

کاربردهای فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی: رویکردها، چالش‌ها و چشم‌اندازها

محسن قدس^۱ ✉

نوع مقاله: علمی پژوهشی

صفحه ۴۳ تا ۵۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰

چکیده

با پیشرفت فناوری‌های تصویربرداری و پردازش داده‌های مکانی، فتوگرامتری به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در حوزه مستندسازی و بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی مطرح شده است. این فناوری با بهره‌گیری از تصاویر دوبعدی و تبدیل آن‌ها به مدل‌های سه‌بعدی دقیق، امکان ثبت و تحلیل جزئیات معماری و بافت‌های تاریخی را فراهم می‌کند. اهمیت این روش در حفاظت رقمی از میراث فرهنگی به‌ویژه در برابر عوامل مخرب طبیعی و انسانی، روزبه‌روز افزایش یافته است. در این مقاله، ابتدا اصول و مبانی فتوگرامتری و جایگاه آن در حوزه حفاظت آثار تاریخی بررسی می‌شود. سپس، کاربردهای این فناوری در بازسازی دیجیتال، پایش تغییرات، تحلیل سازه‌ای و برنامه‌ریزی مرمتی ارائه می‌گردد. همچنین، چالش‌های موجود در زمینه کیفیت داده‌ها، پردازش، و مدیریت مدل‌های سه‌بعدی و راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای دقت و کارایی فتوگرامتری تحلیل خواهد شد. هدف این مطالعه، تبیین ظرفیت‌های فتوگرامتری به‌عنوان یک ابزار بین‌رشته‌ای برای ترکیب میراث فرهنگی با فناوری‌های نوین مانند GIS، لیزر اسکن و هوش مصنوعی است. نتایج این پژوهش می‌تواند به متخصصان مرمت، معماران، باستان‌شناسان و پژوهشگران علوم زمین در طراحی پروژه‌های حفاظت رقمی و بازسازی مجازی آثار تاریخی کمک کند.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری، بازسازی سه‌بعدی، آثار تاریخی، حفاظت دیجیتال، GIS، مدل‌سازی سه‌بعدی

^۱ ✉ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران (نویسنده مسئول)

^۱ ✉ mohsen.ghods@semnaniau.ac.ir

مقدمه

حفاظت و مستندسازی آثار تاریخی از دیرباز یکی از دغدغه‌های اصلی جوامع انسانی بوده است. آثار تاریخی نه تنها بازتاب هویت و فرهنگ یک ملت هستند، بلکه نقش مهمی در انتقال دانش و تجربه نسل‌های گذشته به آینده دارند. با این حال، عوامل متعددی همچون فرسایش طبیعی، بلایای طبیعی، جنگ‌ها، تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی، تهدیدی جدی برای بقای این آثار به شمار می‌آیند. از این رو، یافتن راهکارهایی برای ثبت، بازسازی و حفاظت رقومی^۲ از این میراث ارزشمند، به یکی از اولویت‌های پژوهشی و اجرایی در حوزه‌های مرتبط با میراث فرهنگی تبدیل شده است (کواکس، ۲۰۱۵). فتوگرامتری به عنوان یک روش علمی و فناورانه، امکان استخراج اطلاعات دقیق مکانی و هندسی از تصاویر را فراهم می‌کند. این روش که پیش‌تر عمدتاً در نقشه‌برداری و مهندسی ژئوماتیک به کار گرفته می‌شد، اکنون جایگاه ویژه‌ای در حفاظت میراث فرهنگی یافته است. با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته پردازش تصویر و مدل‌سازی سه‌بعدی، می‌توان تصاویر ثبت‌شده از یک اثر تاریخی را به مدل‌های سه‌بعدی با دقت بالا تبدیل کرد؛ مدلی که نه تنها قابل استفاده برای مستندسازی دقیق هستند، بلکه می‌توانند در بازسازی مجازی و حتی چاپ سه‌بعدی بخش‌های آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گیرند (الشاوابکه و هالا، ۲۰۰۶). پیشرفت‌های اخیر در حوزه فتوگرامتری دیجیتال، از جمله توسعه نرم‌افزارهای متن‌باز و تجاری، به کارگیری دوربین‌های با وضوح بالا، و ترکیب این فناوری با سنجش از دور، لیزر اسکن زمینی^۳

(TLS) و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۴ (GIS)، موجب افزایش دقت و کارایی آن شده است. این تحولات باعث شده تا فتوگرامتری نه تنها به ابزاری برای ثبت داده‌های تصویری، بلکه به رویکردی جامع برای تحلیل، بازسازی و مدیریت اطلاعات میراث فرهنگی تبدیل شود. در این مقاله، ابتدا مروری بر ادبیات و پژوهش‌های پیشین در زمینه کاربردهای فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی ارائه خواهد شد. سپس، انواع رویکردها و فنون رایج در این حوزه، شامل فتوگرامتری برد کوتاه، پهنادمحور و پانورامیک، بررسی می‌شود. در ادامه، با ارائه نمونه‌های موردی از پروژه‌های ملی و بین‌المللی، نقاط قوت و محدودیت‌های این فناوری تحلیل شده و در نهایت، راهکارهایی برای بهبود کیفیت مدل‌سازی و یکپارچه‌سازی فتوگرامتری با فناوری‌های نوین مطرح خواهد شد.

مروری بر ادبیات و مبانی نظری

تاریخچه فتوگرامتری و سیر تحول آن

فتوگرامتری به عنوان یک شاخه علمی در اواسط قرن نوزدهم میلادی ظهور کرد. نخستین تلاش‌ها برای استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر به دهه ۱۸۵۰ بازمی‌گردد، زمانی که «ایم. ای. لوسدا» و «ایم. ای. لا روس» از دوربین‌های اولیه برای تهیه نقشه‌های توپوگرافی استفاده کردند. در آن دوران، فتوگرامتری عمدتاً در قالب روش‌های آنالوگ^۵ و با استفاده از دستگاه‌های مکانیکی انجام می‌شد. این دستگاه‌ها امکان بازتولید سه‌بعدی اجسام را از طریق مقایسه تصاویر دوبعدی فراهم می‌کردند (سیف، ۲۰۲۲).

^۴ Geographic Information System

^۵ Analog

^۲ Digital Preservation

^۳ Terrain Laser Scan

با گذر زمان و پیشرفت فناوری عکاسی، به‌ویژه ظهور فیلم‌های حساس به نور و توسعه لنزهای با کیفیت بالاتر، دقت و کاربرد فتوگرامتری به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافت. در نیمه دوم قرن بیستم، ورود رایانه‌ها و پردازش رقومی باعث شکل‌گیری فتوگرامتری تحلیلی شد که در آن ترکیبی از محاسبات ریاضی و ابزارهای نوری برای بهبود دقت به کار گرفته می‌شد (وروبل، ۲۰۰۶).

از دهه ۱۹۹۰ به بعد، با پیشرفت دوربین‌های دیجیتال، الگوریتم‌های پردازش تصویر و قدرت پردازشی رایانه‌ها، فتوگرامتری وارد عصر رقومی شد. این تحول امکان کار با تصاویر بدون نیاز به فیلم فیزیکی، ذخیره‌سازی داده‌های حجیم، و انجام محاسبات پیچیده در زمان کوتاه را فراهم کرد. در همین دوره، کاربرد فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی، به دلیل نیاز به مستندسازی دقیق و سریع، رشد قابل‌توجهی یافت (هستلر و همکاران، ۲۰۲۴).

اصول علمی فتوگرامتری

فتوگرامتری علمی است که با استفاده از تصاویر دوبعدی، اطلاعات مکانی و هندسی اجسام را استخراج می‌کند. این فرآیند مبتنی بر اصول هندسه پرسپکتیو و مکان‌یابی نسبی است. در ساده‌ترین حالت، با داشتن دو تصویر از یک جسم از زوایای مختلف، می‌توان مختصات سه‌بعدی نقاط روی آن جسم را محاسبه کرد. این اصل مشابه عملکرد بینایی دوچشمی انسان است (اشنایدر و فروسترنر، ۲۰۲۰).

گام‌های اصلی در فتوگرامتری دیجیتال

در فتوگرامتری دیجیتال، ابتدا داده‌ها با تهیه تصاویر دارای همپوشانی مناسب، یعنی حداقل ۶۰ درصد در محور طولی و ۳۰ درصد در محور عرضی، از طریق دوربین‌های زمینی، پهپادها یا تجهیزات هوایی گردآوری می‌شوند. سپس کالیبراسیون دوربین برای تصحیح اعوجاج‌های لنز و تعیین پارامترهای داخلی و خارجی آن انجام می‌گیرد تا دقت مدل‌سازی افزایش یابد. در ادامه، با استفاده از الگوریتم‌های شناسایی ویژگی مانند SIFT⁶ یا SURF⁷، نقاط هم‌نام^۸ یا مشترک میان تصاویر مختلف شناسایی و تطبیق داده می‌شوند. پس از آن، هندسه نسبی تصاویر با تعیین موقعیت و جهت‌گیری هر تصویر نسبت به دیگر تصاویر محاسبه می‌شود. بر این اساس، ابرنقاط سه‌بعدی^۹ از بازسازی هندسه سه‌بعدی بر پایه نقاط هم‌نام و داده‌های تصویری تولید می‌شود. در نهایت، مدل مش‌بندی شده ایجاد و فرآیند بافت‌گذاری^{۱۰} برای اعمال جزئیات رنگ و بافت بر سطح سه‌بعدی انجام می‌شود. (فریزر، ۲۰۰۱) (التونتاش، ۲۰۲۱)

دسته‌بندی روش‌های فتوگرامتری

فتوگرامتری را می‌توان بر اساس فاصله عکسبرداری، نوع تجهیزات و روش پردازش به چند دسته تقسیم کرد. در فتوگرامتری برد کوتاه^{۱۱}، از دوربین‌های ثابت یا دستی در فاصله‌ای کمتر از ۵۰ متر استفاده می‌شود تا جزئیات دقیق ثبت گردد و این روش به‌ویژه برای آثار تاریخی کوچک یا بخش‌های ظریف سازه‌ها مناسب است. فتوگرامتری هوایی^{۱۲} با بهره‌گیری از هواپیما، هلیکوپتر یا پهپاد برای پوشش مناطق وسیع به کار می‌رود و در

¹⁰ Texturing

¹¹ Close range photogrammetry

¹² Aerial photogrammetry

⁶ Scale-Invariant Feature Transform

⁷ Speed Up Robust Feature

⁸ Tie Points

⁹ Point Cloud

مستندسازی محوطه‌های باستانی یا مجموعه‌های تاریخی گسترده کاربرد دارد. در فتوگرامتری پانورامیک و کروی^{۱۳}، میدان دید گسترده با استفاده از لنزهای خاص یا ترکیب تصاویر متعدد ثبت می‌شود که این روش برای محیط‌های داخلی بناهای تاریخی بسیار مناسب است. همچنین فتوگرامتری استریو و چندتصویری^{۱۴} با استفاده از تصاویر جفتی یا چندگانه انجام می‌شود تا دقت هندسی افزایش یافته و جزئیات پیچیده به‌طور کامل بازسازی شوند. (دانشمند و همکاران، ۲۰۱۸).

جایگاه فتوگرامتری در بازسازی آثار تاریخی

کاربرد فتوگرامتری در حوزه میراث فرهنگی از دو جهت اهمیت دارد. نخست، حفاظت رقومی که شامل ثبت نسخه‌ای دقیق و سه‌بعدی از اثر تاریخی است تا در صورت آسیب یا نابودی، امکان بازسازی مجدد آن فراهم شود. دوم، تحلیل و برنامه‌ریزی مرمتی که با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی امکان ارزیابی آسیب‌ها، شبیه‌سازی مداخلات مرمتی و پیش‌بینی اثرات تغییرات محیطی به دست می‌آید. به عنوان نمونه، پروژه CyArk در سطح جهانی با بهره‌گیری از فتوگرامتری و لیزر اسکن، هزاران اثر تاریخی را به صورت رقومی مستند کرده است (ایماز، ۲۰۰۷). در ایران نیز پروژه‌های مشابهی مانند مستندسازی سه‌بعدی تخت جمشید و ارگ بم با استفاده از فتوگرامتری پهپادمحور انجام شده است.

پژوهش‌های اخیر و نوآوری‌ها

تحقیقات جدید در حوزه فتوگرامتری برای بازسازی آثار تاریخی بر چند محور کلیدی متمرکز شده‌اند. ابتدا، یکپارچه‌سازی فتوگرامتری با فناوری لیزر اسکن^{۱۵} به

منظور افزایش دقت و پر کردن نقاط کور در داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است (کالیزی، ۲۰۲۳). همچنین به‌کارگیری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در شناسایی ویژگی‌ها و حذف نویز از داده‌ها از دیگر محورهای مهم است (گیرباسیا، ۲۰۲۴). خودکارسازی پردازش تصاویر برای کاهش زمان مدل‌سازی و کاهش نیاز به مداخله انسانی نیز مورد بررسی قرار دارد (آپولونیو و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، توسعه نرم‌افزارهای متن‌باز مانند Meshroom و OpenMVG، امکان دسترسی ارزان و انعطاف‌پذیر به فرآیند مدل‌سازی را فراهم کرده است (پالستینی و باسو، ۲۰۱۹). نهایتاً، ترکیب داده‌های فتوگرامتری با GIS برای ایجاد پایگاه‌های داده مکانی-زمانی و انجام تحلیل‌های فضایی پیشرفته نیز از زمینه‌های تحقیقاتی مهم محسوب می‌شود (پترسکو، ۲۰۱۰).

روش‌شناسی و فرآیند اجرای فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی

روش‌شناسی فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی بر اساس یک زنجیره عملیاتی متشکل از مراحل گردآوری داده، پردازش، مدل‌سازی و تحلیل است. این زنجیره می‌تواند بسته به شرایط پروژه، مقیاس اثر تاریخی، و اهداف تحقیقاتی تغییر کند، اما اصول کلی آن ثابت است. در این بخش، گام‌های اجرایی فتوگرامتری، ابزارها و نرم‌افزارهای رایج، و مثال‌های عملی از پروژه‌های موفق ایران و جهان ارائه می‌شود.

¹⁵ LiDAR

¹³ Panoramic and spherical photogrammetry

¹⁴ Stereo and multi-image photogrammetry

مراحل اصلی اجرای پروژه فتوگرامتری

برنامه‌ریزی پروژه

برنامه‌ریزی دقیق پیش از آغاز عملیات میدانی نقش مهمی در کیفیت خروجی نهایی دارد و شامل: (۱) تعیین اهداف پروژه مانند حفاظت دیجیتال، بازسازی آسیب‌ها، تحلیل سازه‌ای یا مرمت مجازی، (۲) بررسی شرایط محیطی از جمله نور، وضعیت جوی و محدودیت‌های دسترسی، (۳) انتخاب نوع تجهیزات نظیر دوربین، لنز، پهپاد یا سه‌پایه، مشخص کردن مسیر حرکت دوربین یا پهپاد و زاویه‌های عکسبرداری، و در نهایت (۴) تعیین میزان همپوشانی تصاویر برای دستیابی به دقت بهینه است.

گردآوری داده‌ها

این مرحله به ثبت تصاویر با کیفیت و همپوشانی مناسب اختصاص دارد و بسته به نوع اثر تاریخی، سه رویکرد اصلی وجود دارد. نخست، عکسبرداری زمینی برد کوتاه که برای ثبت جزئیات ظریف مانند کتیبه‌ها، تزئینات و ستون‌ها به کار می‌رود. دوم، عکسبرداری هوایی با پهپاد که مناسب کل مجموعه یا بناهایی با ارتفاع یا وسعت زیاد است. سوم، تصویربرداری داخلی^{۱۶} که برای مستندسازی فضاهای داخلی و سقف‌ها استفاده می‌شود.

پیش‌پردازش تصاویر

پیش‌پردازش تصاویر شامل تصحیح رنگ و نور، حذف تصاویر تار یا خارج از فوکوس، و تصحیح اعوجاج لنز با استفاده از نرم‌افزارهای کالیبراسیون مانند Agisoft Lens است.

پردازش فتوگرامتری

پردازش فتوگرامتری با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی انجام می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به Agisoft Metashape با دقت بالا و قابلیت کار با پروژه‌های بزرگ، RealityCapture با سرعت بالای پردازش، Meshroom که متن‌باز و رایگان است، و Pix4Dmapper که برای پهپاد و عکسبرداری زمینی مناسب است، اشاره کرد.

مراحل پردازش شامل (۱) تطبیق تصاویر و محاسبه موقعیت نسبی آن‌ها، (۲) تولید ابرنقاط متراکم، (۳) ایجاد مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده، (۴) اعمال بافت رنگی بر روی مدل، در نهایت (۵) مقیاس‌دهی و تعیین موقعیت جغرافیایی می‌باشد.

پس‌پردازش و بهینه‌سازی مدل

مدل سه‌بعدی خام ممکن است نیاز به حذف نویز، پر کردن حفره‌ها، و بهبود بافت داشته باشد. ابزارهایی مانند Blender یا Autodesk Meshmixer برای این مرحله مفید هستند.

تحلیل و کاربرد مدل

مدل نهایی می‌تواند برای شبیه‌سازی تغییرات سازه در طول زمان، مقایسه وضعیت فعلی با داده‌های گذشته، چاپ سه‌بعدی بخش‌های آسیب‌دیده، و ایجاد تورهای مجازی و واقعیت افزوده (AR/VR) مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۱ فلوچارت مراحل اصلی اجرای پروژه فتوگرامتری را نشان می‌دهد.

¹⁶ Indoor Photogrammetry



شکل ۱. فلوچارت مراحل اصلی اجرای پروژه فتوگرامتری

مثال‌های عملی از پروژه‌های بین‌المللی

پروژه CyArk

CyArk یک سازمان غیرانتفاعی است که با هدف مستندسازی رقومی آثار جهانی یونسکو فعالیت می‌کند. این پروژه ترکیبی از فتوگرامتری و لیزر اسکن را برای

ثبت دقیق معابد، قلعه‌ها و بناهای تاریخی در بیش از ۴۰ کشور به کار برده است. یکی از موفق‌ترین نمونه‌ها، مستندسازی معبد آنگکور وات^{۱۷} در کامبوج است که با استفاده از پهپاد و فتوگرامتری دقیق، مدل سه‌بعدی کامل آن در دسترس پژوهشگران قرار گرفت.

¹⁷ Angkor Wat



شکل ۲. مدل سه بعدی معبد آنگکور وات در کامبوج که با استفاده از پهپاد و فتوگرامتری دقیق ایجاد شده است.

فتوگرامتری، موفق به بازسازی رقومی معابد و طاق‌های تاریخی شدند. این مدل‌ها به‌عنوان مرجع برای مرمت فیزیکی نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

پروژه بازسازی پالمیرا در سوریه

پس از تخریب بخش‌هایی از شهر باستانی پالمیرا، تیمی از پژوهشگران با استفاده از تصاویر آرشویی و



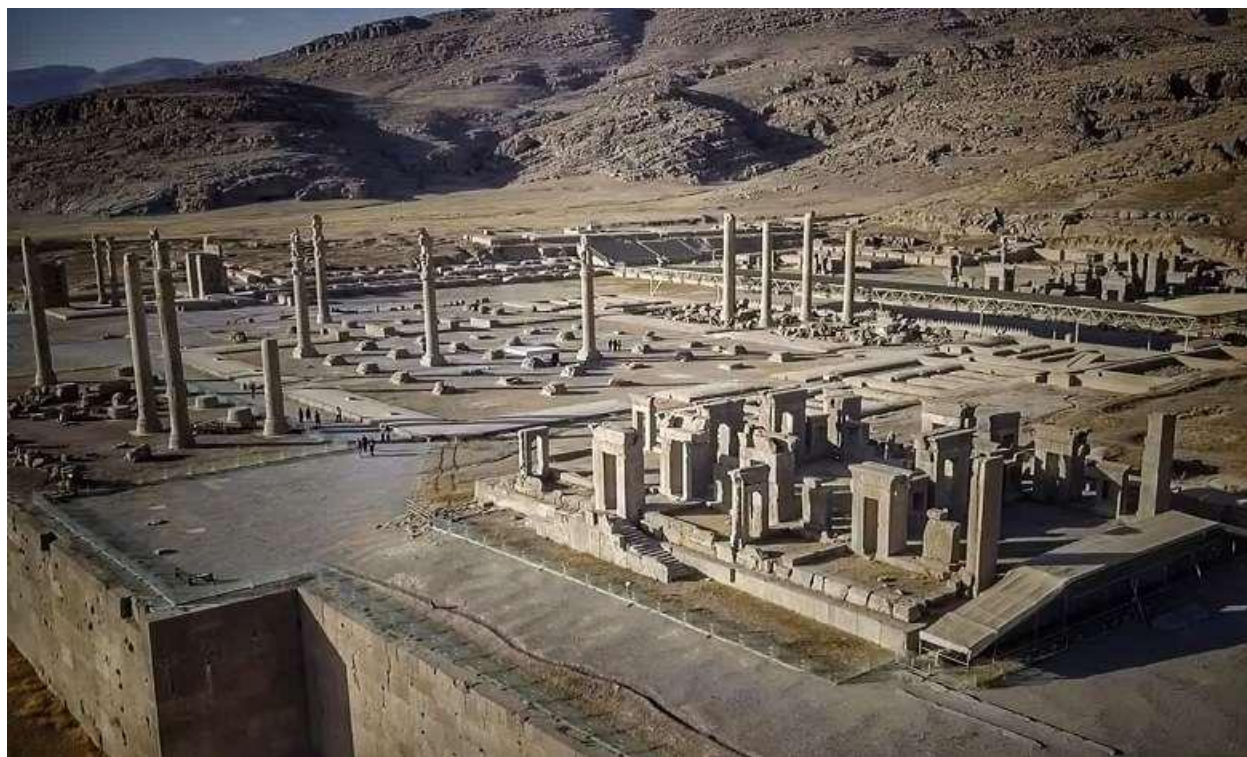
شکل ۲. بازسازی رقومی معابد و طاق‌های تاریخی شهر باستانی پالمیرا

مثال‌های عملی از پروژه‌های ایران

تخت جمشید

در پروژه‌ای که توسط پژوهشگاه میراث فرهنگی ایران انجام شد، فتوگرامتری پهپادمحور برای ثبت و بازسازی

سه‌بعدی کل مجموعه تخت‌جمشید استفاده شد. این مدل‌ها نه تنها وضعیت فعلی بنا را ثبت کردند، بلکه امکان مقایسه تغییرات ناشی از عوامل محیطی در طول زمان را فراهم کردند.

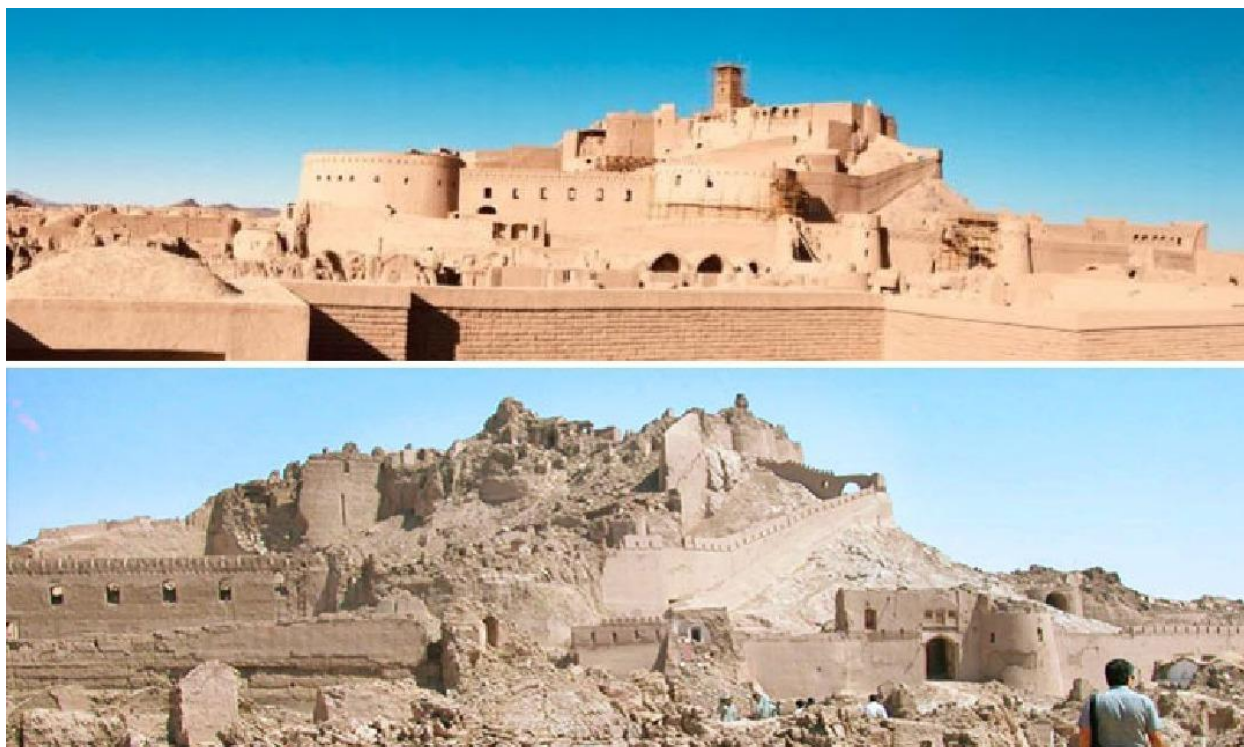


شکل ۳. استفاده از فتوگرامتری پهپادمحور برای ثبت و بازسازی سه‌بعدی مجموعه تخت‌جمشید

ارگ بم

پس از زلزله بم (۱۳۸۲)، تیم‌های مرمت برای بازسازی بخش‌های تخریب‌شده از فتوگرامتری برد کوتاه و تصاویر

آرشیوی استفاده کردند. این داده‌ها در طراحی دقیق عملیات بازسازی و مرمت نقشی کلیدی ایفا کردند.



شکل ۳. استفاده از فتوگرامتری برد کوتاه و تصاویر آرشیوی برای بازسازی بخش‌های تخریب‌شده ارگ بم

مدیریت صحیح داده و توجه به چالش‌ها، می‌تواند یک ابزار قدرتمند برای حفاظت و بازسازی میراث فرهنگی باشد.

نتایج، بحث و تحلیل یافته‌ها

بررسی پروژه‌های فتوگرامتری در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی نشان می‌دهد که این فناوری نه تنها از نظر دقت هندسی توان رقابت با روش‌های سنتی و حتی لیزر اسکن را دارد، بلکه در بسیاری از موارد، به دلیل انعطاف‌پذیری، هزینه کمتر، و سرعت اجرا، برتری نسبی پیدا می‌کند. نتایج تحلیل داده‌های کمی و کیفی در پروژه‌های نمونه داخلی و بین‌المللی، تصویر روشنی از ظرفیت‌ها و محدودیت‌های فتوگرامتری ارائه می‌دهد.

داده‌های کمی حاصل از پروژه‌های نمونه

دقت مدل‌ها

چالش‌ها و محدودیت‌ها در اجرای روش

چالش‌ها و محدودیت‌ها در اجرای این روش شامل (۱) شرایط نوری نامطلوب که موجب ایجاد سایه‌های شدید و کاهش کیفیت بافت می‌شود، (۲) محدودیت‌های دسترسی فیزیکی به بخش‌های خاص بنا، (۳) حجم بالای داده‌ها و نیاز به سخت‌افزار قدرتمند برای پردازش، و (۴) اعوجاج ناشی از لنز یا حرکت دوربین است که به کالیبراسیون دقیق نیاز دارد.

جمع‌بندی بخش روش‌شناسی

اجرای موفق یک پروژه فتوگرامتری برای بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی نیازمند ترکیب برنامه‌ریزی دقیق، گردآوری داده با کیفیت، پردازش مناسب و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی است. تجربه پروژه‌های ملی و بین‌المللی نشان می‌دهد که این فناوری، به شرط

مثال، در پروژه تخت جمشید حدود ۲۴۰۰ تصویر با حجم خام ۳۲ گیگابایت ثبت شده و مدل نهایی حجم ۴.۸ گیگابایت دارد. در پروژه ارگ بم نیز حدود ۱۵۰۰ تصویر با حجم خام ۲۰ گیگابایت تهیه شده و مدل نهایی حجمی معادل ۳.۲ گیگابایت دارد.

تحلیل کیفی یافته‌ها

مزایای اصلی فتوگرامتری در بازسازی آثار تاریخی
مزایای اصلی فتوگرامتری در بازسازی آثار تاریخی شامل هزینه کمتر نسبت به لیزر اسکن است، زیرا تجهیزات و نرم‌افزارهای فتوگرامتری به ویژه نمونه‌های متن‌باز، هزینه کمتری دارند. همچنین این روش انعطاف‌پذیری بالایی دارد و می‌توان آن را در فضاهای داخلی و خارجی و برای مقیاس‌های مختلف به کار برد. امکان استفاده از تصاویر آرشیوی، حتی تصاویر قدیمی، برای بازسازی نیز از دیگر مزایا به شمار می‌رود. علاوه بر این، سرعت اجرای فتوگرامتری در پروژه‌های کوچک و متوسط نسبتاً بالا بوده و زمان عکسبرداری و پردازش کوتاه است. دسترسی گسترده به تجهیزات نیز از دیگر نقاط قوت این روش است، زیرا دوربین‌های DSLR یا حتی دوربین‌های حرفه‌ای پهنابنده به آسانی قابل تهیه هستند.

محدودیت‌ها و چالش‌ها

محدودیت‌ها و چالش‌های فتوگرامتری شامل وابستگی به شرایط نوری است که نور شدید یا سایه‌های عمیق می‌توانند کیفیت بافت را کاهش دهند. همچنین حساسیت به همپوشانی تصاویر از دیگر مشکلات است؛ در صورت عدم وجود همپوشانی کافی، مدل دارای حفره یا اعوجاج خواهد بود. نیاز به پردازش سنگین و سخت‌افزار قدرتمند برای تولید مدل‌های دقیق سه‌بعدی

در پروژه‌های بررسی‌شده، دقت نسبی فتوگرامتری بسته به کیفیت تصاویر و روش پردازش بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر بوده است. به عنوان نمونه، در تخت جمشید ایران دقت متوسط ۵ میلی‌متر با استفاده از پهپاد DJI Phantom 4 Pro و نرم‌افزار Agisoft Metashape به دست آمده است. در گنبد سلطانیه ایران، دقت متوسط ۳ میلی‌متر در بخش‌های داخلی و ۷ میلی‌متر در بخش‌های خارجی ثبت شده که این تفاوت ناشی از شرایط نوری متغیر است. همچنین در معبد آنگکور وات کامبوج، دقت متوسط ۴ میلی‌متر با ترکیب فتوگرامتری و لیزر اسکن گزارش شده است. در پالمیرا سوریه نیز به دلیل استفاده از تصاویر آرشیوی و عدم همپوشانی کامل، دقت متوسط حدود ۸ میلی‌متر حاصل شده است.

زمان اجرای پروژه

زمان موردنیاز برای تکمیل پروژه‌های فتوگرامتری به عوامل متعددی مانند وسعت اثر، تعداد تصاویر، قدرت سخت‌افزاری و میزان پردازش پس از مدل‌سازی بستگی دارد. برای پروژه‌های کوچک با مساحت کمتر از ۵۰ مترمربع، حدود ۲ تا ۳ ساعت عکسبرداری و ۴ تا ۶ ساعت پردازش لازم است. پروژه‌های متوسط با مساحت بین ۵۰ تا ۵۰۰ مترمربع معمولاً به یک روز عکسبرداری و ۱ تا ۲ روز پردازش نیاز دارند. در پروژه‌های بزرگ که وسعت چند هزار مترمربع را شامل می‌شوند، چند روز برای عکسبرداری و بیش از یک هفته برای پردازش زمان صرف می‌شود.

حجم داده‌ها

حجم فایل‌های خام و مدل‌های پردازش‌شده معمولاً بین چند گیگابایت تا چند ده گیگابایت متغیر است. به عنوان

نیز یکی از چالش‌ها محسوب می‌شود. علاوه بر این، سطوح شفاف یا براق مانند شیشه، آب یا فلزات صیقلی باعث خطا در بازسازی می‌شوند و خطاهای انسانی در برنامه‌ریزی و کالیبراسیون نیز می‌توانند بر کیفیت نتایج تأثیرگذار باشند.

مقایسه با سایر روش‌ها

جدول ۱. مقایسه فتوگرامتری با روش های لیزر اسکن سه بعدی و اسکن دستی

معیار	فتوگرامتری	لیزر اسکن سه بعدی	اسکن دستی ^{۱۸}
دقت متوسط	۱۰-۲ میلی متر	۵-۱ میلی متر	۲۰-۵ میلی متر
هزینه تجهیزات	پایین تا متوسط	بالا	متوسط
سرعت اجرا	بالا (برای پروژه‌های کوچک/متوسط)	متوسط	بالا
پردازش داده	نیاز به قدرت پردازشی زیاد	نیاز به پردازش متوسط	پردازش سبک
قابلیت استفاده از تصاویر آرشیوی	دارد	ندارد	ندارد
مناسب برای سطوح براق/شفاف	خیر	بله	بله

کاربردهای فراتر از بازسازی

مدل‌های سه‌بعدی تولید شده از طریق فتوگرامتری، علاوه بر کاربردهای مرمتی و بازسازی آثار تاریخی، توانسته‌اند نقش‌های متنوع و فراتری را در حوزه‌های مختلف ایفا کنند. یکی از کاربردهای مهم این مدل‌ها، ایجاد تورهای مجازی است که بازدیدکنندگان آنلاین را قادر می‌سازد بدون حضور فیزیکی، از مکان‌ها و بناهای تاریخی بازدید کنند. این فناوری به ویژه در شرایطی مانند پاندمی یا محدودیت‌های سفر، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و امکان دسترسی گسترده‌تر به میراث فرهنگی را فراهم می‌آورد. همچنین، مدل‌های سه‌بعدی در زمینه واقعیت افزوده (AR) به کار گرفته می‌شوند تا لایه‌های تاریخی و اطلاعات مرتبط به شکل تعاملی و جذاب برای

کاربران نمایش داده شود؛ این قابلیت موجب افزایش درک و شناخت بهتر مخاطبان نسبت به تاریخچه و ساختار آثار می‌گردد.

علاوه بر این، این مدل‌ها در آموزش دانشگاهی رشته‌هایی نظیر معماری، باستان‌شناسی و مرمت به عنوان ابزار آموزشی قدرتمندی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دانشجویان با بهره‌گیری از مدل‌های سه‌بعدی، می‌توانند بدون نیاز به حضور مستقیم در محل، جزئیات ساختاری و هنری آثار را بررسی و تحلیل کنند. از سوی دیگر، این فناوری امکان تحلیل خطرپذیری آثار تاریخی را در برابر بلایای طبیعی مانند زلزله یا تغییرات اقلیمی فراهم می‌کند. با داشتن مدل‌های دقیق سه‌بعدی، متخصصان می‌توانند سناریوهای مختلف آسیب و فرسایش را

¹⁸ Handheld Scanning

دارد که با ترکیب فتوگرامتری با فناوری‌های مکمل می‌توان آن‌ها را تا حد زیادی برطرف کرد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ایران با بیش از ۲۷ مکان ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو و هزاران اثر ملی ثبت‌شده، یکی از کشورهای بسیار غنی جهان از نظر تنوع و گستره آثار تاریخی به شمار می‌رود. این آثار نه تنها بخشی از میراث فرهنگی و هویتی ملت ایران هستند، بلکه به عنوان سرمایه‌های مهم گردشگری و علمی نیز اهمیت استراتژیک دارند. فتوگرامتری می‌تواند در ایران نقش ویژه‌ای ایفا کند، زیرا بسیاری از این آثار در معرض خطراتی مانند زلزله، فرسایش، تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی قرار دارند. این فناوری امکان ثبت و حفاظت رقومی آثار را قبل از وقوع آسیب یا نابودی فراهم می‌سازد. علاوه بر این، پژوهشگران و مرمت‌گران با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی دقیق حاصل از فتوگرامتری می‌توانند تصمیم‌های بهتری در زمینه حفظ و مرمت این آثار اتخاذ کنند.

پیشنهاد‌های کاربردی شامل ایجاد بانک ملی مدل‌های سه‌بعدی آثار تاریخی است که به صورت یک پایگاه داده رقومی متمرکز مدل‌های سه‌بعدی آثار تاریخی کشور را ذخیره و مدیریت می‌کند و این بانک باید با استانداردهای بین‌المللی سازگار باشد تا پژوهشگران داخلی و خارجی بتوانند از آن بهره‌مند شوند. همچنین ترکیب فتوگرامتری با فناوری‌های مکمل مانند استفاده هم‌زمان از فتوگرامتری و لیزر اسکن برای افزایش دقت مدل‌ها و پر کردن نقاط کور، به ویژه در بناهای پیچیده یا دارای جزئیات ظریف، از اهمیت بالایی برخوردار است. تدوین دستورالعمل‌های ملی برای مستندسازی رقومی نیز

شبیه‌سازی کرده و راهکارهای محافظتی بهینه را طراحی کنند. به این ترتیب، فتوگرامتری به ابزاری چندجانبه تبدیل شده که فراتر از بازسازی صرف، در حوزه حفاظت، آموزش و پژوهش نیز کاربرد دارد.

نتایج و بحث

تحلیل داده‌های کمی و کیفی پروژه‌ها نشان می‌دهد که فتوگرامتری با وجود برخی محدودیت‌ها، یک راهکار کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و دقیق برای بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی است. به‌کارگیری این روش در کنار فناوری‌های مکمل مانند لیزر اسکن و GIS می‌تواند دقت و کیفیت مستندسازی را به سطح بسیار بالایی برساند. به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که دارای تنوع بالای آثار تاریخی هستند، فتوگرامتری می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کلیدی در حفاظت رقومی مورد استفاده گسترده قرار گیرد.

نتایج بررسی‌ها و تحلیل‌های این مقاله نشان می‌دهد که فتوگرامتری به‌عنوان یک فناوری نوین و کارآمد، ظرفیت بسیار بالایی در بازسازی سه‌بعدی آثار تاریخی دارد. این روش با استفاده از تصاویر دوبعدی و پردازش هندسی، امکان تولید مدل‌های دقیق سه‌بعدی را فراهم می‌کند که می‌توانند در حفاظت دیجیتال، برنامه‌ریزی مرمتی، تحلیل سازه‌ای و حتی آموزش و گردشگری مجازی مورد استفاده قرار گیرند.

بررسی نمونه‌های عملی از ایران و جهان نشان داد که این روش در مقایسه با فناوری‌های مشابه مانند لیزر اسکن، مزایایی همچون هزینه کمتر، انعطاف‌پذیری بالاتر، امکان استفاده از تصاویر آرشیوی و سرعت اجرای بیشتر دارد. البته محدودیت‌هایی نظیر وابستگی به شرایط نوری، نیاز به همپوشانی بالا و حساسیت به سطوح براق نیز وجود

معماری بر اساس این مدل‌ها انجام شود و نهایتاً از مدل‌های رقومی برای پایش خودکار وضعیت آثار تاریخی با کمک هوش مصنوعی بهره‌برداری گردد.

فتوگرامتری نه‌تنها یک فناوری برای مستندسازی دقیق آثار تاریخی است، بلکه ابزاری راهبردی برای پیوند میراث فرهنگی با فناوری‌های نوین به شمار می‌آید. آینده حفاظت میراث فرهنگی ایران می‌تواند با ترکیب این فناوری با سایر ابزارهای ژئوماتیک، هوش مصنوعی و واقعیت مجازی، وارد مرحله‌ای نوین شود که در آن، مرز بین حفاظت فیزیکی و رقومی از میان برداشته می‌شود. با تدوین سیاست‌های حمایتی، آموزش تخصصی و سرمایه‌گذاری هوشمندانه، فتوگرامتری می‌تواند به یکی از ستون‌های اصلی حفاظت میراث فرهنگی در ایران تبدیل شود.

ضروری است و باید استانداردهای فنی برای عکسبرداری، پردازش و ذخیره‌سازی داده‌ها تهیه شود تا کیفیت خروجی‌ها در تمام پروژه‌ها یکنواخت و قابل مقایسه باشد. علاوه بر این، آموزش و ظرفیت‌سازی از طریق برگزاری دوره‌های تخصصی برای مرمت‌گران، معماران و دانشجویان رشته‌های مرتبط جهت استفاده عملی از نرم‌افزارها و تکنیک‌های فتوگرامتری باید در دستور کار قرار گیرد. در نهایت، حمایت مالی و قانونی نیز بسیار مهم است و باید بودجه‌های پژوهشی و اجرایی برای پروژه‌های فتوگرامتری اختصاص یابد و این پروژه‌ها در قالب طرح‌های ملی ثبت و پیگیری شوند.

نقشه راه پژوهشی برای آینده فتوگرامتری در ایران با توجه به ظرفیت‌ها و چالش‌های موجود در سه بازه زمانی طراحی می‌شود. در بازه کوتاه‌مدت یک تا دو سال، باید آثار تاریخی در معرض خطر شناسایی و اولویت‌بندی شده و پروژه‌های فتوگرامتری اضطراری اجرا شود، همچنین تیم‌های تخصصی منطقه‌ای برای انجام عملیات میدانی تشکیل گردد و پایگاه داده اولیه مدل‌های سه‌بعدی راه‌اندازی شود. در بازه میان‌مدت سه تا پنج سال، توسعه نرم‌افزارها و الگوریتم‌های بومی فتوگرامتری با تمرکز بر شرایط خاص ایران مانند نور، بافت مصالح و اقلیم مدنظر قرار گیرد و سیستم‌های فتوگرامتری با GIS ترکیب شده تا پایگاه داده مکانی-زمانی آثار تاریخی ایجاد شود؛ علاوه بر این، انجام پروژه‌های بین‌المللی مشترک با دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی خارجی از اهداف مهم خواهد بود. در بازه بلندمدت پنج تا ده سال، مدل‌های سه‌بعدی باید در سامانه‌های واقعیت مجازی و افزوده یکپارچه‌سازی شده و برای استفاده عمومی در دسترس قرار گیرند، همچنین توسعه پلتفرم‌های آموزشی مجازی برای آموزش تاریخ و

منابع

- & C. Stäheli (eds.); pp. 3–8). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53032-6_1
- Kovacs, F. (2015). Documentation of cultural heritage; techniques, potentials, and constraints. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W7, 207–214. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-207-2015>
- Palestini, C., & Basso, A. (2019). LOW-COST TECHNOLOGICAL IMPLEMENTATIONS RELATED TO INTEGRATED APPLICATION EXPERIMENTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W17, 241–248. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-241-2019>
- Petrescu, F. (2010). THE USE OF GIS TECHNOLOGY IN CULTURAL HERITAGE. *ISPRS Congress Proceedings XXXVI-5/C53*.
- Saif, W. (2022). *Photogrammetry: A Brief Historical Overview*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27518.87369>
- Schindler, K., & Förstner, W. (2020). *Photogrammetry BT - Computer Vision: A Reference Guide* (pp. 1–3). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_139-1
- Wrobel, B. (2006). THE EVOLUTION OF DIGITALPHOTOGRAMMETRYFROM ANALYTICAL PHOTOGRAMMETRY. *The Photogrammetric Record*, 13, 765–776. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1991.tb00738.x>
- Yilmaz, H. M., Yakar, M., Gulec, S. A., & Dulgerler, O. N. (2007). Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 428–433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.07.004>
- Alshawabkeh, Y., & Haala, N. (2006). *Integration of laser scanning and photogrammetry for heritage documentation*. 35.
- Altuntaş, C. (2021). CAMERA SELF-CALIBRATION BY USING SfM BASED DENSE MATCHING FOR CLOSE-RANGE IMAGES. *Eurasian Journal of Science Engineering and Technology*, 2(2), 69–82. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ejset/issue/66075/982027>
- Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., & Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing* (Vol. 13, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/rs13030486>
- Calisi, D., Botta, S., & Cannata, A. (2023). Integrated Surveying, from Laser Scanning to UAV Systems, for Detailed Documentation of Architectural and Archeological Heritage. In *Drones* (Vol. 7, Issue 9). <https://doi.org/10.3390/drones7090568>
- Daneshmand, M., Helmi, A., Avots, E., Noroozi, F., Alisinanoglu, F., Arslan, H. S., Gorbova, J., Haamer, R. E., Ozcinar, C., & Anbarjafari, G. (2018). 3d scanning: A comprehensive survey. *ArXiv Preprint ArXiv:1801.08863*.
- Fraser, C. S. (2001). *Photogrammetric Camera Component Calibration: A Review of Analytical Techniques BT - Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* (A. Gruen & T. S. Huang (eds.); pp. 95–121). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04567-1_4
- Gîrbacia, F. (2024). An Analysis of Research Trends for Using Artificial Intelligence in Cultural Heritage. In *Electronics* (Vol. 13, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/electronics13183738>
- Hostettler, M., Buhlke, A., Drummer, C., Emmenegger, L., Reich, J., & Stäheli, C. (2024). *3D Archaeology and Cultural Heritage: Where Are We Today? BT - The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology: State-of-the-Art, Data Management and Current Challenges in Archaeological 3D-Documentation* (M. Hostettler, A. Buhlke, C. Drummer, L. Emmenegger, J. Reich,

Applications of Photogrammetry in the Three-Dimensional Reconstruction of Historical Monuments: Approaches, Challenges, and Prospects

Abstract

Photogrammetry has emerged as a cornerstone technology in the preservation and documentation of historical monuments, leveraging advancements in digital imaging and spatial data processing. This method transforms two-dimensional photographs into highly accurate three-dimensional models, enabling detailed examination of architectural elements, intricate designs, and historical textures. Its significance in digital preservation is growing, as it safeguards cultural heritage against threats like natural disasters, environmental degradation, and human activities. This article explores the foundational principles of photogrammetry and its critical role in heritage conservation. It highlights a range of applications, including the creation of digital replicas, structural analysis, monitoring of temporal changes, and strategic planning for restoration projects. These applications allow professionals to assess the condition of historical sites with precision and develop informed conservation strategies. However, photogrammetry faces challenges, such as inconsistencies in data quality, the computational complexity of processing large datasets, and difficulties in managing intricate 3D models. This study addresses these obstacles and proposes practical solutions to enhance the accuracy, efficiency, and scalability of photogrammetric techniques. By integrating photogrammetry with advanced technologies like Geographic Information Systems (GIS), laser scanning, and artificial intelligence, it becomes a versatile interdisciplinary tool that bridges cultural heritage with modern innovation. This synergy supports comprehensive spatial analysis and fosters new approaches to heritage management. The findings offer valuable guidance for restoration experts, architects, archaeologists, and geoscientists, enabling them to design and implement projects for the digital preservation and virtual reconstruction of historical monuments. Ultimately, this research underscores photogrammetry's transformative potential in ensuring the sustainable protection of cultural heritage, preserving historical treasures for future generations through cutting-edge technological integration.

Keywords: Photogrammetry, 3D Reconstruction, Historical Monuments, Digital Preservation, GIS, 3D Modeling

