



ORIGINAL RESEARCH PAPER

Comparison of extracting façade points of urban buildings from points cloud of mobile laser scanner and UAV imaging

M. Heidarimozaffar^{*1}, S.A. Hosseini²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

² Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Received: 14 September 2024
Reviewed: 16 October 2024
Revised: 31 October 2024
Accepted: 27 November 2024

KEYWORDS:

UAV Photogrammetry
Mobile Laser Scanner
Point Cloud Segmentation
Point Cloud Clustering
DBSCAN and RANSAC Algorithms
Plane Extraction

* Corresponding author

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

☎ (+98912) 5185925

Background and Objectives: In recent decades, geomatics science has made significant progress, and these advances are due to advanced measurement tools and innovative technologies in the field of geometric and spatial data acquisition. In this context, portable laser scanners and UAVs have been introduced as basic and efficient tools that are capable of accurately and quickly measuring various objects and environments, including urban spaces. These devices automatically record all the details of the urban space in the form of point clouds or images. To extract the geometric information of buildings from these details, it is necessary to use machine vision methods. To achieve accurate and reliable models of buildings, a sequence of post-processing operations is implemented when processing point cloud data. One of the most important stages of these processes is the segmentation of the point cloud. These steps transform point cloud data into more conceptual and analyzable information. One of the important issues in processing point cloud data is the ability to extract flat surfaces of building facades (walls). These flat surfaces are of special importance as basic components in modeling and analyzing the condition of buildings. Accuracy in the information related to these flat surfaces allows for a more accurate and complete distinction between different components of buildings. This is important in several applications including urban planning, construction management, and energy consumption analysis of buildings.

Methods: In this article, the combination of MSAC and G-DBSCAN algorithms is used to extract flat surfaces from three-point cloud datasets (point cloud obtained from GeoSLAM ZEB-HORIZON laser scanner devices, point cloud obtained from Phantom 4 Pro drone imaging and hybrid point cloud) has been. These two algorithms are executed sequentially. The area chosen for this purpose is the buildings of the Faculty of Engineering of Bu-Ali Sina University in Hamedan. Because this environment has features such as architectural diversity, the existence of flat facades, and different ways of placing walls in relation to each other with different dimensions.

Findings: This research, with a comprehensive evaluation of three separate data sets, shows an average precision of more than 97%, which guarantees high accuracy in data extraction. In addition, the average recall has reached more than 94%, which covers most of the elements of the facade. The result of this evaluation is the F1 score with an average of 95%, which indicates progress in the field of accurate building data extraction and architectural modeling. However, the algorithm encountered challenges when facing the walls that were perpendicular to the laser scanner's movement path, which reduced the representation rate. Also, the SfM algorithm has difficulty in generating points on window panes, which caused some points related to the space inside the windows to be recognized as wall points. This issue shows that point cloud generation algorithms from images affect the results of this algorithm. On the contrary, the results of the combined data have been very promising, in such a way that these data converged faster than the other two data sets in the first step of the algorithm and had high performance in Precision and Recall.

Conclusion: However, the findings show that the algorithm has generally shown an outstanding performance in extracting building facade information, especially with the use of diverse and varied data. These developments are promising and open new horizons in spatial data analysis and building modeling. This innovative approach can be used in various applications and help to develop modern and data-driven architectural models.



NUMBER OF REFERENCES

47



NUMBER OF FIGURES

15



NUMBER OF TABLES

6

مقاله پژوهشی

مقایسه استخراج نقاط نمای ساختمان‌های شهری از ابر نقاط لیزراسکنر همراه و تصویربرداری پهپاد

مرتضی حیدری مظفر*^۱، سید عادل حسینی^۲^۱ گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۲ گروه نقشه‌برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: در دهه‌های اخیر، علوم ژئوماتیک پیشرفت چشمگیری کرده و این پیشرفت‌ها ناشی از ابزارهای پیشرفته اندازه‌گیری و تکنولوژی‌های نوآورانه در زمینه اخذ داده‌های هندسی و مکانی است. در این زمینه، لیزراسکنرهای همراه و پهپادها به عنوان ابزاری اساسی و کارآمد معرفی شده‌اند که قابلیت انجام اندازه‌گیری دقیق و سریع اشیاء و محیط‌های مختلف از جمله فضاهای شهری، را دارا هستند. این دستگاه‌ها به شکل خودکار تمامی جزئیات فضای شهری را به شکل ابرنقطه یا تصویر ثبت می‌کنند. برای استخراج اطلاعات هندسی ساختمان‌ها از درون این جزئیات، لازم است از روش‌های بینایی ماشین استفاده شود. در راستای دستیابی به مدل‌های دقیق و قابل اعتماد از ساختمان‌ها، هنگام پردازش داده‌های ابرنقطه، دنباله‌ای از عملیات پس‌پردازش اجرا می‌شود. یکی از مهمترین مراحل این پردازش‌ها، قطعه‌بندی ابرنقاط است. این مراحل انتقال داده‌های ابرنقطه، را به اطلاعات مفهومی تر و قابل تحلیل‌تر تبدیل می‌کنند. یکی از مسائل مهم در پردازش داده‌های ابرنقطه، توانایی استخراج سطوح مسطح نماهای ساختمانی (دیوارها) است. این سطوح مسطح به عنوان اجزاء اساسی در مدل‌سازی و تحلیل وضعیت ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. دقت در اطلاعات مرتبط با این سطوح مسطح، امکان تمایز دقیق‌تر و کامل‌تر بین اجزاء مختلف ساختمان‌ها را فراهم می‌کند. این امر در کاربردهای متعددی از جمله برنامه‌ریزی شهری، مدیریت ساخت و ساز، و تجزیه و تحلیل مصرف انرژی ساختمان‌ها اهمیت دارد.

روش‌ها: در این مقاله، برای استخراج سطوح مسطح از سه مجموعه داده ابرنقطه (ابرنقطه اخذ شده از دستگاه‌های لیزراسکنر همراه GeoSLAM ZEB-HORIZON، ابرنقطه بدست آمده از پردازش تصویربرداری پهپاد Phantom 4 Pro و ابرنقطه ترکیبی) از ترکیب دو الگوریتم MSAC و G-DBSCAN استفاده شده است. این دو الگوریتم به صورت متوالی اجرا می‌شوند. محوطه‌ای که برای این منظور انتخاب شده، ساختمان‌های دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا در همدان می‌باشد. زیرا این محیط ویژگی‌هایی از جمله تنوع معماری، وجود نماهای مسطح و حالت‌های مختلف قرارگیری دیوارها نسبت به هم با ابعاد مختلف را داراست.

یافته‌ها: این تحقیق با ارزیابی جامع سه مجموعه داده مجزا، میانگین دقت (Precision) بیش از ۹۷٪ را نشان می‌دهد که دقت بالا در استخراج داده‌ها را تضمین می‌کند. علاوه بر این، میانگین بازنمایی (Recall) به بیش از ۹۴٪ رسیده است که اغلب عناصر نما را پوشش می‌دهد. نتیجه این ارزیابی، امتیاز F1 (F1 score) با میانگین ۹۵٪ است که نشان‌دهنده پیشرفت در زمینه استخراج دقیق داده‌های ساختمانی و مدل‌سازی معماری است. با این حال، الگوریتم در مواجهه با دیوارهایی که عمود بر مسیر حرکت لیزراسکنر قرار دارند، دچار چالش‌هایی شد که موجب کاهش نرخ بازنمایی گردید. همچنین، الگوریتم SfM در تولید نقاط بر روی شیشه‌های پنجره‌ها مشکل دارد، که باعث شده برخی نقاط مربوط به فضای داخل پنجره‌ها به عنوان نقاط دیوار تشخیص داده شوند. این مسئله نشان می‌دهد که الگوریتم‌های تولید ابرنقطه از تصاویر بر نتایج این الگوریتم تأثیرگذار هستند. در مقابل، نتایج داده‌های ترکیبی بسیار امیدوارکننده بوده است، به گونه‌ای که این داده‌ها در مرحله اول الگوریتم با سرعت بیشتری نسبت به دو مجموعه داده دیگر همگرا شدند و عملکرد بالایی در دقت و نرخ بازنمایی داشتند.

تاریخ دریافت: ۲۴ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ داوری: ۲۵ مهر ۱۴۰۳
تاریخ اصلاح: ۱۰ آبان ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۰۷ آذر ۱۴۰۳

واژگان کلیدی:

فتوگرامتری پهپاد
لیزراسکنر همراه
قطعه‌بندی ابرنقطه
خوشه‌بندی ابرنقطه
الگوریتم‌های DBSCAN و RANSAC
استخراج صفحه

* نویسنده مسئول

m.heidarimozaffar@basu.ac.ir

۰۹۱۲-۵۱۸۵۹۲۵

نتیجه‌گیری: با این حال، یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم به طور کلی عملکرد برجسته‌ای در استخراج اطلاعات نماهای ساختمانی، به‌ویژه با استفاده از داده‌های متنوع و گوناگون، از خود نشان داده است. این پیشرفت‌ها نویدبخش بوده و افق‌های جدیدی را در تحلیل داده‌های مکانی و مدل‌سازی ساختمانی می‌گشاید. این رویکرد نوآورانه می‌تواند در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته و به توسعه مدل‌های معماری مدرن و داده‌محور کمک کند.

مقدمه

همراه و یا با تصویربرداری بدست می‌آیند، به خصوص زمانی که از چندین ایستگاه مختلف اخذ و ادغام می‌شوند، یقیناً سه‌بعدی هستند. تبدیل چنین داده‌ای به شبکه دوبعدی باعث از دست رفتن اطلاعات مکانی زیادی خواهد شد [۱۲]. در مقابل، تکنیک‌های قطعه‌بندی سه‌بعدی که به استخراج اشکال ساده همچون صفحه، کره، استوانه از ابرنقطه سروکار دارند، ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه هندسه اکثر نمای ساختمان‌ها را می‌توان با مجموعه‌ای از نماهای مسطح به صورت صفحه توصیف کرد [۸]، استخراج صفحه نسبت به دیگر اشکال هندسی متداول‌تر است. بنابراین با توجه به اهمیت استخراج خودکار صفحه از ابرنقطه [۱۳]، سیمپاس و شان [۱۴] صفحه را با استفاده از رویکرد k-means فازی بر اساس سطح نرمال استخراج کردند. صفحه‌ها بر اساس تراکم خوشه و اتصال از هم جدا شدند. ژو و همکاران [۱۵] از گرادیان برای محاسبه موثر پارامترهای صفحه و سپس استخراج نقاط مربوط به آن استفاده کردند. آرنود و همکاران [۱۶] یک الگوریتم استخراج صفحه پویا را پیشنهاد می‌کنند که در آن نقاط به خوشه‌هایی تعلق می‌گیرند که پارامترهای صفحه فرضی یکسان دارند. با این حال، این روش‌ها با توجه به نتایج خوبی که ارائه می‌دهند ولی ممکن است تحت تأثیر عواملی چون تعداد تکرار و حداکثر تعداد خوشه‌های انتخابی قرار گیرند.

فراتر از روش‌های فوق، روش‌های دیگری برای استخراج صفحات ساختمانی پیشنهاد شده است. تعدادی از روش رشد منطقه‌ای [۱۷] به طور گسترده برای استخراج سطوح مسطح و ویژگی‌های نما استفاده کرده‌اند [۱۸-۲۳]. در روش رشد منطقه‌ای، انتخاب نقاط اولیه به عنوان منطقه بذری، نتایج نهایی قطعه‌بندی ابرنقطه را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، در مورد ابرنقطه با نویز زیاد، تصمیم‌گیری در مورد گسترش منطقه دشوار است. در این روش چندین منطقه بذری به طور مستقل رشد می‌کنند و منجر به خوشه‌هایی می‌شوند که به طور بالقوه با هم تداخل دارند. این رویکرد اغلب یک قطعه‌بندی مناسب را نتیجه می‌دهد اما هنگام مواجه شدن با داده‌های با نویز زیاد به مشکل برمی‌خورد [۱۲].

در تحقیقات حوزه بینایی ماشین، دو روش کاملاً شناخته شده دیگر یعنی تبدیل هاف [۲۴] و الگوریتم RANSAC [۲۵] برای استخراج اشکال ساده هندسی استفاده شده‌اند [۲۶-۳۲] برخلاف رشد منطقه‌ای، برای هر دو روش اثبات شده است که در حضور تعداد زیادی از نقاط پرت اشکال ساده هندسی آسان‌تر استخراج می‌شوند [۱۳]. با این حال، روش تبدیل هاف عمدتاً در خصوص داده‌های دوبعدی و زمانی که تعداد پارامترهای مدل بسیار کم است، استفاده می‌شود. تراش‌کردی و همکاران [۱۳] هر دو روش را برای استخراج خودکار صفحه‌های سه‌بعدی

مدل‌سازی سه‌بعدی خیابان‌ها و ساختمان‌ها، در بصری‌سازی کاربردهای مکان‌مند پیشرفته مانند ناوبری وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی شهری و صنعت گردشگری، مورد توجه روزافزون است [۱]. با رشد تکنولوژی گرافیک رایانه‌ای، صنعت سرگرمی و واقعیت مجازی تقاضا برای مدل‌های پیچیده و واقع‌گرایانه نیز افزایش داشته است [۲]. پیچیدگی عوارض ساختمانی بخصوص در مناطق شهری منجر به آن می‌شود که مرحله‌ی مدل‌سازی و استخراج اطلاعات هندسی ساختمان با دقت کافی انجام نشود [۳]. به‌همین دلیل استخراج اطلاعات هندسی و در راس آن مدل‌سازی سه‌بعدی ساختمان‌ها به یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی در فتوگرامتری و بینایی ماشین تبدیل شده است [۴].

داده‌های مدل‌سازی ساختمان عمدتاً با استفاده از سه روش به دست می‌آیند [۵]: فتوگرامتری هوایی، تصویربرداری عمیق و LiDAR. با پیشرفت فناوری LiDAR، ابرنقطه حاصل از برداشت جزئیات، در حال تبدیل شدن به یک منبع اصلی برای مدل‌سازی هندسه ساختمان‌ها است. در دهه ۱۹۹۰، لیزراسکنر هوایی به طور گسترده در دسترس قرار گرفت [۶] و تولید مدل‌های رقمی ارتفاعی از شهرها امکان‌پذیر شد. دقت و تراکم نقاط قابل برداشت توسط این فناوری در حال پیشرفت مداوم است. بعدها لیزراسکنر زمینی و لیزراسکنر همراه، علاوه بر دقت هندسی بیشتر و تراکم بسیار زیاد، اسکن نمای ساختمان‌ها را که در حالت هوایی امکان‌پذیر نبود، میسر کردند [۷]. فرایند مدل‌سازی نمای ساختمان با استفاده از ابرنقطه را می‌توان به سه مرحله اصلی تقسیم کرد [۸]: استخراج نقاط نمای ساختمان، شناسایی ویژگی‌های نمای ساختمان (به عنوان مثال درب، پنجره و غیره) و بازسازی مدل بر اساس یک توپولوژی سه‌بعدی. مرحله اول بسیار مهم است زیرا مراحل بعدی مستقیماً در ادامه نتیجه مرحله اول بدست می‌آیند. اگرچه پردازش ابرنقطه برای استخراج ویژگی‌های نمای ساختمان (مرحله اول) فرایندی زمان‌بر است [۹]. اما با توجه به دقت نسبتاً مناسب نتایج ارائه شده در پردازش ابرنقطه نمی‌توان از اهمیت چنین داده‌ای صرفه‌نظر کرد [۵]. بنابراین بسیاری از پیش‌پردازش‌ها باید قبل از شروع پردازش اجرا شود. از جمله این پیش‌پردازش‌ها، قطعه‌بندی ابرنقطه است یعنی تقسیم تعداد زیادی از نقاط به گروه‌هایی با خصوصیات مشابه که اغلب پیش شرط همه پردازش‌ها است [۱۰].

اغلب تکنیک‌های قطعه‌بندی ابرنقطه بر روی داده‌های لیزراسکنر هوایی توسعه داده شده‌اند [۱۱]، به عبارتی تکنیک‌ها روی داده‌های مش یا داده‌های تصویری پیاده‌سازی شده‌اند و به ندرت روی داده‌های سه‌بعدی به طور مستقیم عملیاتی شده‌اند. ابرنقطه‌ای که با لیزراسکنر زمینی/

الگوریتم به صورت متوالی اجرا شده‌اند؛ ابتدا با استفاده از MSAC، سطوح مسطح محتمل در فضای مطالعه استخراج شده و سپس با استفاده از G-DBSCAN، دیوارهای نما استخراج شده‌اند. در این تحقیق، یکی از پارامترهای کلیدی، حداکثر ضخامت نوزی صفحه‌ها (MaxDistance) بوده که وابسته به منطقه مورد مطالعه و نوع سنجنده استفاده شده است. این پارامتر براساس برجستگی‌های نوع نما و دقت برداشت نقطه توسط دستگاه یا تولید ابرنقطه توسط الگوریتم‌ها تعیین شده است. به عنوان مثال برای این مطالعه، با توجه به برجستگی‌های نوع نما (در این مطالعه حدود ۲ سانتیمتر) و دقت برداشت یا تولید ابرنقطه، که این مقدار برای لیزراسکنر برابر با ± 3 سانتی‌متر (MaxDistance = 8 cm) برای ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری پهپاد با روش SfM (Structure from Motion) [۳۶، ۳۷] برابر با ± 1 سانتی‌متر (MaxDistance = 4 cm) و برای ابرنقطه ترکیبی ± 3 سانتی‌متر (MaxDistance = 8 cm) تعیین شده است. همچنین، پارامتر حداقل فاصله دو دیوار مجاور هم راستا نیز برای مرحله دوم الگوریتم، بدون تغییر، وارد الگوریتم می‌شود (MinPts = 50 cm).

- منطقه مورد مطالعه

برای تعیین کارایی و توانایی الگوریتم پیشنهادی، در برابر روش مبتنی بر تولید نقطه، الگوریتم برای یک منطقه مطالعاتی آزمایش شد. در این مطالعه، ساختمان تازه احداث دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا، واقع در شهر همدان (همدان-ایران)، برای بررسی و تحقیق انتخاب شد (شکل ۲). از ویژگی‌های بارز این ساختمان دیوارهایی مسطح با ابعاد مختلف است که با زوایه‌های تقریباً عمود بر هم مجاور یکدیگر قرار گرفته‌اند.

- داده

در این تحقیق از سه مجموعه داده استفاده شد. این داده‌ها شامل ابرنقطه اخذ شده از لیزراسکنر همراه، ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری نمای ساختمان با پهپاد و ابرنقطه‌ای که از ترکیب این دو داده بدست آمده است. در ادامه هر کدام توضیح داده شده است.

- لیزراسکنر

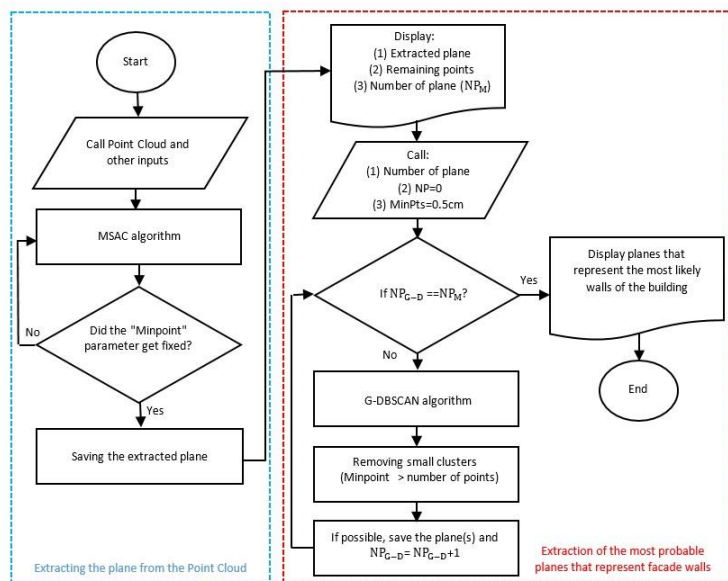
لیزراسکنر همراه، موسوم به موبایل لیدار یا لیزراسکنر زمینی متحرک، که به اختصار آن را MLS گویند معمولاً، بر روی یک وسیله نقلیه سوار و یا توسط یک اپراتور حمل می‌شود. MLS می‌تواند اطلاعات هندسی دقیق محیط اطراف خود را به صورت ابرنقطه ثبت کند. عموماً MLS برای محاسبه دقیق مختصات سه‌بعدی نقاط در سیستم مختصات مرجع از ترکیب سیستم‌های INS و GNSS بهره می‌گیرد. برای کاربردهای با دقت زیاد، اغلب نقاط کنترل دقیق در منطقه موردنظر ایجاد و یا از یک روش multi-pass adjustment استفاده می‌شود [۳۸، ۳۹].

ساختمان بر روی ابرنقطه ارزیابی کردند. پس از مقایسه تحلیلی، نتایج نشان داده است که الگوریتم RANSAC در قطعه‌بندی ابرنقطه کارآمدتر از روش تبدیل هاف است. بنابراین می‌توان گفت RANSAC در استخراج اشکال ساده بخصوص زمانی که داده از دنیای واقعی اخذ شده (ابرنقطه دارای نویز فراوان باشد) گزینه‌ای مناسب است [۱۲، ۲۶]. مقابل این مزیت‌ها، RANSAC در استخراج اشکال در فضای سه‌بعدی، نسبت به انتخاب صحیح آستانه نویز حساس است به طوری که تعیین می‌کند کدام نقاط داده متناسب با مدل نمونه‌برداری شده (با مجموعه‌ای منحصر بفرد از پارامترها) است. اگر چنین آستانه‌ای خیلی زیاد انتخاب شود، تمام فرضیه‌ها به طور مساوی رتبه‌بندی می‌شوند و ممکن است در استخراج صفحه‌ها چندین صفحه به عنوان یک صفحه استخراج شوند. از سوی دیگر، زمانی که آستانه نویز خیلی کوچک انتخاب شود، پارامترهای تخمین زده شده تمایل به ناپایداری دارند یعنی پس از هر بار اجرای الگوریتم تعداد صفحات استخراج شده متفاوت و بیشتر از تعداد واقعی است. برای جبران بخشی از این اثر نامطلوب، تور و همکاران MSAC را پیشنهاد کردند [۳۳].

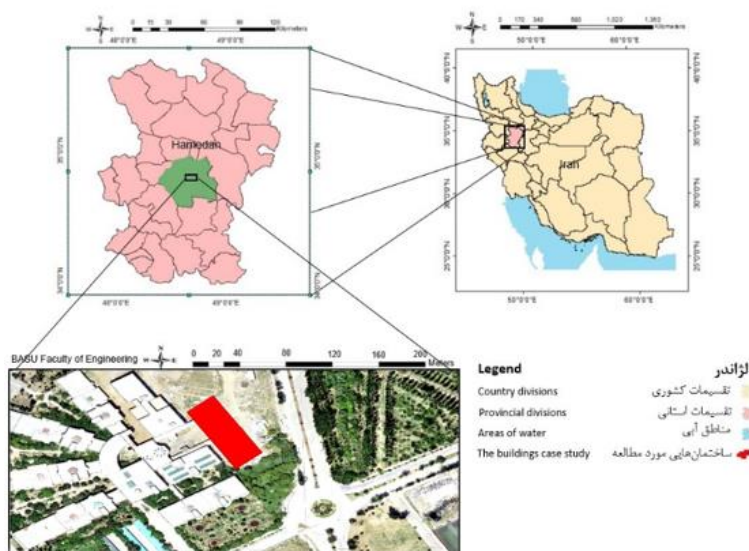
اگرچه از نظر دقت و سرعت برای شناسایی نمای ساختمان پیشرفت‌های زیادی حاصل شده است، اما هنوز هم استراتژی‌های فراگیر پردازش برای استخراج خودکار چنین ویژگی‌هایی از محیط‌های ناهمگن شهری نیازمند توسعه هستند. قطعه‌بندی ابرنقطه برای استخراج سطوح مسطح در نمای ساختمان را می‌توان به عنوان گام اصلی در پردازش خودکار ابرنقطه در نظر گرفت [۱۰]. دستیابی سریع به داده‌های سه‌بعدی و همچنین پردازش خودکار داده‌ها، دو وظیفه اصلی در کاربردهای نقشه‌برداری است [۱۳]. با توجه به این ملاحظات در تحقیقات قبلی ما [۳۴]، از الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN [۳۵] به صورت متوالی استفاده شد و نتایج امیدوارکننده‌ای در استخراج دیوارهای نما از ابرنقطه لیزراسکنر ساختمان‌های پیچیده (با سطوح مسطح و غیرمسطح) با سناریوهای مختلف دنیای واقعی به دست آمد. حالا با هدف بررسی عملکرد این الگوریتم‌ها روی داده‌های مختلف، این تحقیق انجام شده است. هدف این تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN روی داده‌های متنوع، شامل ابرنقطه تولید شده از تصویربرداری پهپاد، ابرنقطه اخذ شده از لیزراسکنر همراه و ابرنقطه ترکیبی از این دو، به منظور بهبود دقت و قابلیت اعتماد در تشخیص دیوارهای نمای ساختمان است.

روش تحقیق

در این تحقیق، از دو الگوریتم MSAC و G-DBSCAN برای استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌ها استفاده شده است، که قبلاً در تحقیقات قبلی به آن‌ها اشاره شده بود [۳۴]. سه نوع داده مختلف از یک ساختمان پیچیده شامل ابرنقطه‌های لیزراسکنر، تصویربرداری پهپاد، و ترکیبی از این دو، جهت استخراج نقاط نمای مورد بررسی قرار گرفتند. این دو



شکل ۱: روش استخراج صفحه‌های نمای ساختمان از ابرنقطه [۳۴]
 Fig. 1: The method of extracting facades of buildings from point cloud [34]



شکل ۲: موقعیت مکانی ساختمان مورد مطالعه
 Fig. 2: Location of the case study building



شکل ۳: لیزراسکنر همراه، GeoSLAM ZEB-HORIZON
 Fig. 3: Mobile laser scanner, GeoSLAM ZEB-HORIZON

از دیگر ویژگی‌های MLS می‌توان به اندازه‌گیری شدت و رنگ اشاره نمود، که البته این دو ویژگی در همه سیستم‌های MLS وجود ندارد. قدرت تفکیک مکانی و دقت زیاد داده‌های MLS و محصولات آن (به عنوان مثال، DEM، مدل‌های زیرساختی سه‌بعدی و غیره) موجب شده است تا در سطح جزئیات خاص بیشتر از سایر رویکردها از آن استفاده شود [۴۰]. در این مطالعه از لیزراسکنر همراه GeoSLAM ZEB-HORIZON استفاده شد. این سیستم نرخ جمع‌آوری ۳۰۰۰۰۰ نقطه در ثانیه با دقت ۱-۳ سانتی‌متر و برد ۱۰۰ متر را دارد (جدول ۱). در مجموع تعداد تقریبی ۲ میلیون نقطه از ساختمان مورد مطالعه توسط یک پراتور باتجربه با این سنجنده اخذ شده است (شکل ۳ و ۴الف).



شکل ۴: پهپاد فانتوم ۴ پرو
Fig. 4: Phantom 4 Pro drone

جدول ۲: اطلاعات سنجنده پرنده فانتوم ۴ پرو
Table 2: Phantom 4 Pro drone sensor information

سنجنده sensor	لنز Lens
CMOS*1	
FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 - f/11	
11 auto focus at 1 m - ∞	
100 - 3200 (Auto)	میزان حساسیت به نور
100 - 6400 (Manual)	The degree of sensitivity to light
100 - 3200 (Auto)	سرعت شاتر
100 - 12800 (Manual)	الکترونیکی
8 - 1/2000 s	Electronic shutter speed
	سرعت شاتر
8 - 1/8000 s	مکانیکی
	Mechanical shutter speed

پروازها به صورت دستی، توسط یک اپراتور پهپاد با تجربه انجام شده است. تصاویر از پهپاد به صورت هم‌زمان، به اپراتور منتقل شده و از هم‌پوشانی قابل توجه تصاویر اطمینان حاصل شد. پرواز با این پرنده در ارتفاع‌های مختلف انجام شد. در مجموع تعداد ۲۰۲ تصویر با هم‌پوشانی ۸۰ درصد همراه با اطلاعات مراکز تصویر به دست آمده از PPK، با استفاده از این سنجنده، با فاصله تقریبی ۶ m از نمای ساختمان اخذ شد (جدول ۳). برای ارزیابی دقت عملیات پرواز و اخذ تصویر از ۱۰ نقطه کنترل و ۴ نقطه چک با مختصات معلوم روی ناحیه مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۵، جدول ۴). تمام تصاویر اطلاعات مربوط به توجیه داخلی و خارجی را دارا می‌باشند. در مجموع با استفاده از روش SfM تعداد تقریبی ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ نقطه از نمای بیرونی ساختمان مورد مطالعه با قدرت تفکیک ۱ نقطه به ازای هر پیکسل به دست آمده است. با توجه به هدف مطرح شده در این تحقیق (توان‌سنجی و مقایسه داده‌های دو سنجنده ذکر شده) ناگزیر این نقطه به دست آمده از روش تصویربرداری متناسب با این نقطه لیزراسکنر همراه نمونه‌برداری شد. سرانجام تعداد تقریبی ۲,۰۰۰,۰۰۰ نقطه، با استفاده از این روش اخذ شد (شکل ۶ب).

جدول ۱: مشخصات لیزراسکنر همراه، GeoSLAM ZEB-HORIZON

Table 1: Specifications of the portable laser scanner, GeoSLAM ZEB-HORIZON

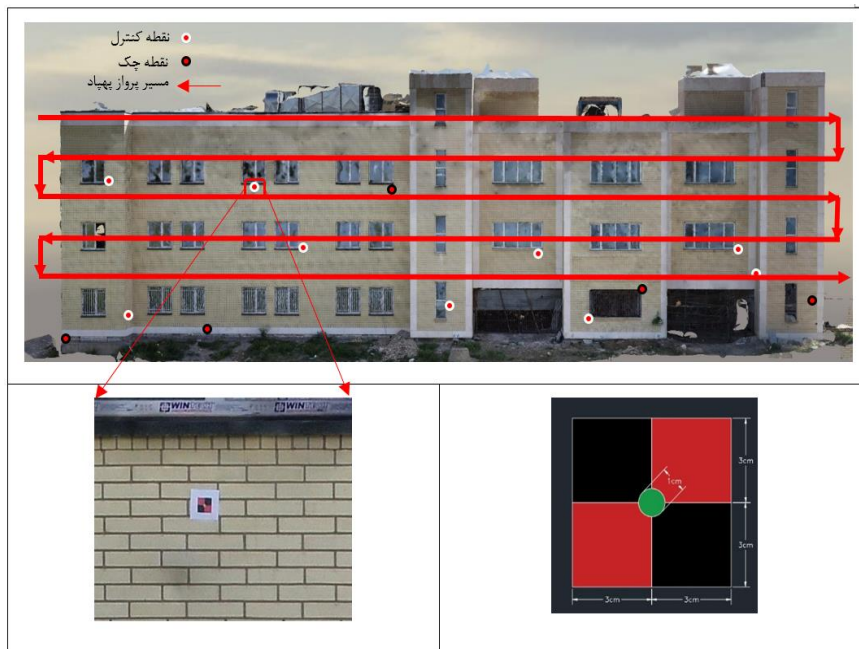
مقدار Value	پارامتر Parameter
100m	برد Range
IP54	کلاس حفاظت Protection Class
1.3kg	وزن سنجنده Scanner Weight
300,000	تعداد نقطه اخذ در ثانیه Points per Second
1 - 3cm	نرخ دقت Relative Accuracy
100-200MB a minute	حجم فایل داده خام Raw Data File Size
Post Processing	پردازش Processing
3.5hrs	عمر باتری Battery Life

- تصویربرداری پهپاد

تصاویر به صورت دستی یا نصب بر روی یک سکو، قابل اخذ هستند. گزینه دوم می‌تواند بسیار مفید باشد، به ویژه در هنگام ثبت ساختمان‌های بلند و سقف‌ها، به طوری که استفاده از پهپاد می‌تواند تنها امکان مستندنگاری با فتوگرامتری به جز استفاده از جرثقیل باشد. پهپاد یا UAV (Unmanned Aerial Vehicle) به عنوان طرحی از یک هواپیما که خلبان انسانی در آن کار نمی‌کند و می‌تواند از دور، کاملاً مستقل یا ترکیبی هدایت شود تعریف می‌کنند [۴۱].

دو نوع پهپاد از نظر ساخت وجود دارد: بال ثابت و عمودپرواز. برخلاف مدل‌های بال ثابت، سیستم‌های عمودپرواز قادر به پرواز در هر جهت، به صورت افقی و عمودی، و همچنین شناور ماندن در یک موقعیت ثابت هستند. این امر آن‌ها را به ابزاری مناسب برای کار بازرسی دقیق یا نقشه‌برداری از مناطق مختلف از جمله مستندنگاری ساختمان تبدیل می‌کند [۴۲].

در این تحقیق از پهپاد چهار موتور فانتوم ۴ پرو، مجهز به PPK (Post Processing Kinematic) به منظور تصویربرداری نمای سایت استفاده شد (شکل ۴). این سیستم مجهز به سنجنده CMOS 1" با میدان دید ۸۴ درجه است. حجم تصاویر تقریباً ۲۰ مگابایت و از فوکوس خودکار پشتیبانی کرده و گشودگی دیافراگم آن نیز بین F/2.8 و F/11 متغیر است. حداقل فاصله لازم برای فوکوس در این دوربین ۱ m و حداکثر ۳۰ m خواهد بود. سیستم فانتوم ۴ پرو، وزنی تقریباً ۱/۳۸ کیلوگرم دارد؛ حداکثر زمان پرواز برای هر منبع تغذیه، ۲۸ دقیقه است و امکان شناور ماندن یا جمع‌آوری تصاویر به صورت عمودی و مایل را فراهم می‌کند. این پهپاد می‌تواند تصاویر را فقط در باندهای RGB ثبت کند و هیچ گونه سنجنده دیگری مانند NIR که روی آن نصب شده باشد، ندارد (جدول ۲).



شکل ۵: موقعیت و تصویر نقاط کنترل و چک همراه با مسیر پرواز پهپاد که روی نمای مدل ساختمان مورد مطالعه نمایش داده شده‌اند (نقاط با عدد و حروف انگلیسی نام گذاری شده‌اند به طوری که، از سمت چپ به راست از P1 شروع و با P14 خاتمه می‌یابند)

Fig. 5: The position and image of control points along with the flight path of the UAV shown on the model of the building case study (the points are named with numbers and English letters so that, from left to right, they start from P1 and end with P14)

جدول ۳: مشخصات نقاط کنترل و چک پس از مثلث‌بندی (حداکثر خطا هر نقطه کمتر از ۰/۰۱ cm است)

Table 4: Specifications of control and check points after triangulation (the maximum error of each point is less than 0.01 cm)

خطای سه‌بعدی [متر]	خطای بازتبدیل RMS [پیکسل]	تعداد تصویر کالیبره شده	نوع نقطه هدف	نام نقطه
3D error [m]	RMS conversion error [pixels]	Number of calibrated images	Target point type	point name
۰/۰۰۱۲۴	۰/۸۸	۴ (از ۴ تصویر Image)	چک Czech	P1
۰/۰۰۱۲۰	۰/۷۳	۴ (از ۵ تصویر Image)	کنترل Control	P2
۰/۰۰۱۲۲	۰/۷۶	۴ (از ۵ تصویر Image)	کنترل Control	P3
۰/۰۰۲۳۱	۰/۹۱	۶ (از ۶ تصویر Image)	چک Czech	P4
۰/۰۰۲۵۱	۰/۲۳	۱۶ (از ۱۹ تصویر Image)	کنترل Control	P5
۰/۰۰۱۷۶	۰/۹۹	۱۴ (از ۱۵ تصویر Image)	کنترل Control	P6
۰/۰۰۳۲۱	۱/۷۵	۱۵ (از ۲۰ تصویر Image)	چک Czech	P7
۰/۰۰۲۴۳	۱/۳۶	۲۰ (از ۲۳ تصویر Image)	کنترل Control	P8
۰/۰۰۱۸۶	۱/۰۳	۱۷ (از ۱۸ تصویر Image)	کنترل Control	P9
۰/۰۰۲۰۰	۱/۱۵	۱۵ (از ۱۵ تصویر Image)	کنترل Control	P10
۰/۰۰۲۲۵	۱/۲۸	۲۲ (از ۲۵ تصویر Image)	چک Czech	P11
۰/۰۰۱۱۰	۰/۵۷	۱۷ (از ۱۷ تصویر Image)	کنترل Control	P12
۰/۰۰۲۸۹	۱/۶۹	۱۵ (از ۱۸ تصویر Image)	کنترل Control	P13
۰/۰۰۱۱۹	۰/۷۹	۶ (از ۶ تصویر Image)	چک Czech	P14

- ابرنقطه ترکیبی

با توجه به اینکه دو ابرنقطه به دست آمده از لیزراسکنر همراه و فتوگرامتری پهپادی هر دو در یک سیستم مختصات مرجع (WGS84) قرار داشته‌اند، پس از وارد نمودن آن‌ها به محیط نرم‌افزار CloudCompare، به‌طور کامل این دو داده با دقت تناظریابی RMS = 0.035 به ازای ۵۰,۰۰۰ نقطه روی یکدیگر قرار گرفت. با توجه به هدف تحقیق (مقایسه داده‌های مختلف)، این داده نیز به صورت رندم نمونه‌برداری شد و به مقدار تقریبی ۲,۰۰۰,۰۰۰ نقطه رسید (شکل ۶ج).

جدول ۴: خلاصه پروژه پرواز با پرندۀ فانتوم ۴ پرو

Table 3: Summary of the Phantom 4 Pro flight project

مساحت منطقه پوشش / coverage area	۱۴۸۶/۵۶ متر مربع
تعداد تصاویر / Number of images	۲۰۲ تصویر
مدل دوربین / Camera model	DJI FC6310
ابعاد تصویر / Image dimensions	۳۶۴۸ × ۵۴۷۲ پیکسل
فاصله دو مسیر پرواز متوالی / The distance between two consecutive flight paths	۲ متر

درستی بازیابی شده‌اند. اولی به وجود نقاطی که به اشتباه به‌عنوان صفحه استخراج شده‌اند حساس است، در حالی که دومی به وجود نقاطی که در مرجع به عنوان صفحه هستند و توسط الگوریتم صفحه شناسایی نمی‌شوند حساس است. در نهایت، امتیاز F1، دقت و بازنمایی را متعادل می‌کند و معمولاً به عنوان یک اندازه‌گیری منحصر به فرد از اثربخشی کلی یک الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۳] بنابراین استفاده از معیارهای سه جانبه دقت، بازنمایی و امتیاز F1 وسیله‌ای موثر برای ارزیابی استخراج اشیا در ابرنقطه است که با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (۱)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۲)$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (۳)$$

که در آن TP تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به طور صحیح به صفحه‌ای که بخشی از آن صفحه در مرجع است اختصاص داده شده است، و FP تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به اشتباه به صفحه‌ای که بخشی از آن صفحه در مرجع است اختصاص داده نشده است. FN تعداد نقاطی را نشان می‌دهد که به اشتباه به صفحه‌ای اختصاص داده شده است که بخشی از آن صفحه در مرجع نیست.

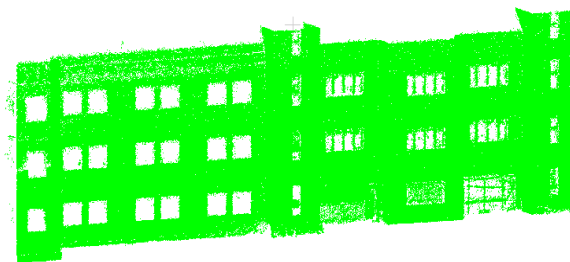
- تولید داده مرجع

برای تأیید نتایج روش روی داده‌ها، داده‌های مرجع به صورت دستی قطع‌بندی شدند. ساختمان‌های مورد مطالعه به طور مستقل توسط دو دانشجوی دکتری که در پردازش LiDAR کار می‌کنند، قطع‌بندی شدند (جدول ۱، ۲ و ۳). هر دو قبلاً با فرآیند قطع‌بندی سطوح آشنا بودند. هر نتیجه با اشتراک دو داده قطع‌بندی شده دستی (مرجع) مقایسه می‌شود. این مقادیر Precision، Recall و F1 score را تولید می‌کند. مقایسه با مجموعه داده مرجع به عنوان شاخص کیفیت نهایی برای نتیجه قطع‌بندی استفاده می‌شود.

ابرنقاط قطع‌بندی شده دستی برای ارزیابی در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. سازگاری کلی بین دو ابرنقطه قطع‌بندی شده دستی، با وجود ناسازگاری‌های کوچک، واضح است. در اینجا ناسازگاری یعنی اختلاف بین تعداد نقاط متعلق به هر صفحه قطع‌بندی شده دستی در دو ابرنقطه یکسان که سرانجام اشتراک دو ابرنقطه قطع‌بندی شده دستی به عنوان داده مرجع در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

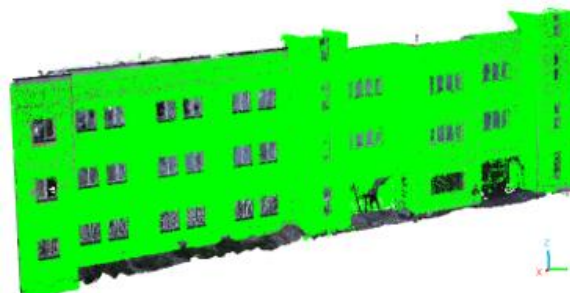
الگوریتم معرفی شده بر روی سه داده از ساختمان مورد نظر اعمال شد. نتایج حاصل از این تحقیق، در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار خواهند گرفت.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: تصویر داده‌های مختلف اخذ شده که به ترتیب، الف: ابرنقطه اخذ شده با لیزراسکنر GeoSLAM ZEB-HORIZON ب: ابرنقطه تولید شده با فتوگرامتری پهپادی. ج: ابرنقطه ترکیبی

Fig. 6: The image of different data obtained, respectively, a: point cloud obtained by GeoSLAM ZEB-HORIZON laser scanner b: point cloud produced by UAV photogrammetry. c: Hybrid point cloud

- ارزیابی دقت

دقت ابرنقطه قطع‌بندی شده را می‌توان با مقایسه نتایج آن در برابر داده‌های مرجع که احتمالاً دستی تولید شده، اندازه‌گیری کرد [۴۳]. سطح سازگاری بین یک نتیجه خودکار و یک نتیجه دستی، نشان‌دهنده کیفیت روش خودکار است.

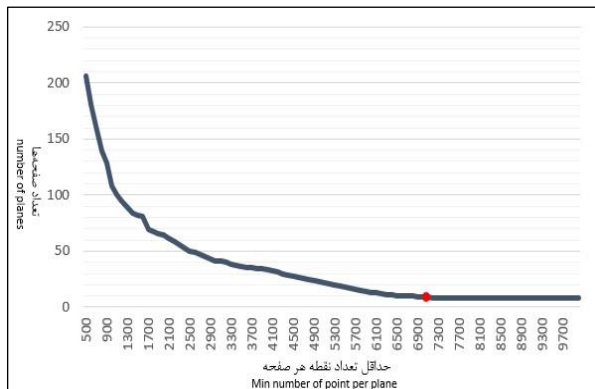
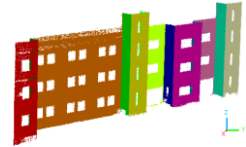
- معیارهای ارزیابی

تعدادی روش در دسترس وجود دارد که سازگاری بین دو مجموعه داده قطع‌بندی شده را اندازه‌گیری می‌کنند (به عنوان مثال: [۴۴-۴۷]). اما به‌طور کلی در زمینه بازیابی اطلاعات، مفاهیم دقت (Precision)، بازنمایی (Recall) و امتیاز F1 (F1 score) معرفی شده‌اند که معیارهای رایج و اساسی برای ارزیابی اثربخشی یک الگوریتم هستند [۵]. دقت، نشان‌دهنده درصد عناصر بازیابی شده درست توسط الگوریتم است، در حالی که بازنمایی، درصدی از داده‌های مرجع را نشان می‌دهد که به

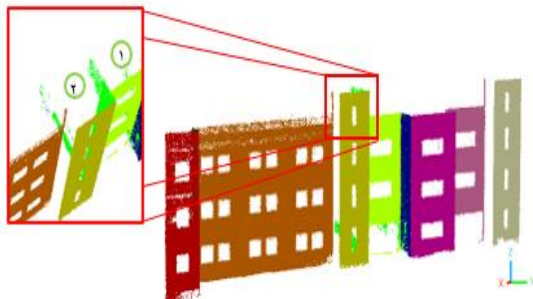
جدول ۵: اطلاعات ابرنقطه قطعه‌بندی شده دستی (مساحت موثر: مساحت هر دیوار منهای مساحت عوارض روی آن چون درب و پنجره)

Table 5: Manually segmented point cloud data (effective area: the area of each wall minus the area of features on it such as doors and windows)

رنگ Color	مساحت موثر [مترمربع] Effective area [m ²]	تعداد نقاط Number of points					
		لیزر اسکنر همراه Mobile laser scanner			تصویربرداری پهپاد UAV imaging		
		مرجع ۱ Ref.1	مرجع ۲ Ref.2	اشتراک Intersect	مرجع ۱ Ref.1	مرجع ۲ Ref.2	اشتراک Intersect
صفحه ۱	19.21	117103	120940	113395	108512	106527	107327
صفحه ۲	11.20	18328	18202	16918	58262	58784	58452
صفحه ۳	69.64	386689	378896	375303	348683	349213	348999
صفحه ۴	12.34	52489	52087	51512	61284	61521	61368
صفحه ۵	23.05	161621	163439	159834	115100	114961	115112
صفحه ۶	12.40	19617	20186	18564	62311	61819	62004
صفحه ۷	17.43	104380	104686	102340	104177	104657	104357
صفحه ۸	11.12	53872	56108	53333	54366	54716	54589
صفحه ۹	24.40	208812	206608	203132	135958	136751	136534
صفحه ۱۰	11.00	12231	12166	11682	54299	54532	54403
صفحه ۱۱	17.60	88444	92155	88248	103777	104277	103921
صفحه ۱۲	13.30	52236	55583	51977	63327	63463	63401
صفحه ۱۳	23.15	144522	157356	141949	115722	115271	115332

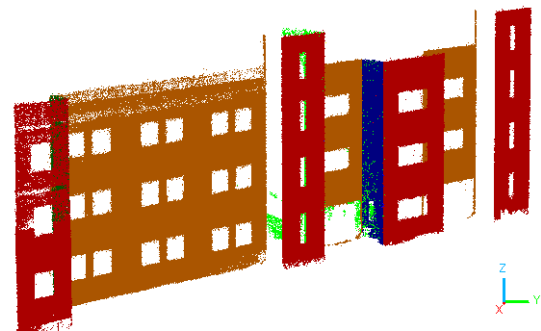


شکل ۸: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه لیزراسکنر همراه. این مقدار برای این ساختمان ۷۰۰۰ نقطه است که تعداد ۵ صفحه را استخراج کرده است
Fig. 8: Show how to determine the Minpoint value for the point cloud of the mobile laser scanner. This value for this building is 7000 points, which has extracted 5 planes



شکل ۹: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه لیزراسکنر همراه (کادر قرمز: دو صفحه که به اشتباه توسط الگوریتم به عنوان دیوار نما استخراج شده‌اند را نشان می‌دهد)
Fig. 9: The results of the second step of the algorithm for the point cloud of the mobile laser scanner (red box: shows the two planes that were wrongly extracted by the algorithm as wall facades)

نتایج برای داده لیزراسکنر همراه پس از اجرای مرحله اول الگوریتم بر روی ابرنقطه ساختمان اول، تغییراتی در تعداد صفحات استخراج شده مشاهده شد. پس از رسیدن به عدد تقریبی ۷۰۰۰ نقطه به عنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه، تغییرات تعداد صفحات استخراج شده به ثبات رسید و مقدار ثابت ۷ صفحه به عنوان حداقل تعداد صفحات استخراج شده تأیید شد (برای مشاهده این تغییرات به شکل‌های ۷ و ۸ مراجعه شود). در مرحله دوم الگوریتم، پس از عبور ۷ صفحه استخراج شده، ۱۲ صفحه به عنوان محتمل‌ترین صفحات نمای ساختمان استخراج شد. از این تعداد، ۱۰ صفحه به درستی به عنوان دیوارهای بیرونی نمای ساختمان شناخته شدند و ۳ صفحه استخراج نشده است. این در حالی است که ۲ صفحه نیز به اشتباه از دیوارهای محیط داخل ساختمان استخراج شدند. این خطاها ناشی از عبور نقاط لیزر به داخل ساختمان بوده‌اند (شکل ۹).



شکل ۷: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه لیزراسکنر همراه
Fig. 7: Results of the first step of the algorithm for the point cloud of the mobile laser scanner.

در مورد داده دوم که از تصویربرداری پهپاد روی نمای ساختمان بدست آمده بود، الگوریتم عملکرد قابل قبولی داشت. تمام ۱۳ دیوار نما با موفقیت استخراج شدند، که این منجر به دستیابی به یک دقت (Precision) بالغ بر ۹۹٪ شد که نشان‌دهنده سطح بالای اطمینان در دیوارهای استخراج شده است. ارزیابی نتایج نشان داد که، الگوریتم تمامی دیوارهایی را استخراج کرد که به عنوان نما شناخته می‌شوند. این مقدار دقت به توانایی روش تصویربرداری در تولید ابرنقطه کم نویز باز می‌گردد. با این حال، عملکرد کلی الگوریتم با نرخ بازنمایی (Recall) بالای ۹۹٪ بسیار مناسب بود، که نشان‌دهنده آن است که تقریباً تمام موارد مثبت واقعی را به طور مؤثر شناسایی می‌کند. F1 score برابر ۹۹٪ بوده و این الگوریتم توانایی ایجاد تعادل میان دقت و بازنمایی را نشان می‌دهد و قابلیت اطمینان آن را برای کاربردهای استخراج نما تقویت می‌کند (جدول ۶).



شکل ۱۲: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد (کادر قرمز): نمونه‌ای از عدم توانایی تولید نقطه الگوریتم SfM از محیط داخل پنجره‌ها (شیشه) در تصاویر که به اشتباه به عنوان دیوار در نتایج الگوریتم پیشنهادی استخراج شده‌اند
Fig. 12: The results of the second stage of the algorithm for the UAV imaging point cloud (red box): an example of the inability of the SfM algorithm to generate points from the environment inside the windows (glass) in the images that are mistakenly extracted as walls in the results of the proposed algorithm

برخلاف داده اول، مشکلات مرتبط با دیوارهای عمود بر مسیر حرکت اسکنر ایجاد نشده است. این امر فرآیند استخراج را ساده‌تر می‌کند و امکان به دست آوردن نرخ بازنمایی بالا را بدون کاهش در دقت فراهم می‌کند.

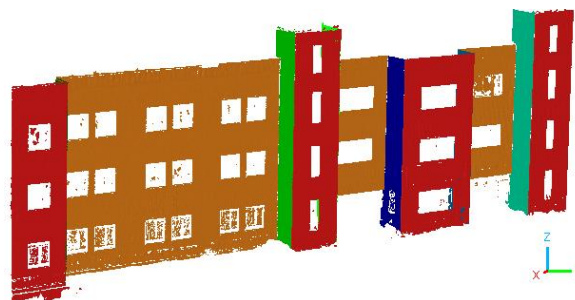
بنابراین، الگوریتم با دقت بالا در استخراج دیوارهای نما از یک ساختمان با نماهای مسطح عمل کرده و توانایی دقت و بازنمایی بسیار بالا را نشان داده است. نادرستی‌های جزئی (عدم رسیدن به مقدار ۱۰۰٪ در دقت و بازنمایی) به دلیل اختلاف حداقلی بین داده‌هایی که به عنوان مرجع با نتیجه الگوریتم مقایسه شده‌اند، است. بیشتر این اختلاف در چگونگی انتخاب نقاط لبه دیوارها توسط الگوریتم و انسان اتفاق افتاده است. البته باید این نکته را در نظر داشت که الگوریتم SfM در تولید نقاط روی شیشه‌ی پنجره‌ها دچار مشکل شده است و این باعث شده که بخشی از نقاط مربوط به فضای داخل پنجره‌ها به عنوان نقاط دیوار استخراج شوند (کادر قرمز رنگ شکل ۱۲). با این حال، موفقیت نشان می‌دهد که زمانیکه داده‌ها ابرنقطه از تصویربرداری باشند، الگوریتم برای کاربردهایی که استخراج دقیق نما از اهمیت بسیاری برخوردار است، مناسب است.

الگوریتم با موفقیت توانست ۱۰ از ۱۳ دیوار بیرونی ساختمان شماره ۱ را با دقت بالایی استخراج کند. میزان دقت (Precision) در این عملیات بالای ۹۳٪ بوده که نشان از دقت بسیار خوبی در استخراج دیوارها دارد. با این حال، در مواردی که الگوریتم با دیوارهای عمود بر حرکت لیزر اسکنر برخورد می‌کند، با چالش‌هایی مواجه می‌شود که نتیجه می‌دهد نرخ بازنمایی (Recall) به ۸۶٪ کاهش یابد. مقدار F1 score نیز حدود ۸۹٪ بوده که نشان‌دهنده عملکرد متوازی است و الگوریتم را به عنوان یک ابزار مؤثر و امیدوارکننده برای اکثر کاربردهای استخراج نما تبدیل می‌کند (جدول ۶).

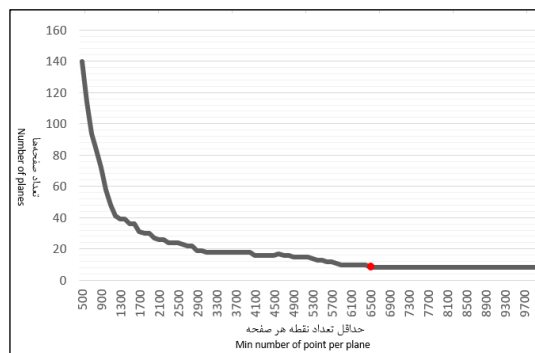
نتایج برای داده تصویربرداری پهپاد:

پس از اجرای مرحله اول الگوریتم بر روی ابرنقطه تصویربرداری پهپاد و ترسیم هیستوگرام، تغییرات در تعداد صفحات استخراج شده مشاهده شد. تعداد صفحات استخراج شده به مقدار تقریبی ۶۵۰۰ نقطه به عنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه کاهش یافت و پس از آن تغییرات تعداد صفحات استخراج شده ثابت ماند و مقدار آن به ۸ صفحه رسید (شکل ۱۱ و ۱۲).

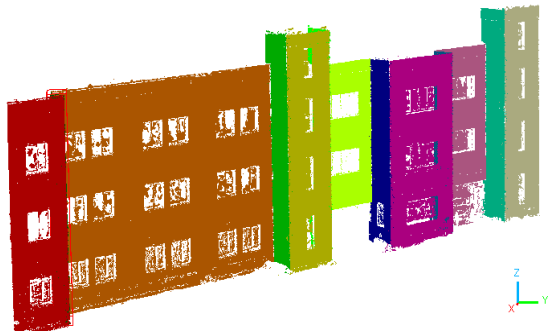
پس از عبور از مرحله دوم الگوریتم، ۱۳ صفحه به عنوان محتمل‌ترین صفحات نمای ساختمان استخراج شدند. تمامی ۱۳ صفحه مربوط به نمای بیرونی ساختمان به درستی استخراج شدند (شکل ۱۳).



شکل ۱۰: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد
Fig. 10: The results of the first step of the algorithm for the UAV imaging point cloud



شکل ۱۱: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه تصویربرداری پهپاد. این مقدار برای ساختمان ۶۵۰۰ نقطه است که تعداد ۸ صفحه را استخراج کرده است
Fig. 11: Show how to determine Minpoint value for UAV imaging point cloud. This value for the building is 6500 points, which has extracted the number of 8 planes



شکل ۱۵: نتایج مرحله دوم الگوریتم برای ابرنقطه ترکیبی

Fig. 15: The results of the second step of the algorithm for the hybrid point cloud

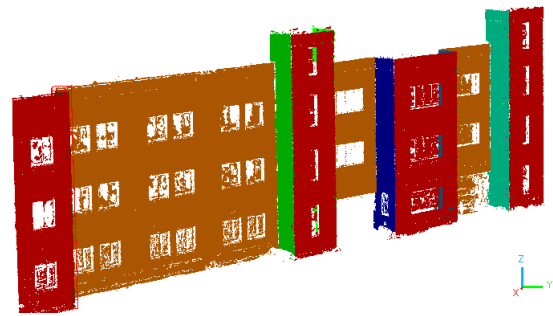
در مورد داده سوم که ترکیب از دو داده دیگر (ابرنقطه لیزراسکتر همراه و ابرنقطه تهیه شده از تصویربرداری پهپاد) بود، الگوریتم با یک سناریو پیچیده‌تر روبرو شد. با موفقیت ۱۳ دیوار را با دقت استخراج کرد، که به دستیابی به دقتی (Precision) بالغ بر ۹۹٪ منجر شد. با این حال، یک چالش مهم در این داده به وقوع پیوست. همچون ابرنقطه تهیه شده از تصویربرداری پهپاد، نقاط داخل محیط درب‌ها و پنجره‌ها نیز توسط الگوریتم در این داده نیز به عنوان نقاط دیوار استخراج شده‌اند. همانطور که گفته شد، این مشکل ناشی از عدم توانایی الگوریتم SfM در تولید نقطه از تصویر شیشه است.

با وجود پیچیدگی‌های ذکر شده، الگوریتم توانسته است با دقت بالایی دیوارهای نما از یک ساختمان را استخراج نماید. دقت بالای الگوریتم و نرخ بازنمایی (Recall) ۹۹٪ دوباره توانایی آن در وظایف استخراج نما را تأیید می‌کند. F1 score نیز بالای ۹۹٪ بوده و این الگوریتم توانایی ایجاد تعادل میان دقت و بازنمایی را به نمایش می‌گذارد. این توانایی به ویژه در مواجهه با چالش‌ها و مشکلاتی که در این سناریوهای چالش‌برانگیز به وقوع می‌پیوندد، از اهمیت بالایی برخوردار است (جدول ۶).

به طور کلی، عملکرد الگوریتم در استخراج دیوارهای نما از یک ساختمان با نماهای مسطح و صفحات عمودی قابل تحسین بوده و این نشان می‌دهد که این الگوریتم به عنوان یک ابزار ارزشمند و قابل اطمینان برای وظایف استخراج نما برای داده‌ها مختلف ارزیابی می‌شود.

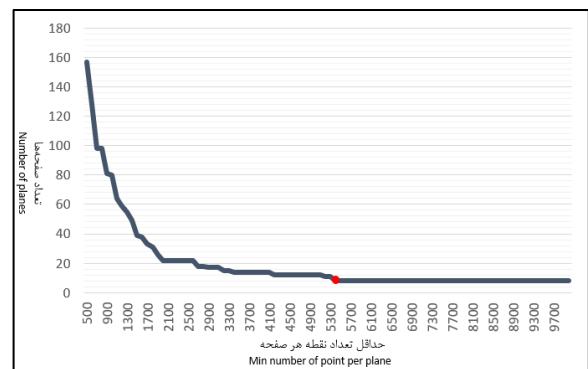
نتایج برای داده ترکیبی

پس از پیاده‌سازی مرحله اول الگوریتم روی ابرنقطه ترکیبی و ترسیم هیستوگرام، مشاهده می‌شود که تعداد صفحات استخراج شده کاهش نسبت به ورودی اولیه داشته و پس از مقدار تقریبی ۵۵۰۰ نقطه بعنوان حداقل تعداد نقاط متعلق به هر صفحه، تعداد صفحات استخراج شده ثابت و مقدار آن برابر ۸ است. این داده نسب به دو داده دیگر سریع‌تر همگرا شده است (شکل ۱۳ و ۱۴). پس از عبور از مرحله دوم الگوریتم، تمام ۱۳ صفحه به عنوان دیوارهای نمای ساختمان استخراج شدند.



شکل ۱۳: نتایج مرحله اول الگوریتم برای ابرنقطه ترکیبی

Fig. 13: Results of the first step of the algorithm for the hybrid point cloud



شکل ۱۴: نمایش چگونگی تعیین مقدار Minpoint برای ابرنقطه ترکیبی. این مقدار برای ساختمان ۵۵۰۰ نقطه است که تعداد ۸ صفحه را استخراج کرده است

Fig. 14: Show how to determine the Minpoint value for the composite point cloud. This value for the building is 5500 points, which has extracted the number of 8 planes

جدول ۶: نتایج و ارزیابی بدست آمده پس از اجرای الگوریتم
Table 6: Results and evaluation obtained after running the algorithm

	تعداد کل صفحه‌ها	تعداد صفحه‌های استخراج شده	تعداد صفحه‌های استخراج شده (درست)	تعداد صفحه‌های استخراج شده (اشتباه)	تعداد صفحه‌های استخراج نشده	دقت (%)	بازنمایی (%)	F1 امتیاز (%)
	total number of planes	Number of extracted planes	Number of extracted planes(true)	Number of extracted planes(false)	Number of unextracted planes	Precision (%)	Recall (%)	F1score (%)
Data1	13	12	10	2	3	93	86	89
Data2	13	13	13	0	0	99	99	99
Data3	13	13	13	0	0	99	99	99

[4] La Russa FM, Grilli E, Remondino F, Santagati C, Intelisano M. Advanced 3D Parametric Historic City Block Modeling Combining 3D Surveying, AI and VPL. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023 Jun 24;48:903-10. <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-903-2023>

[5] Su Z, Gao Z, Zhou G, Li S, Song L, Lu X, Kang N. Building plane segmentation based on point clouds. Remote Sensing. 2021 Dec 25;14(1):95. <https://doi.org/10.3390/rs14010095>

[6] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2006 Apr 1;60(2):100-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001>

[7] Vosselman G, Maas HG. Airborne and terrestrial laser scanning. CRC Press (Taylor & Francis); 2010.

[8] Arachchige NH, Maas HG. Automatic Building Facade Detection in Mobile Laser Scanner point Clouds. Publ. Der. Dtsch. Für. Photogramm. Fernerkund. Und. Geoinf. EV. 2012;21:347-54.

[9] Hu D, Gan VJ, Yin C. Robot-assisted mobile scanning for automated 3D reconstruction and point cloud semantic segmentation of building interiors. Automation in Construction. 2023 Aug 1;152:104949. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104949>

[10] Arachchige NH, Perera SN, Maas HG. Automatic processing of mobile laser scanner point clouds for building facade detection. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012 Jul 27;39:187-92. <https://doi.org/10.5194/isprsjprs-XXXIX-B5-187-2012>, 2012.

[11] Treccani D, Adami A. Single Building Point Cloud Segmentation: Towards Urban Data Modeling and Management. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2023 May 25;48:511-6. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-511-2023>

[12] Boulaassal H, Landes T, Grussenmeyer P. Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner. International Journal of Architectural Computing. 2009 Jan;7(1):1-20. <https://doi.org/10.1260/147807709788549411>

[13] Tarsha-Kurdi F, Landes T, Grussenmeyer P. Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data. In: ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007 2007 (Vol. 36, pp. 407-412).

[14] Sampath A, Shan J. Segmentation and reconstruction of polyhedral building roofs from aerial lidar point clouds. IEEE

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با بررسی عملکرد الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN در استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌های متنوع با تنوع معماری مختلف، به نتایج مهم دست یافت. مقایسه عملکرد این الگوریتم‌ها بر روی سه دسته داده مختلف، اطلاعات مفیدی ارائه کرده است: ۱. استفاده از داده ترکیبی از ابرنقطه لیزراسکنر همراه و ابرنقطه تصویربرداری پهپاد، امکان پوشش دادن نقاط ضعف هر دو دسته داده را فراهم می‌آورد. این تنوع در داده‌ها منجر به بهبود کیفیت و دقت نتایج نهایی می‌شود. ۲. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که داده ترکیبی سریع‌تر از دو دسته داده دیگر در مرحله اول الگوریتم همگرا می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در سازگاری با تنوع داده‌ها و افزایش کارایی الگوریتم است. ۳. عملکرد الگوریتم در تشخیص و استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌ها با دقت و بازنمایی بالا را نشان می‌دهد. این امر نشان از قابلیت اعتماد و اثبات عملکرد الگوریتم در مواجهه با داده‌های مختلف دارد.

با توجه به این نتایج، الگوریتم‌های MSAC و G-DBSCAN به عنوان ابزارهای قدرتمند و قابل اعتماد برای استخراج دیوارهای نما از ساختمان‌های با تنوع معماری مختلف شناخته شده‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها می‌توانند به خوبی بر روی داده‌های مختلف اجرا شوند و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند.

مشارکت نویسندگان

مرتضی حیدری مظفر ایده اولیه کار را مطرح و با ایجاد شرایط لازم برای انجام کار تحقیقاتی، آقای سیدعادل حسینی را در جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل، برنامه‌نویسی و پردازش داده‌ها و جمع‌بندی نتایج و نگارش مقاله راهنمایی کردند.

تشکر و قدردانی

مقاله‌ی ارسالی، بخشی از کار پایان‌نامه کارشناسی ارشدی است که در دانشگاه بوعلی سینا انجام شده است. از همین رو، از گروه عمران دانشکده مهندسی که شرایط را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

منابع و مأخذ

[1] Cornelis N, Leibe B, Cornelis K, Van Gool L. 3d urban scene modeling integrating recognition and reconstruction. International Journal of Computer Vision. 2008 Jul;78:121-41. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0081-9>

[2] Becker S. Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009 Nov 1;64(6):640-53. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.002>

[3] Abreu N, Pinto A, Matos A, Pires M. Procedural point cloud modelling in scan-to-BIM and scan-vs-BIM applications: a review. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2023 Jun 30;12(7):260. <https://doi.org/10.3390/ijgi12070260>

- [26] Deschaut JE, Goulette F. A fast and accurate plane detection algorithm for large noisy point clouds using filtered normals and voxel growing. In 3DPVT 2010 May 17.
- [27] Thomson C, Boehm J. Automatic geometry generation from point clouds for BIM. Remote Sensing. 2015 Sep 14;7(9):11753-75. <https://doi.org/10.3390/rs70911753>
- [28] Qu J, Li S, Li Y, Liu L. Research on railway obstacle detection method based on developed Euclidean clustering. Electronics. 2023 Feb 28;12(5):1175. <https://doi.org/10.3390/electronics12051175>
- [29] Hulik R, Spänzel M, Smrz P, Materna Z. Continuous plane detection in point-cloud data based on 3D Hough Transform. Journal of visual communication and image representation. 2014 Jan 1;25(1):86-97. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.04.001>
- [30] Awwad TM, Zhu Q, Du Z, Zhang Y. An improved segmentation approach for planar surfaces from unstructured 3D point clouds. The Photogrammetric Record. 2010 Mar;25(129):5-23. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2009.00564.x>
- [31] Xu B, Jiang W, Shan J, Zhang J, Li L. Investigation on the weighted ransac approaches for building roof plane segmentation from lidar point clouds. Remote Sensing. 2015 Dec 23;8(1):5. <https://doi.org/10.3390/rs8010005>
- [32] Li L, Yang F, Zhu H, Li D, Li Y, Tang L. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells. Remote Sensing. 2017 May 3;9(5):433. <https://doi.org/10.3390/rs9050433>
- [33] Torr PH, Zisserman A. MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry. Computer vision and image understanding. 2000 Apr 1;78(1):138-56. <https://doi.org/10.1006/cviu.1999.0832>
- [34] Heydari Mozafar, Hosseini. Extracting Façade Points of Urban Buildings from Mobile Laser Scanner Point Clouds. 2023 Jun 22;1(2):163-76. <https://doi.org/10.22061/jrsg.2023.1990>
- [35] Andrade G, Ramos G, Madeira D, Sachetto R, Ferreira R, Rocha L. G-dbscan: A gpu accelerated algorithm for density-based clustering. Procedia Computer Science. 2013 Jan 1;18:369-78. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.200>
- [36] Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012 Dec 15;179:300-14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- [37] Snavely N, Seitz SM, Szeliski R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In ACM siggraph 2006 papers 2006 Jul 1 (pp. 835-846). <https://doi.org/10.1145/1179352.1141964>
- [38] Nolan J, Eckels R, Evers M, Singh R, Olsen MJ. Multi-pass approach for mobile terrestrial laser scanning. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015 Aug 19;2:105-12. <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2015.08.012>
- [15] Zhou G, Cao S, Zhou J. Planar segmentation using range images from terrestrial laser scanning. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2016 Jan 6;13(2):257-61. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2508505>
- [16] Arnaud A, Gouiffès M, Ammi M. On the fly plane detection and time consistency for indoor building wall recognition using a tablet equipped with a depth sensor. IEEE Access. 2018 Mar 21;6: 17643-52. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2817838>
- [17] Weinmann M, Jutzi B, Hinz S, Mallet C. Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015 Jul 1;105:286-304. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.016>
- [18] Lerma JL, Biosca JM. Segmentation and filtering of laser scanner data for cultural heritage. In CIPA 2005 XX international symposium 2005 Sep 26 (Vol. 26, p. 6).
- [19] Stamos I, Yu G, Wolberg G, Zokai S. 3D modeling using planar segments and mesh elements. In Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06) 2006 Jun 14 (pp. 599-606). IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DPVT.2006.5>
- [20] Dold C, Brenner C. Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006 Sep 25;36(5):78-83. <https://doi.org/10.15488/3750>
- [21] Xiao J, Zhang J, Adler B, Zhang H, Zhang J. Three-dimensional point cloud plane segmentation in both structured and unstructured environments. Robotics and Autonomous Systems. 2013 Dec 1;61(12):1641-52. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.07.001>
- [22] Jochem A, Höfle B, Wichmann V, Rutzinger M, Zipf A. Area-wide roof plane segmentation in airborne LiDAR point clouds. Computers, Environment and Urban Systems. 2012 Jan 1;36(1):54-64. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurb.2011.05.001>
- [23] Kwak E, Al-Durgham M, Habib A. Automatic 3D building model generation from lidar and image data using sequential minimum bounding rectangle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012 Jul 31;39:285-90. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXIX-B3-285-2012>
- [24] Hough PV, inventor. Method and means for recognizing complex patterns. United States patent US 3,069,654. 1962 Dec 18.
- [25] Fischler MA, Bolles RC. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM. 1981 Jun 1;24(6):381-95. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

Control, Automation, Robotics and Vision 2008 Dec 17 (pp. 623-629). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICARCV.2008.4795590>

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



مرتضی حیدری مظفر در سال ۱۳۹۵، دوره دکتری مهندسی عمران - نقشه برداری خود را در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با موفقیت به اتمام رساند. ایشان از سال ۱۳۹۶ با عنوان استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا مشغول تدریس

و پژوهش هستند. نتایج تحقیقات ایشان در قالب دهها مقاله علمی در نشریات و کنفرانسهای مختلف ارائه شده است. زمینههای تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، هوش مصنوعی، کاربردهای سنجش از دور در مدیریت بلایای طبیعی، پردازش دادههای لیزر اسکنرهای زمینی و همراه، GIS در صنعت آب و برق.

Heidarimozaffar, M. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

✉ m.heidarimozaffar@basu.ac.ir



سید عادل حسینی دانشجوی دکتری تخصصی دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان میباشند. ایشان مدرک کارشناسی مهندسی عمران - نقشه برداری را در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه زنجان و مدرک کارشناسی ارشد مهندسی

عمران - نقشه برداری گرایش سنجش از دور را در سال ۱۴۰۱ از دانشگاه بوعلی سینا همدان دریافت نمودند. در مهر ماه ۱۴۰۱ به عنوان دانشجوی دکتری در این رشته پذیرفته شد. زمینههای تخصصی ایشان عبارتند از: قطعه بندی و طبقه بندی ابرنقطه، مدلسازی مبتنی بر ابرنقطه و تصویر، بارزسازی تصاویر با یادگیری عمیق.

Hosseini, S.A. Student, Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran

✉ a.hosseini@trn.ui.ac.ir

<https://doi.org/10.5194/ISPRSANNALS-II-3-W5-105-2015>

[39] Nolan J, Eckels R, Olsen MJ, Yen KS, Lasky TA, Ravani B. Analysis of the multipass approach for collection and processing of mobile laser scan data. *Journal of Surveying Engineering*. 2017 Aug 1;143(3):04017004.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000224](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000224)

[40] Oliveira A, Oliveira JF, Pereira JM, De Araújo BR, Boavida J. 3D modelling of laser scanned and photogrammetric data for digital documentation: the Mosteiro da Batalha case study. *Journal of real-time image processing*. 2014 Dec;9:673-88.
<https://doi.org/10.1007/s11554-012-0242-0>

[41] *International Civil Aviation Authority. Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS). International Civil Aviation Organization; 2015.*

[42] M. Faltýnová, E. Matoušková, J. Šedina, and K. Pavelka, "Building facade documentation using laser scanning and photogrammetry and data implementation into BIM," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 41, no. July, pp. 215–220, 2016,
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B3-215-2016>

[43] Vo AV, Truong-Hong L, Laefer DF, Bertolotto M. Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015 Jun 1;104:88-100. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011>

[44] Polak M, Zhang H, Pi M. An evaluation metric for image segmentation of multiple objects. *Image and Vision Computing*. 2009 Jul 2;27(8):1223-7.
<https://doi.org/10.1016/j.imavis.2008.09.008>

[45] Yan J, Shan J, Jiang W. A global optimization approach to roof segmentation from airborne lidar point clouds. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2014 Aug 1;94:183-93. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.022>

[46] Martin D, Fowlkes C, Tal D, Malik J. A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics. *In Proceedings eighth IEEE international conference on computer vision. ICCV 2001 2001 Jul 7 (Vol. 2, pp. 416-423). IEEE*. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2001.937655>

[47] Saeedi P, Zwick H. Automatic building detection in aerial and satellite images. *In 2008 10th International Conference on*

Citation (Vancouver): Heidarimozaffar M, Hosseini S.A. [Comparison of extracting façade points of urban buildings from points cloud of mobile laser scanner and UAV imaging]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2024; 2(2): 307-320

 <https://doi.org/10.22061/jrsgr.2024.11266.1084>



COPYRIGHTS

© 2024 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/>)