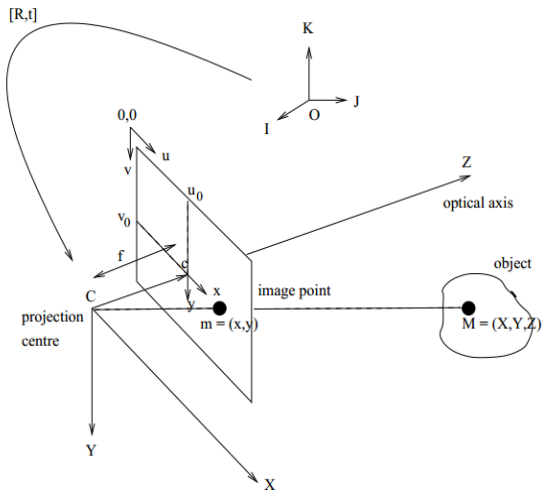
ب) در کاربردهای صنعت اتومبیل که نیاز به اندازه‌گیری مدل‌های طراحی سطح برای آنالیز قطعات یدکی، تست تغییر شکل، ایمنی و بازرسی اجزای مختلف آن بکار می‌رود.

ج) در کاربردهای صنعتی که شامل صنعت هوایی، هوافضا که نیاز به اندازه‌گیریهایی با دقت بالا است و دیگر کاربردهایی که به بازسازی مدل سه بعدی نیازمندیم از ترکیب فتوگرامتری و لیزراسکن استفاده می‌نمایند.

د) در تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی، ادغام داده‌های فتوگرامتری و لیزراسکن از پتانسیل و اهمیت فراوانی برخوردار بوده و هست.

۳- ماتریس نگاشت و سایر مدل‌های ریاضی در تلفیق داده ها

در تلفیق داده‌ها ریجسترکردن و کالیبراسیون (تعیین پارامترهای توجیه داخلی و خارجی از روی ماتریس نگاشت) در هر ایستگاه تصویر برداری مطرح است. ریجستر کردن دو مجموعه داده، فرآیند تبدیل داده از منابع مختلف یا از انواع مختلف به یک سیستم مختصات مرجع، این امکان را فراهم می‌سازد که اندازه‌گیری‌ها، آنالیز و مقایسه بین دو مجموعه داده انجام گیرد. ریجستر کردن بر المانهای مربوط به مقیاس، اریبی، دوران و انتقال بین سیستم مختصات دو مجموعه داده در دو فضای مختلف، تاکید دارد[۷,۴]. در بیشتر موارد، ریجستر کردن طی مرحله پس پردازش داده‌ها رخ می‌دهد. اما برخی سیستم هایی وجود دارد که ریجستر کردن را به صورت آنی در موقع جمع‌آوری داده‌ها انجام می‌دهند که نمونه‌ای از آنها در [۱۰, ۱۱, ۱۸] توضیح داده شده است. در کالیبراسیون نیز، هدف ارتباط بین فضای دو بعدی تصویر و سه بعدی اشیاء در صحنه تصویربرداری است. چندین روش برای کالیبراسیون دوربین وجود دارد که در این تحقیق، از دو روش مختلف استفاده شده است که یکی استفاده از معادله تبدیل خطی مستقیم تکراری و دیگری استفاده از ماتریس نگاشت است. لازم به ذکر است که در روش ماتریس نگاشت فرض بر عدم وجود اعوجاج شعاعی دوربین بوده و پارامترهای کالیبراسیون استخراج گردید. اصول ماتریس نگاشت در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل۲- سیستم مختصات‌های مرتبط در کالیبراسیون دوربین [۶, ۸]

فرض کنید که یک سیستم مختصات سه بعدی به مبدا مرکز تصویر (مرکز نوری دوربین) باشد، محور Z در

امتداد محور نوری آن که به سیستم مختصات استاندارد دوربین معروف است، در شکل (۱) نشان داده شده است. نقطه M نقطه‌ای در فضای شیء با مختصات (X,Y,Z) که بر روی فضای تصویر به مختصات (x,y) تصویر شده است. رابطه بین دو سیستم مختصات مذکور به صورت سیستم مختصات همگن بصورت معادله (۱) می باشد.

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

که s فاکتور مقیاس و مخالف صفر و f فاصله کانونی دوربین که اغلب در واحد پیکسل اندازه‌گیری می‌شود. حال، مختصات واقعی پیکسلی (u ،v) با توجه شکل (۱) بصورت معادله (۲) قابل تعریف است.

$$\begin{aligned} u &= u_0 + x \\ v &= v_0 + y \end{aligned} \qquad (۲)$$

می‌توان تبدیل از سیستم مختصات سه بعدی شئیء به سیستم مختصات پیکسلی تصویر را با جایگزین کردن معادله (۱) در معادله (۲) به دست آورد.

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

فرم کوتاه معادله (۳) بصورت معادله (۴) قابل نوشتن است.

$$U = K X \qquad (۴)$$

در معادله (۴)، U بردار همگن از مختصات پیکسل تصویر، K ماتریس نگاشت، X بردار همگن از مختصات شیء می باشد که بیانگر یک تبدیل خطی پروژکتیو بین دو فضا است. در کل، مختصات سه بعدی شیء نقطه‌ای طوریکه مبدا در مرکز تصویر و محور z در امتداد محور نوری دوربین باشد در عمل اینگونه نیست لذا در معادله تعریفی (۴) بایستی تغییری بصورت زیر در نظر گرفته شود.

$$U = KT X \qquad (۵)$$

که T یک ماتریس همگن ۴ × ۴ بصورت معادله (۶) قابل تعریف است.

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

ماتریس R بیانگر دوران دوربین و ستون دوم معادله (۶) بردار انتقال بین سیستم مختصات دوربین و شیء است. ماتریس T دارای ۶ درجه آزادی، سه دوران و سه انتقال، است و به ماتریس پارامترهای توجیه خارجی دوربین معروف است. ماتریس نگاشت K و ماتریس انتقال T با همدیگر ترکیب شده و بصورت معادله (۷) درنظر گرفته می‌شود و ماتریس کالیبراسیون دوربین را تشکیل می‌دهند که تابعی از پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین می‌باشد.

$$U = PM X \qquad (۷)$$

۳-۱- محاسبه مستقیم پارامترهای توجیه داخلی و خارجی از ماتریس نگاشت

روند محاسبه محاسبه پارامترهای توجیه داخلی و خارجی از روی ماتریس نگاشت که بصورت معادله (۸) قابل بازنویسی است، به اختصار تشریح گردیده است. دلیل محاسبه این پارامترها این است که علاوه بر برقراری ارتباط بین فضای تصویر و فضای شیء، می‌توان با معلوم بودن مختصات مرکز تصویر دوربین در هر منظر عکسبرداری و همچنین محاسبه بردار نرمال مثلث بندی از داده‌های لیزر با حداقل زاویه بین بردار نرمال بر سطح و امتدا خطوط نگاشت، رنگ‌های واقعی[۱] بهینه را از چندین تصویر برای تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی انتخاب نمود. با فرض اینکه ماتریس نگاشت به شکل معادله (۸) نوشته شود، خواهیم داشت[۲۱].

$$PM = \underbrace{\left| \underbrace{\begin{matrix} f_x & 0_s & u_0 \\ 0 & f_y & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}}_{K,\text{intrinsic parameters}} \right| \left| \underbrace{\begin{matrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_z \end{matrix}}_{R,t,\text{extrinsic parameters}} \right|}_{\text{prjection matrix}} \qquad (۸)$$

۱ Red, Green, Blue (RGB)

اگر فرض شود پارامترهای توجیه داخلی و خارجی محاسبه شده از ماتریس نگاشت بصورت معادله (۹) باشد، داریم.

$$\overline{p} = \begin{bmatrix} \overline{p}_{11} & \overline{p}_{12} & \overline{p}_{13} & \overline{p}_{14} \\ \overline{p}_{21} & \overline{p}_{22} & \overline{p}_{23} & \overline{p}_{24} \\ \overline{p}_{31} & \overline{p}_{32} & \overline{p}_{33} & \overline{p}_{34} \end{bmatrix} \tag{۹}$$

برای سهولت، بردارهای سطری زیرماتریس ۳ × ۳ از معادله فوق بصورت معادله (۱۰) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} \overline{p}_1 = \begin{bmatrix} \overline{p}_{11} & \overline{p}_{12} & \overline{p}_{13} \end{bmatrix}^T \\ \overline{p}_2 = \begin{bmatrix} \overline{p}_{21} & \overline{p}_{22} & \overline{p}_{23} \end{bmatrix}^T \\ \overline{p}_3 = \begin{bmatrix} \overline{p}_{31} & \overline{p}_{32} & \overline{p}_{33} \end{bmatrix}^T \end{cases} \tag{۱۰}$$

با در نظر گرفتن ضریب مقیاس بین ماتریس نگاشت معادله (۸) و ماتریس پارامترهای معادله (۹)، رابطه بین ماتریس نگاشت با پارامترهای مجهول و المانهای معلوم آن با یک ضریب مقیاس مجهول بصورت معادله (۱۱) بهم مرتبط هستند.

$$PM = \lambda \overline{P} \tag{۱۱}$$

قدر مطلق ضریب مقیاس مجهول با در نظر گرفتن $\overline{p}_3$ و سطر سوم ماتریس دوران R از معادله (۱۲) به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\left.\begin{aligned} \sqrt{\overline{p}_{31}^2 + \overline{p}_{32}^2 + \overline{p}_{33}^2} = |\lambda| \sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2} \\ \sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2 = 1} \end{aligned}\right\} \tag{۱۲}$$

$$\Rightarrow |\lambda| = \sqrt{\overline{p}_{31}^2 + \overline{p}_{32}^2 + \overline{p}_{33}^2},$$

با معلوم شدن ضریب مقیاس ، تمامی آرایه های ماتریس نگاشت را به آن تقسیم می‌کنیم تا ماتریس نگاشت معلوم نرمالایز گردد. ماتریس حاصل با علامت اختصاری P بصورت معادله (۱۳) قابل نمایش است.

$$P = \frac{1}{\lambda} \left[\underbrace{\begin{matrix} f_x r_1^{\mathrm{T}} + u_0 r_3^{\mathrm{T}} & f_x t_x + u_0 t_z \\ f_y r_2^{\mathrm{T}} + v_0 r_3^{\mathrm{T}} & f_y t_y + v_0 t_z \\ r_3^{\mathrm{T}} & t_z \end{matrix}}_{prjection\ matrix} \right] \tag{۱۳}$$

حال تمامی پارامترهای توجیه داخلی و خارجی از روی این ماتریس و با استفاده از معادلات (۱۴ تا ۱۷) قابل محاسبه است. برای این منظور ابتدا مولفه سوم بردار انتقال و سطر سوم ماتریس دوران از معادله (۱۴) قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} t_z = \sigma p_{34} \quad \& \quad r_{3i} = \sigma p_{3i}, \\ i = 1,2,3 \quad \sigma = \pm 1. \end{aligned} \tag{۱۴}$$

علامت σ از رابطه اولی معادله (۱۴) بدست می‌آید، با فرض اینکه مرکز سیستم مختصات شیء در جلو ($t_z > 0$) یا پشت ($t_z < 0$) دوربین قرار دارد. همچنین با توجه به اینکه ماتریس دوران R یک ماتریس متعامد است، با در نظر گرفتن خصوصیات ماتریس متعامد، از حاصلضرب داخلی المانهای ماتریس P مختصات نقطه اصلی از روی سیستم مختصات تصویر از معادله (۱۵) قابل محاسبه است.

$$u_0 = P_1^T P_3 \quad \& \quad v_0 = P_2^T P_3 \tag{۱۵}$$

همچنین المانهای f_x و f_y از معادله (۱۶) محاسبه می‌گردد. با محاسبه این پارامترها، کل المانهای توجیه داخلی معلوم می گردد.

$$f_x = \sqrt{P_1^T P_1 - u_0^2} \quad \& \quad f_y = \sqrt{P_2^T P_2 - v_0^2} \tag{۱۶}$$

از المانهای ماتریس دوران و بردار انتقال بین دو سیستم مختصات تصویر و شیء، کل پارامترهای باقیمانده از معادله (۱۷) محاسبه می گردد.

$$\begin{aligned} r_{1i} &= \sigma\left(p_{1i} - u_0 p_{3i}\right)/f_x \ , \quad i = 1,2,3 \\ r_{2i} &= \sigma\left(p_{2i} - v_0 p_{3i}\right)/f_y \ , \quad i = 1,2,3 \\ t_x &= \sigma\left(p_{14} - u_0 t_z\right)/f_x, \\ t_y &= \sigma\left(p_{24} - v_0 t_z\right)/f_y, \end{aligned} \tag{۱۷}$$

بدین صورت کلیه پارامترهای توجیه داخلی و خارجی در هر منظر که تصویر بافت گرفته شده است، با استفاده از ماتریس نگاشت محاسبه شدند. حسن روش تبدیل ماتریس نگاشت این است که نیاز به مقادیر اولیه ندارد و به صورت ضرب ماتریسی عمل می‌کند.

۳-۲- تبدیل خطی مستقیم و تکراری

در این تحقیق، مدل‌های ریاضی تبدیل خطی مستقیم تکراری و تبدیل ماتریس نگاشت، در محاسبه پارامترهای توجیه داخلی و خارجی، مورد بررسی قرار گرفتند. در روش تبدیل خطی مستقیم تکراری برای بدست آوردن مقیاس، دوران و انتقال بین دو فضا، نیاز به مقادیر اولیه دارد که مقادیر اولیه با استفاده از تبدیل خطی مستقیم غیر تکراری[۱] محاسبه می‌شود و با دوباره تصویر کردن نقاط فضای سه بعدی به فضای تصویر، اختلاف مختصات تصویری نظیر را منیمم می‌کند تا پارامترهای مجهول را همگرا نماید و مقادیر اولیه را در هر تکرار بروز کرده و مجهولات با دقت بالایی محاسبه می‌گردد[۹, ۱۷]. در مقابل، روش تبدیل ماتریس نگاشت نیاز به مقادیر اولیه نداشت و به صورت ضرب ماتریسی عمل می‌کرد و دوباره تصویر کردن از فضای سه بعدی به فضای دو بعدی نیز با ضرب ماتریسی به راحتی انجام می‌گرفت. بررسی و آنالیز خطاهای حاصل از دو مدل ریاضی مذکور، نشان داد که روش تبدیل ماتریس نگاشت از نظر دقت نسبت به روش تبدیل خطی مستقیم تکراری بهتر بوده و همچنین محاسبه پارامترهای کالیبراسیون دوربین، پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین، با دقت بالایی در این روش قابل محاسبه است. در صورتیکه ضرایب معادله تبدیل خطی مستقیم الزاماً نمی‌توانند به صورت صریح مقیاس، دوران و انتقال بین دو فضا را بیان کند. معادله ریاضی تبدیل خطی مستقیم[۱] با در نظر گرفتن مختصات همگن در دو فضا بصورت معادله (۱۸) قابل بازنویسی است.

$$s_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (۱۸)$$

در این معادله s_i ضریب مقیاس و q_{ij} ضرایب مجهول بین دو سیستم مختصات هستند. با انتخاب ضریب مقیاس اختیاری و $q_{34}=1$، معادله تبدیل خطی مستقیم فوق را می‌توان با تقسیم سطر اول و دوم به سومی، مستقل از ضریب مقیاس در هر نقطه تبدیل کرد و همانند معادله (۱۹) نوشت.

$$u_i = \frac{X_i q_{11} + Y_i q_{12} + Z_i q_{13} + q_{14}}{X_i q_{31} + Y_i q_{32} + Z_i q_{33} + 1}$$
$$v_i = \frac{X_i q_{21} + Y_i q_{22} + Z_i q_{23} + q_{24}}{X_i q_{31} + Y_i q_{32} + Z_i q_{33} + 1} \qquad (۱۹)$$

این معادله برای N نقطه نظیر بصورت فرم کوتاه ماتریسی ، به شکل معادله (۲۰) یا معادله (۲۱) نوشت.

$$Aq = b \qquad (۲۰)$$

$$A'q = 0 \qquad (۲۱)$$

که معادله (۲۰) با روش کمترین مربعات و معادله (۲۱) با روش تجزیه مقادیر ویژه[۲] قابل حل است[۵, ۹]. در این تحقیق، جهت استفاده از تبدیل خطی مستقیم تکراری که نیاز به مقادیر اولیه دارد، مقادیر اولیه از طریق تبدیل خطی مستقیم غیر تکراری محاسبه می‌شود. روش تبدیل خطی مستقیم را می‌توان یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی فرض کرد و به صورت غیر خطی نیز حل نمود. روش کار به این صورت است که با دوباره تصویر کردن نقاط فضای سه بعدی محاسبه شده به فضای تصویر با استفاده از ماتریس نگاشت، اختلاف مختصات تصویری نظیر را منیمم کرد. با تعریف کمیتی بنام خطای دوباره تصویر کردن[۳] بصورت معادله (۲۲) این روش قابل حل است [۹].

$$e = \sum_{i=1}^{N} \| \frac{q_1^T X_i + q_{14}}{q_3^T X_i + q_{34}} - u_i \|^2 + \| \frac{q_2^T X_i + q_{24}}{q_3^T X_i + q_{34}} - v_i \|^2 \qquad (۲۲)$$

در کل، مدل‌های ریاضی غیرخطی، از راه حل‌های خطی با ثبات تر هستند[۹].

۴- اجرای عملی تحقیق

۴-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

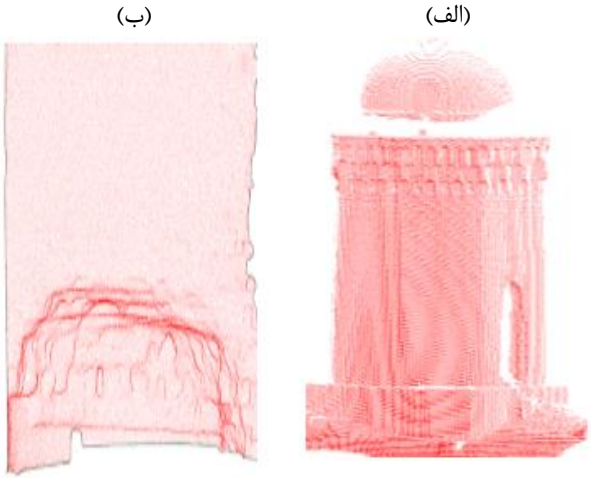
در اجرای پروژه حاضر، از داده‌های لیزر اسکنر زمینی در خصوص دو ابنیه باستانی که شامل گنبد ابرکوه یزد و

۱ Direct Linear Transformation

۲ Singular value Decomposition

۳ Reprojection error

پل سنگی لرستان بود، استفاده گردید. در شکل (۳) نمایی کلی از ابر نقاط برداشت شده از یک ایستگاه از دو ابنیه آثار باستانی مذکور نشان داده شده است.



شکل۳- نمونه‌ای از ابر نقاط برداشت شده؛ (الف) گنبد ابرکوه یزد ، (ب) پل سنگی لرستان

۴-۲- ارتباط فضای تصاویر بافت و ابر نقاط

در این تحقیق، برای برقراری ارتباط بین فضای دو بعدی تصاویر بافت و ابرنقاط سه بعدی، نقاط نظیر به صورت دستی انتخاب و با استفاده از تبدیل خطی مستقیم تکراری و ماتریس نگاشت ارتباط بین دو فضا در هر استقرار محاسبه گردید. در تبدیل خطی مستقیم تکراری، ضرایب مجهول، بعد از دهمین تکرار همگرا می‌شدند. در جدول (۱) پارامترهای مجهول این مدل ریاضی نمایش داده شده است، که از ضرایب آخرین مرحله تکرار در محاسبات استفاده گردید. در این محاسبات از ۳۷ نقطه نظیر استفاده گردید و با دوباره تصویر کردن نقاط سه بعدی به فضای تصویر، اختلاف مختصات بدست آورده معیاری برای ارزیابی خطای مدل و مختصات در نظر گرفته شد. این محاسبات در جدول (۲) برای تمامی نقاط نظیر در جهت‌ها x و y برای روش تبدیل خطی مستقیم تکراری نشان داده شده است. همچنین محاسبات فوق بر روی همان نقاط نظیر با روش ماتریس نگاشت انجام گرفت و بعد از محاسبه با دوباره تصویر کردن نقاط سه بعدی به فضای تصویر، اختلاف مختصات بدست آورده معیاری برای ارزیابی خطای مدل و مختصات در نظر گرفته شد. این محاسبات در جدول (۳) برای تمامی ۳۷ نقطه در جهت‌ها x و y برای روش ماتریس نگاشت نمایش داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مجهول معادله تبدیل خطی مستقیم تکراری

	M_DLT Coff										
	P11	P12	P13	P14	P21	P22	P23	P24	P31	P32	P33
1	7.993056029	4.109438137	0.198415358	1917.126895	0.009094916	2.817090089	-8.027803947	1097.034714	2.67E-05	0.001876477	0.00010155
2	25.12640191	8.69577836	0.202389791	1963.630674	-0.023257061	5.874780968	-15.57674485	1153.404724	-4.88E-06	0.004033	0.000106213
3	27.17160165	14.321249	0.236876662	2128.37297	-0.08635699	9.668294733	-24.91302858	1199.683818	-5.24E-05	0.00670194	0.000118095
4	45.22077689	24.68956289	0.254507664	2257.62833	-0.19558538	16.60365922	-42.00393193	1294.376696	-0.000132796	0.011583039	0.000124682
5	63.04109776	37.44765754	0.269453588	2406.768186	-0.330710884	25.13388071	-63.03075575	1413.389186	-0.00023134	0.017587074	0.000129484
6	82.37571363	48.7498444	0.290203863	2530.675994	-0.450157441	32.69130767	-81.64551506	1509.971435	-0.000317718	0.022904128	0.000138022
7	87.53009601	52.95218282	0.295293975	2576.54801	-0.494658891	35.50048932	-88.56851839	1548.039372	-0.000349968	0.024881067	0.000139845
8	89.06085846	53.65023139	0.302144931	2584.566824	-0.502209689	35.96910146	-89.71454629	1549.052242	-0.000355181	0.02520952	0.000143209
9	89.03111432	53.59667774	0.300755251	2583.860139	-0.50160977	35.93286066	-89.62716229	1549.723569	-0.000354802	0.025184304	0.000142514
10	89.01552623	53.58828309	0.300555373	2583.753976	-0.501517059	35.92718693	-89.61345537	1549.812841	-0.000354743	0.025180353	0.000142414
11	89.01608934	53.5886202	0.300563246	2583.758797	-0.501520942	35.92741495	-89.61400629	1549.80928	-0.000354746	0.025180512	0.000142418
12	89.01608306	53.58861636	0.30056316	2583.75873	-0.501520893	35.92741235	-89.614	1549.80932	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
13	89.0160831	53.58861638	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741237	-89.61400004	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
14	89.01608309	53.58861637	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741236	-89.61400002	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
15	89.01608307	53.58861637	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741236	-89.61400001	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
16	89.01608309	53.58861637	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741236	-89.61400002	1549.80932	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
17	89.01608307	53.58861637	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741236	-89.61400001	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
18	89.0160831	53.58861638	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741237	-89.61400003	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
19	89.0160831	53.58861638	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741237	-89.61400004	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417
20	89.0160831	53.58861638	0.30056316	2583.75873	-0.501520894	35.92741237	-89.61400004	1549.809319	-0.000354746	0.02518051	0.000142417

جدول ۲- خطای تبدیل خطی مستقیم تکراری

P.N	(pixel) Error-x	Error-y (pixel)	P.N	Error-x (pixel)	Error-y (pixel)
1	-0.2707	-0.9109	20	0.9608	-1.0958
2	0.6876	0.3896	21	-0.0815	-0.7327
3	-0.1518	0.2011	22	0.0879	-0.2633
4	0.2320	0.0781	23	0.7137	0.8674
5	-0.1927	-0.7188	24	-1.2401	-0.0658
6	0.2490	0.9342	25	-0.4977	0.4799
7	0.1079	-0.9778	26	-1.0899	0.1798
8	-0.3658	0.0307	27	0.2967	-1.0144
9	-0.5015	-0.1530	28	0.3120	0.3691
10	-0.9537	0.4725	29	0.4841	-0.9145
11	0.2352	-0.4465	30	0.0483	-0.1797
12	0.5701	-1.0926	31	0.1255	0.9940
13	1.2040	-0.7001	32	0.3585	0.1777
14	0.8485	0.5951	33	-0.0877	-0.8789
15	0.3587	1.4058	34	0.0421	0.3043
16	0.6589	0.5526	35	0.3789	-0.0138
17	-0.0887	0.7629	36	-0.3821	0.9449
18	-0.7601	-0.6686	37	-0.1560	0.7425
19	-1.1380	-0.5687			

جدول ۳- خطای مختصاتی روش ماتریس نگاشت

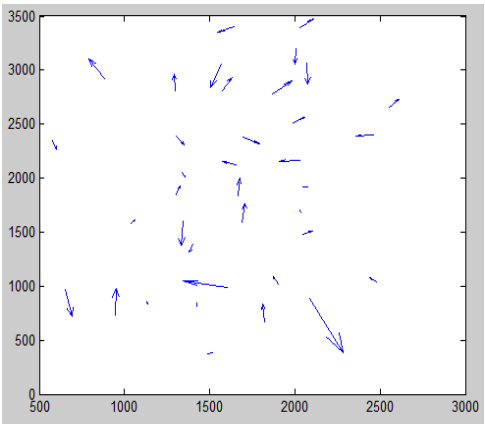
P.N	(pixel) Error-x	Error-y (pixel)	P.N	Error-x (pixel)	Error-y (pixel)
1	-0.1779	-0.9041	20	0.8739	1.1408
2	0.6907	0.2869	21	-0.1594	-0.7170
3	-0.1545	-0.0961	22	0.0160	-0.2751
4	0.2718	-0.0289	23	0.5932	-0.9255
5	-0.1042	-0.7148	24	-1.3517	-0.0992
6	0.3245	0.9355	25	-0.5726	0.2532
7	0.1371	-0.9266	26	-1.2167	0.3608
8	-0.3802	-0.0802	27	0.0586	-0.8003
9	-1.5234	-0.2515	28	0.3322	0.4204
10	-0.9399	0.4231	29	0.4501	-0.8263
11	0.2911	-0.4524	30	0.1938	-0.0911
12	0.6054	-0.0904	31	0.2243	0.0896
13	1.1989	-0.7471	32	0.4051	0.1920
14	0.8141	0.5204	33	0.0095	0.8975
15	1.3167	0.3676	34	0.2106	0.3797
16	0.6358	0.5469	35	0.4182	-0.0658
17	-0.0873	0.7867	36	-0.3226	-0.9025
18	-0.8155	-0.6324	37	-0.0450	0.7566
19	-1.2208	0.4895			

خطاهای فوق به صورت مجموع و میانگین خطاها در دو جهت مختصات طولی و عرضی محاسبه گردید که بیانگر اتفاقی بودن خطاهای موجود از نظر عددی است، چون میانگین خطاها در هر دو جهت مختصاتی نزدیک به صفر است. همچنین، بیشترین و کمترین خطاهای فوق محاسبه گردید که در حدود یک پیکسل خطا داریم که مناسب بودن مدل‌های ریاضی بکار رفته در دو فضای موجود، فضای تصویر و فضای شئی، را بیان می‌کند و میانگین خطاها در هر دو روش زیرپیکسل می‌باشد. تمامی نتایج در جدول (۴) نمایش داده شده است.

جدول ۴- مقایسه حداکثر و میانگین خطاها

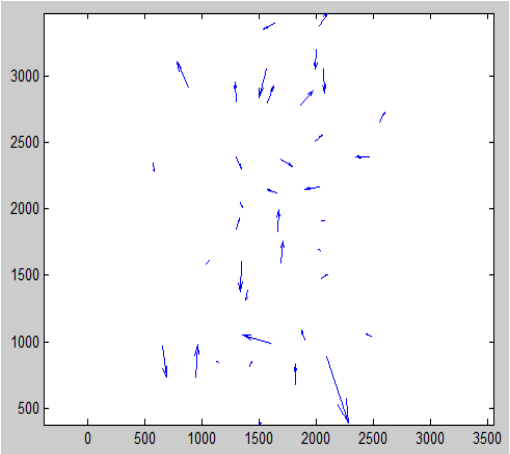
Measures	IDLT Method		PM method	
	x- photo (pixel)	y- photo (pixel)	x- photo (pixel)	y- photo (pixel)
Sum - Error	1.0000	-0.7802	1.0020	-0.9136
Min-Error	-1.5234	-0.9266	-1.2401	-1.0958
Max - Error	1.3167	1.1408	1.2040	1.4058
Mean-Error	0.0270	-0.0211	0.0271	-0.0247

اعداد محاسبه شده در جدول (۴)، بیانگر مجموع خطاهای موجود در مدل ریاضی، خطای موجود در اندازه گیری نقاط متناظر بین دو فضا و خطای مختصات نقاط عکسی دو بعدی و خطای مختصات نقاط شیی است. ترسیم گراف خطاهای موجود در این روش، بیانگر اتفاقی بودن آنهاست چون همه خطاها اندازه‌های مختلف و در جهت‌های تصادفی نمایان شده‌اند که در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل۴- نمایش گرافیکی خطاها در روش تبدیل خطی مستقیم تکراری

ضرایب معادله تبدیل خطی مستقیم تکراری الزاماً نمی‌توانند به صورت صریح مقیاس، دوران و انتقال بین دو فضا را بیان کند. در حالیکه روش ماتریس نگاشت بعنوان مدل ریاضی منتخب در این تحقیق استفاده گردید که نسبت به این روش دارای مزیت‌هایی است. ترسیم گراف خطاهای موجود در روش ماتریس نگاشت نیز، بیانگر اتفاقی بودن آنهاست که در شکل (۵) نمایش داده شده است.

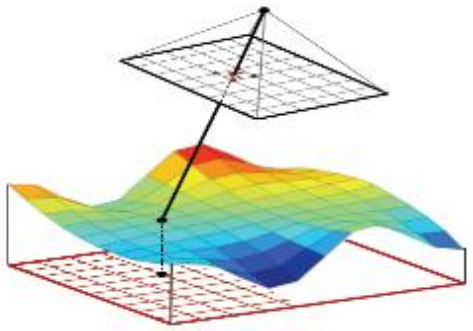


شکل۵- نمایش گرافیکی خطاها در روش ماتریس نگاشت

بررسی و آنالیز خطاهای حاصل از دو روش، تبدیل خطی مستقیم تکراری و روش ماتریس نگاشت، نشان داد که روش ماتریس نگاشت از نظر دقت نسبت به روش تبدیل مستقیم خطی تکراری بهتر بوده و همچنین محاسبه پارامترهای کالیبراسیون دوربین، پارامترها ی توجیه داخلی و خارجی دوربین، با دقت بالایی قابل محاسبه است.

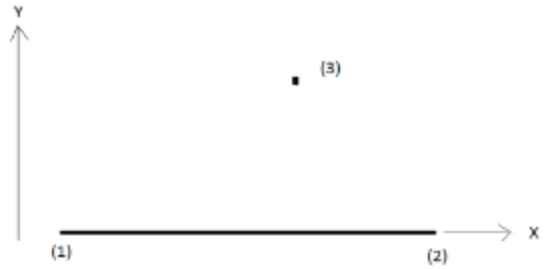
۴-۳- تولید ارتوفتو و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی

برای تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه‌بعدی با بافت واقعی، به دو طریق می توان عمل نمود. در روش اول ابتدا با معلوم بودن پارامترهای توجیه داخلی و خارجی، نقاط از فضای سیستم دوربین به نقاط متناظر تصویری انتقال داده و نهایتاً روی سطح شی نگاشت می شود و در ادامه، هر نقطه از سطح دارای بافت سه بعدی به یک صفحه مسطح به ابعاد شئ سه بعدی، دوباره نگاشت می‌شود و به این صورت ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی تولید می‌شود. در روش دوم، ابتدا یک صفحه مسطح به ابعاد شئ سه بعدی، بعنوان صفحه ارتوفتو صحیح تعریف می‌شود سپس برای هر نقطه از این صفحه، نقطه متناظرش از سطح شئ را بصورت $X = (X, Y, Z(X))$ پیدا کرده و دوباره آن نقطه را با تبدیل ماتریس نگاشت به فضای رنگی تصویر، نگاشت می کند. روند تولید ارتوفتو و مدل سه بعدی با بافت واقعی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل۶- روند تولید ارتوفتو و مدل سه بعدی با بافت واقعی[۱۰]

جهت تولید ارتوفتو صحیح، صفحه تصویر به ابعاد شی بایستی ایجاد گردد. برای این منظور ابتدا حداقل سه نقطه در یکی از وجوه ابنیه فنی در نظر گرفته شد. با معلوم شدن سه نقطه مشترک در روی این صفحه و روی ابر نقطه با استفاده از معادله کانفورمال سه بعدی، صفحه‌ای به موازات ابنیه فنی قرار می‌گیرد و معادله صفحه با این نقاط معلوم می‌گردد. فرض کنید سه نقطه (۱)، (۲) و (۳) در شکل (۸) در روی نقاط لیزر اسکن انتخاب شود، نقطه (۱) و (۲) در امتداد هم (در یک z) انتخاب می‌شوند، لذا با توجه به شکل (۸)، سه نقطه مذکور در دو سیستم مختصات صفحه تصویر و ابرنقاط، مختصات معلوم خواهد داشت.



شکل۷- تعریف صفحه ارتوفتو صحیح حداقل با سه نقطه

سیستم مختصات صفحه تصویر به صورت $(x\ \ y\ \ z = d)^T$ و سیستم مختصات لیزری به صورت $(X\ \ Y\ \ Z)^T$ می‌باشد. نقطه (۱) و(۲) را در یک امتداد (ارتفاع‌های یکسان) در نظر گرفته می‌شود و فاصله این دو

نقطه نسبت به هم معلوم است لذا این امتداد می‌تواند محور x باشد و همچنین ضریب مقیاس سیستم مختصات تعریفی معلوم می‌گردد و مختصات y نقطه (۳) فاصله‌های عمود از محور (۱)و (۲) است و x آن فاصله‌پای عمود از نقطه (۱) می‌باشد. حال سه نقطه در دو سیستم مختصات معلوم بوده و با تبدیل کانفورمال سه بعدی، قابل تبدیل به همدیگر هستند. صفحه تصویر تعریف شده به موازات ابر نقطه و به فاصله d از آن قرار می‌گیرد که d با جاگذاری یکی از مختصات، قابل محاسبه است.

۴-۴- اختصاص رنگ‌های واقعی از تصاویر بافت برای مدل‌های سه بعدی

برای اختصاص رنگ‌های واقعی از تصاویر بافت برای مدل‌های سه بعدی، بایستی داده‌های سه بعدی نامنظم لیزراسکن زمینی به به داده‌های منظم به ابعاد تصاویر بافت تبدیل گردد. برای تبدیل داده‌های سه بعدی نامنظم ، صفحه مسطحی به ابعاد حداقل و حداکثرX و Y داده-های لیزر تعریف گردید و سپس Z هر نقطه را در صفحه با استفاده از نقاط همسایگی از داده لیزر با انترپلاسیون محاسبه گردید. این داده‌های منظم به ابعاد تصاویر بافت انتخاب شدند و فاصله شبکه داده‌های منظم متناسب با پیکسل‌های تصویر بافت انتخاب گردید. سپس هر نقطه از داده‌های منظم را در تمامی ماتریس نگاشت تصاویر بافت قرار داده و با نگاشت دوباره داده‌های منظم لیزر اسکنر به فضای تصویر، بعد از تست و کنترل کردن اینکه نقاط در محدوده کدام تصویر قرار دارد یا نه ، R,G,B یا رنگ واقعی از تصاویر بافت گرفته شد و نهایتاً حداکثر RGB برای هر شبکه داده منظم جهت تولید ارتوفتو انتخاب گردید. اینکار بر روی هر دو داده های تحقیق انجام گرفت که نتایج آن در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است. ابتدا بر روی نمونه ابر نقاط پل سنگی لرستان کار شد به دلیل عدم وجود نقاط متناظر مشخص (تارگت‌ها) بین ابر نقاط و تصاویر رنگی، نقاط متناظر به صورت دستی انتخاب گردید که دارای خطای نسبتا زیادتری نسبت به ابر نقاط گنبد ابرکوه یزد داشت که در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین خطا در دو مدل ریاضی مورد استفاده در ابرنقاط پل سنگی لرستان

Method	Mean-Error	
	x- photo(pixel)	y- photo(pixel)
IDLT	-2.3822	-5.79E-10
PM	0.1547	0.3309

چون میانگین خطاها در روش ماتریس نگاشت زیر پیکسل بود لذا از آن روش در تولید ارتوفتو صحیح و مدل سه بعدی با نگاشت بافت واقعی از تصاویر رنگی استفاده گردید.

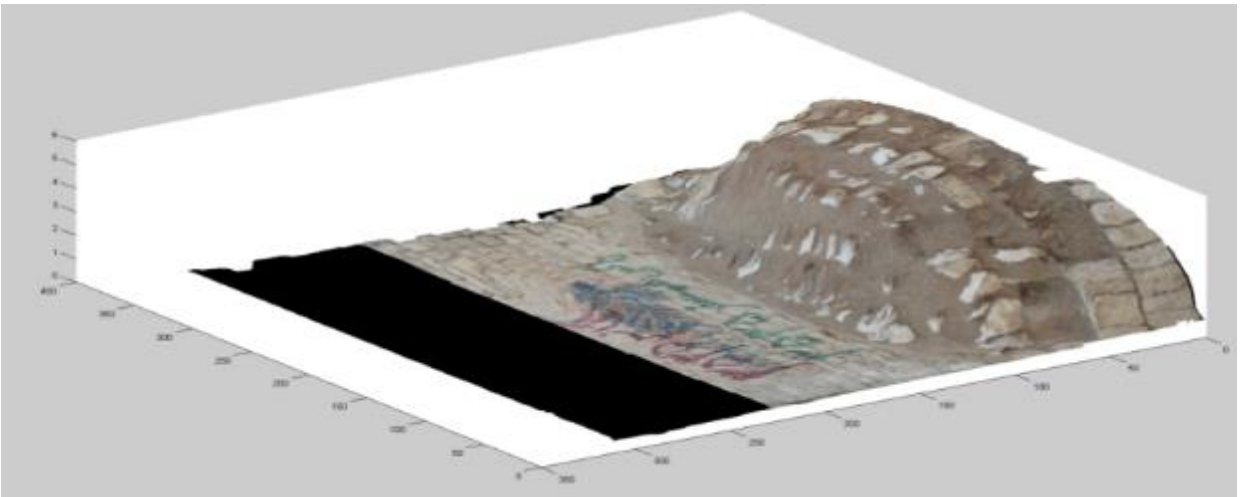
(الف)- عکس بافت گرفته شده

(ب)- ارتوفتو تولید شده

شکل ۸- ارتوفتو تولید شده از ابرنقاط پل سنگی لرستان

در ارتوفتو تولید شده به دلیل اینکه نقاط متناظر مشخص (تارگت‌ها) بین ابر نقاط و تصاویر رنگی وجود نداشت و نقاط متناظر به صورت دستی انتخاب گردید که در قسمت بالای آن که نقاط مشخصی وجود نداشت و نقاط متناظر بین دو سیستم انتخاب نگردیده بود در نتیجه اعوجاجاتی در قسمتی از آن مشاهده می‌شود. لذا اهمیت

توزیع تقریباً یکنواخت نقاط متناظر بین دو سیستم را بیان می کند. بعد از تولید ارتوفتو برای هر نقطه از صفحه منظم تعریف شده که دارای Z انترپلاسیون نیز می‌باشد به صورت رویه سه بعدی همراه با بافت قابل نمایش خواهد بود یعنی نگاشت بافت نیز صورت می‌گیرد که در شکل (۹) نمونه‌ها از این نگاشت یافت را نمایش می‌دهد.



شکل ۹- نمونه‌ای از نگاشت بافت بر مدل سه بعدی در ابرنقاط پل سنگی لرستان

این فرایند بر روی ابر نقطه دوم، گنبد ابرکوه یزد، نیز انجام گرفت و وجود نقاط متناظر مشخص (تارگت‌ها) بین ابر نقاط و تصاویر رنگی، این فرآیند با دقت خوبی نسبت به ابر نقطه قبلی انجام گرفت ولی به دلیل توزیع نامناسب تارگت ها در سطح ابنیه در گوشه کنار آن اعوجاجاتی رخ داده است. میانگین خطاها در هر دو مدل ریاضی محاسبه و در جدول (۶) به نمایش در آمده است. در این ابر نقاط نیز، چون میانگین خطاها در روش ماتریس نگاشت زیر پیکسل بود لذا از آن روش در تولید ارتوفتو صحیح و مدل سه بعدی با نگاشت بافت واقعی از تصاویر رنگی استفاده گردید.

جدول ۶- مقایسه حداکثر و میانگین خطا در دو مدل ریاضی مورد استفاده در ابرنقاط ابرکوه یزد

Method	Mean-Error	
	x- photo(pixel)	y- photo(pixel)
IDLT	5.40435E-05	3.64181E-05
PM	-4.23685E-13	7.66804E-14

الف

ب

شکل ۱۰- ارتوفتو تولید شده از ابر نقاط گنبد ابرکوه یزد؛ (الف)- در محدوده جفت عکس، (ب)- محدوده تک عکس

بعد از تولید ارتوفتو برای هر نقطه از صفحه منظم تعریف شده که دارای Z انترپلاسیون نیز می‌باشد به صورت رویه سه بعدی همراه با بافت قابل نمایش خواهد بود یعنی نگاشت بافت نیز صورت می‌گیرد که در شکل (۱۱) نمونه‌ها از این نگاشت یافت را نمایش می‌دهد.

الف

ب

شکل ۱۱- نمونه‌ای از نگاشت بافت بر مدل سه بعدی در ابر نقاط گنبد ابرکوه یزد؛ (الف)- در محدوده تک عکس، (ب)- محدوده جفت عکس

۵- نتایج و بحث

هدف اصلی از این پروژه پرداختن به روشی برای تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی با ادغام داده‌های فتوگرامتری و لیزراسکن زمینی بود که در چهار بخش، مبانی تئوریک مسئله، ارتباط بین فضای دو بعدی تصویر و نقاط سه بعدی لیزر اسکنر زمینی، تبدیل داده‌های سه بعدی نامنظم به داده‌های منظم و تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی بر روی دوسری از داده های مختلف مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. در این تحقیق یک مجموعه داده مورد استفاده، پل سنگی لرستان، دارای نقاط کنترل و تارگت مشخصی بین دو فضای داده، فضای تصویر و فضای ابر نقاط لیزر اسکن، نبود و نقاط متناظر بصورت دستی، بطور پراکنده و با توزیع یکنواخت انتخاب گردید. چون میانگین خطای مختصاتی زیر پیکسل بود، علیرغم وجود خطای بیشتر نسبت به مجموعه داده دیگر، تولید ارتوفتو صحیح و مدل-های سه بعدی با بافت واقعی با حداقل اعوجاج رنگی و با دقت بهتری انجام گرفت. در مقابل دیگر مجموعه داده مورد استفاده، گنبد ابرکوه یزد، که دارای نقاط متناظر مشخص (تارگت‌ها) بین ابر نقاط و تصاویر رنگی بود ولی اکثر تارگت‌ها در یک وجه از ابنیه باستانی بود لذا به دلیل توزیع نامناسب تارگت ها در سطح ابنیه، اعوجاجاتی بیشتری در تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی رخ داد. لذا توزیع نقاط و تارگتها متناظر بایستی در تمامی قسمت ها شی بصورت یکنواخت و به حد کافی وجود داشته باشد.

همچنین، برای بدست آوردن رنگ و بافت واقعی از چندین تصویر استفاده شد، تصاویری که دارای اختلاف کیفیت و کنتراست محسوسی بودند در روش ماگزیمم RGB هیچ رنگی از تصاویر با کیفیت و کنتراست پایین انتخاب نمی‌شوند لذا ضروری است تصاویر بافت با کیفیت رایومتریکی یکسان جمع آوری گردند در غیر اینصورت از بین چندین تصاویر فقط یک تصویر بافت با مورد استفاده قرار خواهد گرفت، لذا تصاویر بافت قبل از انجام فرایند نیاز به پیش پردازش و همسان سازی هیستوگرام دارند تا بافت ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی به واقعیت نزدیکتر و با کیفیت بالایی انجام گیرد. همچنین تصاویر بافت بایستی با همدیگر همپوشانی کافی داشته باشند و نقاط مشترک حداقل ۸ تا بین آنها باشد که بتوان ارتباط آنها را با دقت هندسی بالایی برقرار کرد در غیر این صورت اعوجاجاتی بیشتری در تولیدات خروجی رخ می‌دهد.

با بررسی خطاها و اعوجاجات رنگی نتایج، مشاهده گردید که این خطاها، علاوه بر نوع مدل ریاضی مورد استفاده، به دقت نقاط اندازه‌گیری در فضای تصویر و ابر نقاط نیز وابستگی شدید دارد. همچنین کیفیت نتایج، وابستگی زیاد به تراکم تبدیل داده‌های سه بعدی نامنظم به داده‌های منظم دارد هر چه شبکه منظم نقاط متراکم و

نزدیک به ابعاد تصاویر بافت انتخاب شود به همان نسبت ارتوفتو و مدل سه بعدی با بافت واقعی با کیفیت بهتری تولید می شود. همچنین، برای آنالیز بیشتر خطاها در این تحقیق، خطاها به صورت مجموع و میانگین در دو جهت مختصات طولی و عرضی محاسبه گردید که بیانگر اتفاقی بودن خطاهای موجود از نظر عددی بود، چون میانگین خطاها در هر دو جهت مختصاتی نزدیک به صفر بود. علاوه بر آن، محاسبه بیشترین و کمترین خطاهای حدود یک پیکسل بدست آمد که مناسب بودن مدل‌های ریاضی بکار رفته در دو فضای موجود، فضای تصویر و فضای شئی، را بیان می‌کرد. طوریکه میانگین خطاها در هر دو روش زیرپیکسل بدست آمد، ولی روش ماتریس نگاشت از نظر محاسباتی ساده‌تر و از لحاظ هندسی دارای دقت بهتری نسبت به روی تبدیل مستقیم تکراری بود. به عبارت دیگر، بررسی و آنالیز خطاهای حاصل از دو روش، تبدیل خطی مستقیم تکراری و روش ماتریس نگاشت، نشان داد که روش ماتریس نگاشت از نظر دقت نسبت به روش تبدیل مستقیم خطی تکراری بهتر بوده و همچنین محاسبه پارامترهای کالیبراسیون دوربین، پارامترها ی توجیه داخلی و خارجی دوربین، با دقت بالایی قابل محاسبه است. طوریکه میانگین خطاها در دو جهت مختصات طولی و عرضی در روش ماتریس نگاشت به ترتیب، در ابرنقاط پل سنگی لرستان۰,۱۵ و ۰,۳۳ در واحد پیکسل و در ابرنقاط ابرکوه یزد 4.24E-13- و 7.67E-14 در واحد پیکسل بود. همچنین این خطاها، برای روش تبدیل خطی مستقیم تکراری به ترتیب 2.38- و 5.79E-10- در واحد پیکسل برای ابر نقاط اول و 5.40E-5 و 3.64E-5 برای ابر نقاط دوم محاسبه گردید. لذا علاوه بر میزان خطا، حسن روش تبدیل ماتریس نگاشت این است که نیاز به مقادیر اولیه ندارد و به صورت ضرب ماتریسی عمل می‌کند که استفاده از آن بعنوان یک روش با ثبات برای تولید ارتوفتو صحیح و مدل‌های سه بعدی با بافت واقعی توصیه می‌شود.

سپاسگذاری

نویسندگان از جناب آقای مهندس علی ابذل که داده-های تحقیق حاضر را در اختیار مولفین قرار دادند، قدردانی و سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Abdel-Aziz, Y., (1971). "Direct linear transformation from comparator coordinates in close-range photogrammetry, ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry in Illinois, 1971.

[2] Ackermann, F., (1999). "Airborne laser scanning—present status and future expectations." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2): 64-67.

[3] Chen, S.E., (1995). "Quicktime VR: An image-based approach to virtual environment navigation, Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, pp. 29-38.

[4] Colombo, C., Del Bimbo, A. and Pernici, F., (2005). "Metric 3D reconstruction and texture acquisition of surfaces of revolution from a single uncalibrated view." Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 27(1): 99-114.

[5] De Lathauwer, L., De Moor, B., Vandewalle, J. and by Higher-Order, B.S.S., (1994). "Singular Value Decomposition, Proc. EUSIPCO-94, Edinburgh, Scotland, UK, pp. 175-178.

[6] Faugeras, O., (1993). "Three-dimensional computer vision :a geometric viewpoint. MIT press.

[7] Fusiello, A., Trucco, E. and Verri, A., (2000). "A compact algorithm for rectification of stereo pairs." Machine Vision and Applications, 12(1): 16-22.

[8] Ganapathy, S., (1984). "Decomposition of transformation matrices for robot vision, Robotics and Automation. Proceedings. 1984 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 130-139.

[9] Gao, H., Wu, C., Gao, L. and Li, B., (2006). "An improved two-stage camera calibration method, Intelligent Control and Automation, 2006 .WCICA 2006. The Sixth World Congress on. IEEE, pp. 9514-9518.

[10] Georgopoulos, A. and Natsis, S., (2008). "A Simpler Method for Large Scale Digital Orthophoto Production." The International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 37: 266.

[11] Hartley, R. and Zisserman, A., "Multiple View Geometry in Computer Vision (Cambridge University, 2003)." C1 C3.

[12] Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A. and Kager, H., (2004). "Terrestrial laserscanning and photogrammetry–acquisition techniques complementing one another." ISPRS Archives, 35.

[13] Lambers, K., Eisenbeiss, H., Sauerbier, M., Kupferschmidt, D., Gaisecker, T., Sotoodeh, S. and Hanusch, T., (2007). "Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru." Journal of Archaeological Science, 34(10): 1702-1712.

[14] Li-Chee-Ming, J. and Armenakis, C., (2010). "Fusion of optical and terrestrial laser scanner data, The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics-Shaping Canada's Competitive Landscape.

[15] Lin, T.-T., Hsiung, Y.-K., Hong, G.-L., Chang, H.-K. and Lu, F.-M., (2008). "Development of a virtual reality GIS using stereo vision." computers and electronics in agriculture, 63(1): 38-48.

[16] Lippman, A., (1980). "Movie-maps: An application of the optical videodisc to computer graphics, ACM SIGGRAPH Computer Graphics. ACM, pp. 32-42.

[17] Owens, R., (1997). "Camera calibration.

[18] Rusinkiewicz, S. and Levoy, M., (2001). "Efficient variants of the ICP algorithm, 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. IEEE, pp. 145-152.

[19] Sgrenzaroli, M., (2005). "Cultural heritage۳ D reconstruction using high resolution laser scanner: new frontiers data processing, CIPA 2005 XX International Symposium.

[20] Shimamura, J., Takemura, H., Yokoy, N. and Yamazawa, K., (2000). "Construction and presentation of a virtual environment using panoramic stereo images of a real scene and computer graphics models, Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on. IEEE, pp. 463-467.

[21] Trucco, E. and Verri, A., (1998). "Introductory techniques for 3-D computer vision, 201 .Prentice Hall Englewood Cliffs.