نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هشتم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۹

Vol.8, No.4, Winter 2021

۱ -۲۶

مقاله پژوهشی

DOI: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7

روشی نوین برای جانمایی ابرهای نقاط زمینی محلی در ابرنقاط هوایی سراسری

امین باغانی[1*]، محمدجواد ولدان زوج[2]، مهدی مختارزاده[3]

۱- دانشجوی دکتری گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

چکیده

تهیه یک پوشش کامل و متراکم از نواحی شهری، عمدتاً نیازمند اخذ داده‌های محلی در چندین ایستگاه زمینی و ادغام آنها با یک داده سراسری اخذشده از منظرهای هوایی می‌باشد. مقاله حاضر مسأله زمین‌مرجع‌سازی و مرتبط‌سازی اسکن‌های محلی اخذشده بوسیله لیزراسکنر زمینی را در فضای واسطه ابرنقاط هوایی سراسری، بدون استفاده از هرگونه داده‌های کمکی و یا عملیات دستی، مدنظر قرار داده است. از این رهگذر، جانمایی اسکن‌های زمینی محلی در ابرنقاط هوایی سراسری، به عنوان چالش اصلی در مرتبط‌سازی این داده‌ها مورد تأکید قرار گرفته است. علاوه بر نامتجانس بودن منظرهای هوایی و زمینی، هریک از ابرنقاط کوچک‌مقیاس زمینی به سختی با ابرنقاط بالاسری و بزرگ‌مقیاس هوایی قابل‌مقایسه هستند. روشی چندمرحله‌ای جهت جانمایی خودکار اسکن‌های زمینی در ابرنقاط هوایی ارائه شده است. روش پیشنهادی با شناسایی موقعیت‌های کاندید استقرار لیزراسکنر در ابرنقاط هوایی آغاز می‌شود. در ادامه، با شبیه‌سازی عملکرد لیزراسکنر، محدوده رؤیت‌پذیر به این موقعیت‌ها از ابرنقاط هوایی شناسایی و در قالب ابرنقاط هوایی کاندید استقرار استخراج می‌شوند. در نتیجه مسأله جانمایی به مسأله تناظریابی میان چند ابرنقطه زمینی با چند ابرنقطه هوایی تبدیل می‌گردد. به منظور افزایش قیاس‌پذیری ابرهای‌نقاط زمینی و هوایی در پروسه تناظریابی، ساختارهای هندسی شاخص موجود در هر ابرنقطه با استفاده از چهار ویژگی هندسی طراحی‌شده استخراج و در قالب نقشه-ویژگی-های معرف هر ابرنقطه سازماندهی می‌گردند. نقشه-ویژگی‌های تولیدشده برای هر ابرنقطه توسط توصیفگر مستقل از دوران *F-HOG* توصیف می‌شوند و در نهایت مسأله تناظریابی در قالب یک طبقه‌بندی *k-nn* میان کلاس‌های تولیدشده برای این توصیفگرها، ساختاردهی می‌شود. نهایتاً جانمایی هر اسکن زمینی بر اساس نتایج طبقه‌بندی انجام می‌پذیرد. نتایج ارزیابی روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده مأخوذه از منطقه‌ای شهری، دقت در حدود ۵ متر را برای جانمایی اسکن‌های زمینی در سیستم مختصات مربوط به ابرنقطه هوایی نشان داد که جهت ورود به فرآیند مرتبط‌سازی ابرهای‌نقاط زمینی و هوایی کافی به نظر می‌رسد.

کلید واژه‌ها : ابرنقاط، مرتبط‌سازی، طبقه‌بندی، تناظریابی، لیزراسکنر، فتوگرامتری پهپاد.

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۶۱۱۵۹۴۰

Email: amin_baghani@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]

[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

۱- مقدمه

طی سال‌های اخیر، اخذ اطلاعات سه‌بعدی کامل، متراکم و با دقت بالا از نواحی شهری، یکی از موضوعات مهم مطرح در حیطه بسیاری از علوم نظیر: فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، ماشین‌بینائی، کامپیوترگرافیک و ... بوده است [۱]. از دیدگاه موقعیت سکوی حامل سنجنده می‌توان روش‌های موجود را به دو دسته هوایی و زمینی تقسیم‌بندی نمود. لیزراسکنرهوائی (*ALS*)[۱] و فتوگرامتری هوائی در دسته سکوهای هوائی و لیزراسکنر زمینی (*TLS*)[۲]، فتوگرامتری زمینی و لیزراسکنر زمینی متحرک (*MLS*)[۳] در دسته سکوهای زمینی قرار می‌گیرند. به‌دلیل دید بالاسری و وسیع سکوهای هوایی، معمولاً از آنها برای تهیه ابرنقاط سراسری[۴] و در مقیاس‌های وسیع استفاده می‌شود. در مقابل، به‌دلیل محدودیت دید در سطح زمین به خصوص در مناطق متراکم شهری، از سکوهای زمینی جهت تولید ابرنقاط محلی[۵] و در مقیاس‌های نسبتاً کوچکتری استفاده می‌شود. تهیه یک پوشش کامل با استفاده از سکوهای زمینی نیازمند استقرار در چندین موقعیت است. هر کدام از اسکن‌های زمینی در سیستم مختصات محلی دستگاه تولید می‌شوند و ایجاد یک سیستم مختصات یکپارچه زمین‌مرجع برای آنها نیازمند مرتبط‌سازی و زمین‌مرجع‌سازی آنها با استفاده از روش‌های دستی و تجهیزات جانبی (نظیر تارگت‌های مصنوعی و *GNSS* و ...) می‌باشد. از سوی دیگر سکوهای هوایی اطلاعات سه‌بعدی با تراکم نسبتاً بالایی را در مناطق وسیع و در مدت زمان نسبتاً کوتاه تولید می‌کنند. سطوح فوقانی عوارضی نظیر سقف ساختمان‌ها به شکل مناسبی توسط این سکوها رؤیت می‌شوند اما در داده‌های آنها اطلاعات متراکمی از سطوح جانبی عوارض (نظیر نمای ساختمان‌ها) وجود ندارند. سکوهای زمینی اطلاعات سه‌بعدی نسبتاً کامل و متراکمی از سطوح جانبی عوارض در مدت زمان نسبتاً بیشتر و در وسعت‌های نسبتاً کمتری، تولید می‌کنند. علیرغم تراکم مناسب اطلاعات در سطوح جانبی، این سکوها از سطوح فوقانی اطلاعات چندانی اخذ نمی‌کنند [۲]. بنابراین به‌منظور تهیه پوشش کامل از مناطق شهری ادغام داده‌های اخذ شده توسط سکوهای هوائی و زمینی ضروری به نظر می‌رسد. مرتبط‌سازی این داده‌ها به‌معنی یافتن پارامترهای تبدیل سیستم مختصات‌شان، پیش‌زمینه ادغام آن‌ها است. اما تهیه یک دید زمینی کامل با استفاده از لیزراسکنر و تلفیق آن با ابرنقاط هوایی، نیازمند همپوشانی نسبتاً بالا بین اسکن‌های زمینی و همینطور استفاده از نقاط کنترل و یا تجهیزات جانبی به منظور زمین‌مرجع‌سازی آنها می‌باشد که امری طاقت‌فرسا و زمانبر است. قید همپوشانی بالا و همچنین اطلاع دقیق از وضعیت همپوشانی اسکن‌های زمینی را می‌توان به عنوان یک چالش برای مسأله تهیه پوشش کامل از مناظر زمینی و همچنین مرتبط‌سازی آنها با مناظر هوایی برشمرد. بنابراین، مرتبط‌سازی اسکن‌های زمینی محلی و کوچک‌مقیاس با ابرنقاط هوایی سراسری و بزرگ مقیاس، می‌تواند به عنوان یک راهکار چندمنظوره قلمداد شود که مهم‌ترین هدف آن تهیه یک پوشش کامل در هر دو سطوح جانبی و فوقانی عوارض می‌باشد. اتخاذ چنین استراتژی در مرتبط‌سازی، از یک طرف هر کدام از اسکن‌های زمینی را به صورت مستقل و بدون در نظر گرفتن ارتباط آن با سایر اسکن‌ها به ابرنقاط هوایی مرتبط می‌کند و در نتیجه به صورت غیرمستقیم آن را زمین مرجع می‌سازد و از طرف دیگر موجب می‌شود هر کدام از اسکن‌های زمینی به صورت غیرمستقیم و در فضای واسطه (ابرنقاط هوایی) نسبت به یکدیگر توجیه شوند. بنابراین، جانمایی اسکن‌های زمینی در ابرنقاط هوایی

۱ *Airborne Laser Scanner*

۲ *Terrestrial Laser Scanner*

۳ *Mobile Laser Scanner*

۴ *Global*

۵ *Local*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

به عنوان پیش‌درآمدی بر مرتبط‌سازی چندجانبه میان ابرهای نقاط زمینی و هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. پس از این مهم، یک مرتبط‌سازی چندجانبه شامل: چندین اسکن زمینی با ابرنقاط هوایی و همچنین اسکن‌های زمینی مختلف با یکدیگر، قابل پیگیری است. از دیدگاه نوع سکو، تحقیقات مرتبط-سازی ابرنقاط در حیطه سنجش‌ازدور و فتوگرامتری را می‌توان به دو دسته: مرتبط‌سازی ابرنقاط از سکوهایی با دید یکسان و سکوهایی با دید غیریکسان تفکیک نمود. گزارش‌های بسیاری در خصوص مرتبط‌سازی ابرنقاط اخذ شده از سکوهائی با دید یکسان در دست است. از این بین می‌توان به تحقیقاتی در مورد مرتبط-سازی نوارهای همسایه در *ALS* و همچنین گزارش‌های بسیاری در مورد مرتبط‌سازی اسکن‌های مختلف *TLS* اشاره نمود [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰]. اما در خصوص مرتبط‌سازی ابرنقاط مربوط به سکوهای متفاوت گزارش‌های نسبتاً کمتری موجود است [۲]. مرتبط-سازی داده‌های *ALS* با *TLS* و داده‌های *ALS* با *MLS* عمده تحقیقات این حیطه را تشکیل می‌دهد. تحقیقات مرتبط با این حوزه را می‌توان به سه دسته: نقطه‌مبنا، خط‌مبنا و سطح‌مبنا دسته‌بندی نمود. الگوریتم تکراری نزدیکترین نقاط (*ICP*[۱]) به همراه مشتقات آن، به عنوان یک روش استاندارد نقطه‌مبنا برای مرتبط‌سازی دقیق دو ابرنقطه شناخته شده‌اند [۱۱و ۱۲]. اما *ICP* جهت عملکرد صحیح نیاز دارد که دو ابرنقطه ورودی نسبت به یکدیگر توجیه اولیه شده باشند و همچنین دارای همپوشانی نسبتاً بالایی باشند، که در خصوص مرتبط‌سازی ابرنقاط زمینی و هوایی چندان میسر نیست. چنگ و همکاران (۲۰۱۳) یک روش نیمه-خودکار برای مرتبط‌سازی ابرنقاط *TLS* و *ALS* ارائه نمود [۱۳]. در این تحقیق ابتدا مرز ساختمان‌ها از هر دو داده شناسایی و سپس با تقاطع آنها، نقاط گوشه استخراج شدند. در مرحله بعدی به منظور برآورد پارامترهای مرتبط‌سازی، روشی برای تناظریابی نقاط گوشه مستخرج از دو داده به همراه برآورد پارامترهای مرتبط‌سازی از طریق چک کردن میزان تطابق خطوط، ارائه شد. چنگ و همکاران (۲۰۱۵) دقت روش ارائه شده در تحقیق پیشین را با تعدیل موقعیت هندسی نقاط گوشه استخراج‌شده از ابرنقاط هوایی، بهبود داد [۱۴]. کدزیرسکی و همکاران (۲۰۱۴) یک روش مبتنی بر تبدیل ویولت[۲] به منظور بهبود دقت استخراج نقاط گوشه از داده *ALS* ارائه نمود. در این تحقیق از اطلاعات شدت[۳] نیز به عنوان داده کمکی در استخراج نقاط گوشه استفاده شد [۱۵]

باغانی و همکاران (۲۰۱۸) یک روش چند مرحله‌ای خط‌مبنا جهت مرتبط‌سازی ابرنقاط تصویرمبنای زمینی و هوایی پیشنهاد نمودند [۱۶]. ابرنقاط تصویرمبنای تولیدشده در سیستم مختصات دوربین و همچنین ابرنقاط هوایی تصویرمبنا، شرایط پیچیده‌تری به لحاظ پارامترهای تبدیل دو سیستم مختصات در مقایسه با روش‌های مشابه که از داده‌های لیزرمبنا استفاده می-کنند، به مرتبط‌سازی تحمیل می‌کند. چرا که در سیستم مختصات دوربین محورهای سیستم مختصات و بویژه محور *Z*، معمولاً تابع زاویه تصویربرداری نسبت به صحنه اختیار می‌شوند و در نتیجه ابرنقاط اخذ شده دارای تیلت بزرگی نسبت به سیستم مختصات مرجع خواهد بود؛ از طرف دیگر مقیاس به سیستم مختصات دوربین به صورت اختیاری معرفی می‌گردد و در نتیجه مقیاس ابرنقاط حاصل نیز با فضای عارضه اختلاف شدیدی خواهد داشت. ارائه روشی پارمتر-مقید جهت معرفی خطوط در سیستم مختصات قطبی و مرتبط-سازی آنها بر این اساس، از جمله ویژگی‌ها متمایز روش پیشنهادی این تحقیق می‌باشد. وو و همکاران (۲۰۱۴)

۱ *Iterative Closest Point*

۲ *Wavelet*

۳ *Intensity*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

روشی جهت مرتبط‌سازی ابرنقاط *TLS* و *ALS* مربوط به چند ساختمان ارائه نمود[۱۷]. با استفاده از روش نیمه‌خودکار خطوط مرز ساختمان‌ها استخراج گردیدند و سپس با استفاده از یک مدل ریاضی مبتنی بر پارامترهای شیب و عرض از مبدأ تعریف شدند. نهایتاً، مرتبط‌سازی در دو مرحله جداگانه مسطحاتی و ارتفاعی انجام پذیرفت. در تحقیق هانسن و همکاران (۲۰۰۸) یک روش خودکار جهت مرتبط‌سازی ابرنقاط *TLS* و *ALS*، با استفاده از خطوط مرز ساختمان‌ها ارائه شد [۱۸]. سپس مرتبط‌سازی در دو بخش مجزا انجام پذیرفت. در مرتبط‌سازی نیمه‌دقیق، ابتدا پارامتر دوران بر اساس محاسبه همبستگی[۱] بین هیستوگرام‌های توجیه خطوط مرز ساختمان‌ها محاسبه گردید. متعاقب توجیه دورانی، پارامتر انتقال از طریق اتخاذ یک استراتژی مبتنی بر سعی و خطا برآورد گردید. در مرحله مرتبط‌سازی دقیق نیز پارامترهای تبدیل بین دو سیستم مختصات بر اساس پارامترهای خطوط متناظر به همراه نقطه میانی آنها، برآورد گردید. یانگ و همکاران (۲۰۱۵)، مرتبط‌سازی ابرنقاط *TLS* و *ALS* را از طریق یک استراتژی چهار مرحله‌ای انجام داد [۲]. در مرحله اول خطوط مرز ساختمان از هر دو داده استخراج گردیدند. در مرحله دوم یک تناظریابی اولیه بین این خطوط بر اساس قیود هندسی، انجام گرفت. در مرحله سوم خطوط مرز در هر دو داده با استفاده از تئوری گراف طیفی[۲] ساختاربندی شدند. در مرحله چهارم متناظرهای بهینه با استفاده از ماتریس لاپلاسین تعیین و پارامترهای تبدیل بین دو سیستم مختصات با اتکا به آنها برآورد گردید. چنگ و همکاران (۲۰۱۵)، یک روش سلسه‌مراتبی جهت مرتبط‌سازی ابرنقاط *MLS* و *ALS*، بر اساس شبکه راه‌ها و منحنی سه‌بعدی مرز ساختمان‌ها ارائه نمود [۱۹]. مرتبط‌سازی نیمه‌دقیق با استفاده از تناظریابی شبکه راه‌های استخراج شده از *ALS* و مسیر حرکت وسیله نقلیه، انجام پذیرفت. در مرتبط‌سازی دقیق نیز با استفاده از ماتریس رودریگوئز[۳] و شرط هم‌خطی، منحنی‌های متناظر شناسائی و پارامترهای مرتبط‌سازی با استفاده از منحنی‌های متناظر، محاسبه گردیدند.

یک روش خودکار صفحه‌مبنا جهت مرتبط‌سازی داده‌های *TLS* و *ALS* در تحقیق تئو و همکاران (۲۰۱۴) ارائه گردید [۲۰]. در این تحقیق از تناظریابی سطوح و یک مدل ریاضی مبتنی بر کمترین مربعات سه‌بعدی، جهت کمینه‌سازی فاصله بین صفحات متناظر استفاده گردید. تحقیق نواک و شیندلر (۲۰۱۳)، مرتبط‌سازی ابرنقاط تصویرمبنا و لیزرمبنای دارای همپوشانی نسبتاً زیاد را مورد بررسی قرار داد [۲۱]. تیلت ابرنقاط تصویرمبنا از طریق محاسبه امتدادهای قالب بردارهای نرمال هر دو داده و توجیه کردن آن‌ها با یکدیگر، حذف گردید. در ادامه دو مجموعه‌داده تبدیل به دو میدان ارتفاعی ۲/۵ بعدی[۴] شدند و به عنوان ورودی مرحله تناظریابی و محاسبه مرتبط‌سازی نیمه‌دقیق با استفاده از الگوریتم رنسک[۵] و متعاقب آن اعمال پالایش پارامتر مقیاس، مورد استفاده قرار گرفتند. در اکثر تحقیقات حوزه مرتبط‌سازی ابرنقاط زمینی و هوایی، هر دو مجموعه داده به لحاظ وسعت و مقیاس با یکدیگر قابل قیاس هستند، در نتیجه اتخاذ یک استراتژی مبتنی بر استخراج عوارض متناظر از هر دو مجموعه‌داده و برآورد پارامترهای مرتبط‌سازی با استفاده از آنها می‌تواند مؤثر واقع شود. در واقع در اکثر این تحقیقات با یک مرتبط‌سازی یک به یک مواجه هستیم که در نتیجه تمرکز آنها همواره بر روی استخراج و تناظریابی مؤثر عوارض از دو مجموعه داده و روش‌های ریاضی برآورد پارامترهای مرتبط‌سازی بوده است. از این منظر، روش-

۱ *Correlation*

۲ *Spectral Graph*

۳ *Rodrigues Matrix*

۴ *2.5D Height Field*

۵ *RANSAC*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

های ارائه‌شده را می‌توان دارای ساختارهای کلی مشابه دانست که تا حدود مناسبی توسعه یافته‌اند؛ اکثر آنها مبتنی بر شناسایی، استخراج و تناظریابی عوارض هندسی نقطه‌ای، خطی و یا صفحه‌ای از ابرنقاط هستند. چنین روش‌هایی تا حدود زیادی نیازمند این است که دو ابرنقاط، از نظر وسعت و محدوده تحت پوشش قابل مقایسه بوده و از یک منطقه متناظر و یکسان اخذ شده باشند. در واقع، قیاس‌پذیری دو ابرنقاط موجب شناسایی عوارض هندسی مشترک شده و احتمال موفقیت الگوریتم‌های تناظریابی را افزایش می‌دهد؛ در حالیکه چنانچه دو مجموعه داده از دیدگاه وسعت و محدوده تحت پوشش با یکدیگر قابل مقایسه نباشند، عوارض استخراج شده از آنها از نظر تعداد با یکدیگر قابل مقایسه نبوده و در نتیجه مرحله تناظریابی به سختی قابل پیگیری خواهد بود. در تحقیق حاضر سعی شده است که از منظر جدیدی به مسأله مرتبط-سازی ابرهای نقاط زمینی و هوایی در راستای تهیه یک پوشش کامل و متراکم از مناطق شهری نگریسته شود. یک ابرنقطه هوایی زمین‌مرجع به عنوان داده مرجع در نظر گرفته شده است. چندین ابرنقطه زمینی محلی کوچک مقیاس که از بخش کوچک و نامعلومی اخذ شده‌اند، به عنوان داده‌های منبع جهت مرتبط‌سازی با داده مرجع در نظر گرفته شده‌اند. تحقیق حاضر بر این فرضیه متکی است که هیچ‌گونه اطلاعاتی در خصوص موقعیت اخذ داده‌های زمینی در دست نیست، همچنین است ارتباط میان هر کدام از این داده‌ها با یکدیگر و نحوه همپوشانی آنها. در واقع چنین شرایطی با حالتی قابل قیاس است که تعداد زیادی ابرنقاط زمینی محلی تهیه شده توسط کاربران مختلفی از یک منطقه وسیع در اختیار است که از موقعیت مکانی اخذ این داده‌ها و همچنین ارتباط دو به دوی آنها هیچ‌گونه اطلاعی در دست نیست. مرتبط‌سازی هر کدام از این ابرنقاط زمینی با داده هوایی زمین‌مرجع را می‌توان همزمان به عنوان زمین‌مرجع سازی و مرتبط‌سازی آنها با یکدیگر نیز در نظر گرفت. در مسأله مورد اشاره، چنانچه موقعیت تقریبی متناظر با مرکز هر کدام از ابرنقاط زمینی در ابرنقاط هوایی به‌دست آید، می‌توان مرتبط-سازی آنها را در قالب دو ابرنقطه قابل مقایسه و هم-وسعت، که روش‌های مربوط به آن به طرز نسبتاً مناسبی توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است، پیگیری نمود. بنابراین در تحقیق حاضر، یافتن موقعیت هر ابرنقطه زمینی محلی در ابرنقاط سراسری هوایی به عنوان چالش اصلی در مرتبط‌سازی چنین مجموعه داده‌هایی مورد توجه قرار گرفته است. این مسأله به عنوان جانمایی ابرهای نقاط زمینی محلی در ابرنقاط هوایی سراسری معرفی و برای این منظور یک روش نوین چندمرحله‌ای پیشنهاد گردیده است.

۲- روش پیشنهادی

فلوچارت ارائه شده در شکل (۱)، گام‌های اساسی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. جزئیات گام‌های روش پیشنهادی به همراه پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج آن در ادامه این مقاله آمده است.

۲-۱- تفکیک ابرنقاط هوایی به مجموعه‌ای از ابرهای نقاط هوایی کاندید

در ادامه، این مبحث به طور مفصل آورده شده است.

۲-۱-۱- شناسائی نقاط کاندید استقرار اسکنر زمینی در ابرنقاط هوائی

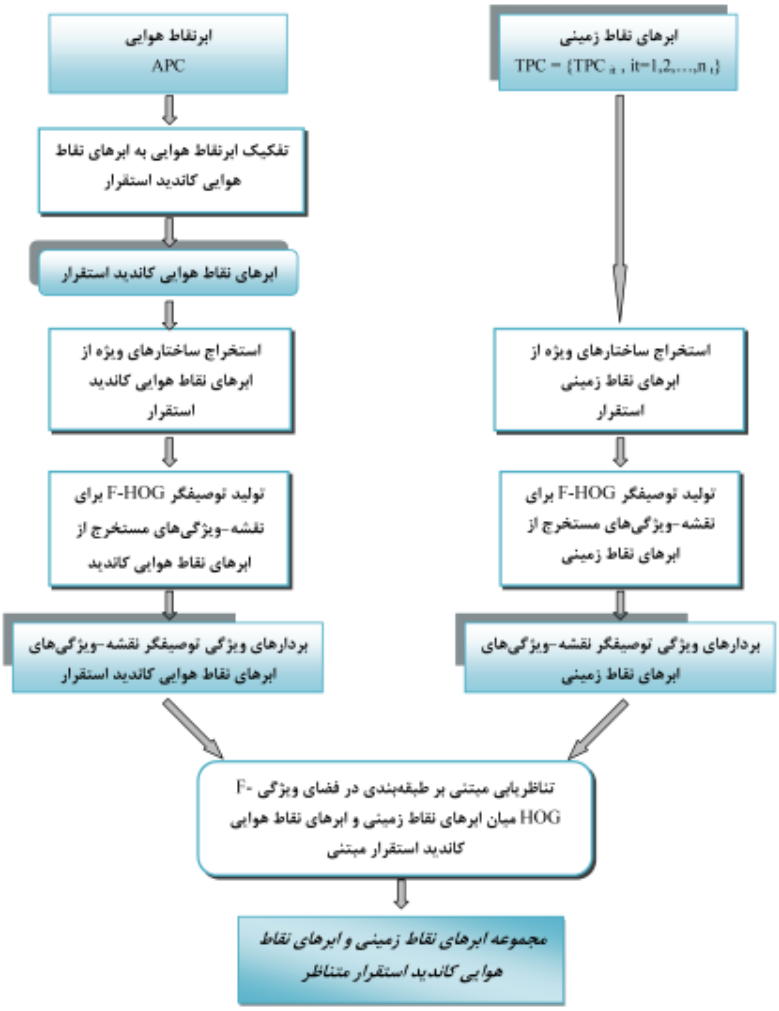
به عنوان یک فرضیه مبتنی بر واقعیت‌های اجرائی، دستگاه لیزراسکنر زمینی معمولاً بر روی سطح زمین و با یک فاصله مشخص از عوارض غیرزمینی نظیر ساختمان‌ها مستقر می‌گردد. با در نظر گرفتن این فرضیه، به منظور یافتن نقاط کاندید استقرار، ابرنقاط هوایی به دو گروه زمینی و غیرزمینی جداسازی[۱] گردید و جستجو برای یافتن نقاط کاندید استقرار، در محدوده نقاط زمینی، دنبال شد. جهت فیلترکردن نقاط غیرزمینی از الگوریتم شبیه‌سازی فیلتر پارچه[۲] (*CSF*)،

۱ *Ground & non-ground filtering*

۲ *Cloth Filter Simulation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

استفاده شد [۲۲]. این روش مبتنی بر شبیه‌سازی رفتار پارچه‌ای فرضی است که بر روی ابرنقاط معکوس‌شده قرار گرفته است. با تجزیه و تحلیل اثر متقابل بین نودهای تعریف شده برای این پارچه فرضی با نقاط متناظر با آنها در ابرنقاط هوایی، سطح تقریبی زمین بر اساس موقعیت‌های محسابه شده برای این نودها شبیه-سازی می‌گردد. نهایتاً، نقاط زمینی از طریق مقایسه بین نقاط اصلی و سطح شبیه‌سازی شده، از سایر نقاط تفکیک می‌گردند.



شکل ۱: فلوچارت روش پیشنهادی تحقیق.

پس از جداسازی نقاط زمینی از ابرنقاط هوائی، به منظور استخراج نقاط کاندید استقرار از محدوده نقاط زمینی تفکیک‌شده، گام‌های زیر اجرا گردید:

۱) تصویر کردن ابرنقاط هوایی در یک شبکه دوبعدی منظم با ابعاد $N_g \times N_g$ متر.

۲) تخصیص برچسب کاندید استقرار به سلول‌هایی که حداقل ۸۰ درصد از نقاط آن زمینی باشند.

۳) استخراج (x,y) موقعیت مراکز سلول‌های کاندید استقرار به عنوان موقعیت کاندید استقرار و تخصیص z به آنها از طریق جستجوی نزدیکترین نقطه به آنها.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

درنهایت، خروجی این مرحله مجموعه $CP=\{CP_{ia}, ia=1,2,\ldots,n_A\}$ متشکل از موقعیت‌های کاندید استقرار مستخرج از ابرنقاط هوایی با تعداد n_A عضو می‌باشد، که در آن $CP_{ia}=(X_{ia},Y_{ia},Z_{ia})$ می‌باشد.

۲-۱-۲- استخراج ابرنقاط نمایان به هریک از موقعیت‌های کاندید استقرار از ابرنقاط هوائی

دستگاه *TLS* محیط سه‌بعدی پیرامون خود را با استفاده از ترکیبی از دوران‌های افقی و قائم، اسکن می‌کند. درنتیجه با استقرار *TLS* در یک نقطه، محدوده نمایان به ناظر مستقر در آن نقطه طی یک اسکن کامل توسط دستگاه اسکن می‌شود. با اتکا به این فرضیه، به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه میان هر کدام از اسکن‌های محلی اخذ شده توسط *TLS* با نواحی متناظر با آنها در ابرنقاط هوایی، محدوده رؤیت‌پذیر از هر کدام از موقعیت‌های کاندید استقرار از ابرنقاط هوائی استخراج شد. برای این منظور آنالیز خط دید[۱] بین هر موقعیت کاندید استقرار حاصل در بخش ۲-۱-۱ و سایرنقاط ابرنقاط هوایی، اجرا گردید. بدین ترتیب که چنانچه خط دید بین موقعیت کاندید استقرار و نقطه مورد آزمون توسط زمین و یا سایر عوارض روی سطح زمین قطع نشود، نقطه مورد نظر نمایان محسوب می‌شود و برعکس. به‌عبارت دقیق‌تر، چنانچه زاویه ارتفاعی بین نقاط A و B به فرم $\beta_{AB}=tg^{-1}((Z_B-Z_A)/d_{AB})$ تعریف شود، که در آن Z ارتفاع و d فاصله افقی است، نقاط A و B نسبت به هم نمایان هستند، اگر و تنها اگر خط دید AB هیچ موقعیت C دیگری را با زاویه ارتفاعی بزرگتر از β_{AB} قطع نکند. بر این اساس، در تحقیق حاضر نقاط نمایان به هر موقعیت کاندید استقرار مطابق گام‌های زیر از ابرنقاط هوایی استخراج گردیدند:

۱) ایجاد همسایگی کروی به شعاع R_{CP} و به مرکزیت موقعیت کاندید استقرار ia از مجموعه CP به مختصات $(X_{ia},Y_{ia},(Z_{ia}+h))$. (پارامتر h، ارتفاع دستگاه فرضی مستقر بر روی موقعیت کاندید استقرار است که به عنوان یک تقریب مطابق با شرایط واقعی برابر با ۲ متر در نظر گرفته شد).

۲) تولید یک *DSM*[۲] رستری با ابعاد سلولهای برابر با $0.15m\times0.15m$ برای هر همسایگی.

۳) انجام آنالیز خط دید بین نقطه ia و تمامی مراکز سلول‌های *DSM* تولید شده.

۴) تفکیک سلول‌های *DSM* به سلول‌های نمایان و غیرنمایان، بر اساس نتایج آنالیز خط دید.

۵) تشکیل ابرنقاط کاندید $CAPC_{ia}$ با استفاده از نقاط درون سلول‌های نمایان به نقطه کاندید استقرار CP_{ia}. مجموعه $CAPC=\{CAPC_{ia}, ia=1,2,\ldots,n_A\}$، شامل ابرهای‌نقاط هوایی کاندید متناظر با مجموعه موقعیت‌های کاندید استقرار در CP است، که در آن $CAPC_{ia}$ ابرنقاط نمایان به موقعیت کاندید استقرار CP_{ia} می‌باشد.

۲-۲- تولید نقشه-ویژگی از ابرهای‌نقاط زمینی و ابرهای‌نقاط هوایی کاندید

با استراتژی اتخاذ شده در تبدیل ابرنقاط هوایی سراسری به چندین ابرنقطه محلی، دو مجموعه داده زمینی و هوایی اگرچه به لحاظ وسعت و مقیاس محدوده قابل مقایسه‌اند، اما به دلیل زوایای دید کاملاً متفاوت و نامتجانس، دارای تفاوت‌های ساختاری زیادی هستند. در ابرنقاط زمینی سطوحی نظیر نماها که ساختاری قائم بر سطح زمین دارند با تراکم بالا نمونه برداری می‌شوند، در حالیکه از سطوحی نظیر سقف ساختمان‌ها اطلاعات چندانی قابل ثبت نیست. اما در ابرنقاط هوایی عکس این مساله رخ می‌دهد، سقف

۱ *Line Of Sight (LOS) analysis*

۲ *Digital Surface Model*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

ساختمان‌ها با تراکم و جزئیات بالا ثبت می‌شوند و از نماها اطلاعات چندانی ثبت نمی‌شود. از طرفی، الگوریتم‌های رایج برای مرتبط‌سازی ابرنقاط عمدتاً متکی به وجود مشابهت و همپوشانی نسبتاً زیادی بین دو مجموعه داده مورد مقایسه هستند. در مورد ابرنقاط حاصل از سکوهای زمینی و هوایی، دو مجموعه داده حاصل دارای همپوشانی کمی هستند، و همین همپوشانی کم نیز عمدتاً در سطوحی رخ می‌دهد که اختلاف تراکم شدیدی بین دو داده وجود دارد (مثلاً، بین سطوح نمای ساختمان‌ها در دو داده هوایی و زمینی اختلاف تراکم شدیدی وجود دارد). در نتیجه، با تأکید بر ساختارهای هندسی کلی مشابه در منظرهای زمینی و هوایی، به عنوان پیش‌درآمدی بر مرحله تناظریابی میان اسکن‌های زمینی با ابرهای‌نقاط هوایی کاندید، هدف این بخش تولید ارائه‌هایی با قیاس‌پذیری بالاتر از ابرنقاط در مجموعه‌های *TPC* و *CAPC* است. استخراج نقاطی که بیان‌کننده مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی موجود در ابرنقاط باشند، می‌تواند به عنوان یک راهکار برای این منظور قلمداد شود، چرا که علیرغم نامتجانس بودن داده‌های هوایی و زمینی، این دو از نقطه نظر ساختارهای هندسی کلی قابل مقایسه هستند. برای این منظور، ساختارهای شاخص نظیر انواع لبه‌ها (که عمدتاً در اثر شکست ارتفاعی رخ می‌دهند)، نواحی با بافت زبر، درختان و سایر المان‌های شهری از اهمیت بالاتری در مقایسه با سطوح هموار و فاقد هرگونه آنامولی هندسی برخوردارند. به همین منظور، چهار ویژگی هندسی مختلف طراحی و نقاط شاخص از منظر هر کدام از این ویژگی‌ها به عنوان ارائه‌ای از ساختار هندسی ابرنقاط مربوطه استخراج شد.

این چهار ویژگی هندسی شامل آنتروپی، شاخص هندسی (*GI*[1])، قائمی و اختلاف ارتفاع محلی هستند. شاخص آنتروپی نواحی حاوی بی‌نظمی نظیر درختان را با تأکید بیشتری نسبت به سایر ساختارهای هندسی استخراج می‌نماید. با استفاده از شاخص *GI*، پوشش گیاهی به عنوان بافت زبر و سطوح قائم نظیر نمای‌ساختمان‌ها به صورت تقریباً یکسانی در ساختار استخراجی از ابرنقاط مشارکت می‌کنند. در ویژگی قائمی، تمامی ساختارهای قائم بر صفحه *xoy* که به وفور در نواحی شهری یافت می‌شوند، بدون دخالت اختلاف ارتفاع آن‌ها از سطح زمین مورد تأکید قرار می‌گیرند. در ویژگی اختلاف ارتفاع محلی، ساختارهای کلی که معمولاً در نواحی دارای شکست ارتفاعی بزرگتر رخ می‌دهند و نسبت به پدیده‌های با اختلاف ارتفاع محلی کم از اهمیت بیشتری برخوردارند، با تأکید بیشتری استخراج می‌گردند. نقاط ویژه مرتبط با هر کدام از این چهار قید هندسی در قالب نقشه-ویژگی مربوطه تعریف می‌شوند. چهار نقشه-ویژگی مستخرج از هر کدام از ابرنقاط مجموعه‌های *TPC* و *CAPC* به ترتیب مجموعه‌های $TFM=\left\{(TFM_{it})_j,\ \begin{matrix} it=1,2,\ldots,n_T \\ j=1,2,3,4 \end{matrix}\right\}$ و $AFM=\left\{(AFM_{ia})_j,\ \begin{matrix} ia=1,2,\ldots,n_A \\ j=1,2,3,4 \end{matrix}\right\}$ را ایجاد می‌کنند. در این ارتباط، $(TFM_{it})_j$ و $(AFM_{ia})_j$ به‌ترتیب نماینده نقشه-ویژگی‌های j-ام از ابرنقاط زمینی it-ام و ابرنقاط هوایی کاندید ia-ام می‌باشند. در ادامه جزئیات این چهار ویژگی هندسی، آورده شده است.

- ویژگی آنتروپی

آنتروپی به عنوان یکی از ویژگی‌های هندسی ماتریس کواریانس، از اهمیت بالایی در بین ویژگی‌های هندسی کواریانس محلی برخوردار است. مطالعات جامعی در خصوص کاربرد ویژگی‌های هندسی کواریانس محلی در تحقیقات چهاتا و همکاران (۲۰۰۹) و مالت و همکاران (۲۰۱۱) به‌انجام رسیده است. شانو ن[2] رابطه

۱ *Geometric Index*

۲ *Shannon*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

$H(p)=\sum_{i=1}^{n}P(x_i)\log(P(x_i))$ را جهت بیان مفهوم آنتروپی در خصوص متغیر تصادفی وگسسته $X=\{x_i, i=1,2,\ldots,n\}$ ارائه نمود، که در آن احتمال رخداد هر x_i برابر است با $P(x_i)$ [۲۵]. از آنجاییکه مقادیر ویژه ماتریس کواریانس یک همسایگی از ابرنقاط، متناظر با اجزاء اصلی بیضوی سه‌بعدی کواریانس آن همسایگی می‌باشد، در تحقیق حاضر آنتروپی شانون، با رابطه (۱) تعریف گردید:

$$E_\lambda=-e_1\log(e_1)-e_2\log(e_2)-e_3\log(e_3) \quad \text{رابطه(۱)}$$

در رابطه (۱)، e_1, e_2 و e_3 مقادیر ویژه نرمال‌شده متناظر با λ_1, λ_2 و λ_3 می‌باشند. با نرمال کردن مقادیر ویژه در بازه [۰،۱]، e_i احتمال رخداد λ_i است. این معیار، نواحی یکنواخت و منظم را از نواحی حاوی بی‌نظمی تفکیک می‌کند. ویژگی آنتروپی برای هر نقطه با استفاده از رابطه (۱) و با تعریف یک فضای همسایگی با k_{GT} و k_{GA} نزدیکترین نقطه در به ترتیب ابرنقاط زمینی و هوایی، محاسبه گردید. نقاطی که از نظر معیار آنتروپی دارای ارزش نسبی چشمگیری هستند، با استفاده از یک حدآستانه محاسباتی (th_E) از سایر نقاط تفکیک گردیدند. شکل (۲-الف) و (۲-ب)، نتایج محاسبه معیار آنتروپی را به ترتیب برای ابرنقاط زمینی و ابرنقاط هوایی کاندید نمونه نمایش می‌دهد.

- ویژگی شاخص هندسی (GI)

ویژگی GI که برای اولین بار در تحقیق [۲۶] جهت شناسایی نقاط نمای ساختمان‌ها در ابرنقاط، ارائه گردید، یک ابزار قدرتمند در طبقه‌بندی ابرنقاط محسوب می‌شود. این شاخص مبتنی بر دو پارامتر زبری[۱] و بردار نرمال نقاط، می‌باشد (رابطه(۲)).

$$GI_i=\frac{|n_{xi}|+|n_{yi}|-|n_{zi}|}{|n_{xi}|+|n_{yi}|+|n_{zi}|}\times\frac{1}{e^{Ri}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۱ *Roughness*

در رابطه (۲)، (n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}) و R_i به ترتیب بردار نرمال و زبری محاسبه شده برای نقطه i هستند. جمله اول رابطه (۲) وابسته به بردار نرمال نقاط بوده و برای سطوح قائم نظیر نماها، مقداری بزرگتر از سطوح افقی نظیر زمین و سطوح معابر، اختیار می‌کند و در مورد عوارضی نظیر درخت که بردار نرمال نقاط مربوط به آن‌ها رفتار نامنظمی دارند، متناسب با آن رفتار نامنظمی نشان می‌دهد. جمله دوم نیز از ویژگی زبری جهت تقویت جدایی بین سطوح هموار (صرفنظر از قائم یا افقی بودن) از سطوح با زبری بالا استفاده می‌کند که تابع نمایی[۲] پارامتر زبری را در ویژگی GI تقویت می‌نماید. جمله دوم برای سطوح هموار مقداری نزدیک به یک اختیار کرده و هرچه زبری سطح بیشتر شود مقدار آن به صفر نزدیکتر خواهد شد و در نتیجه این جمله برای سطوح زبر نقشی کاهشی در ویژگی GI ایفا می‌کند.

در تحقیق حاضر به منظور محاسبه بردار نرمال برای هر نقطه در ابرهای نقاط مجموعه‌های $CAPC$ و TPC، مشابه بخش قبلی، ابتدا یک فضای همسایگی برای هر نقطه ایجاد گردید. همچنین ویژگی زبری هر نقطه، برابر با فاصله بین آن نقطه با صفحه برازش یافته به نقاط همسایه آن در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از حدآستانه محاسباتی th_{GI}، نقاط ویژه GI از سایر نقاط جداسازی گردیدند. شکل (۳-الف) و (۳-ب)، نتایج محاسبه معیار GI را به ترتیب برای ابرنقاط زمینی و ابرنقاط هوایی کاندید نمونه نشان می‌دهد.

- ویژگی قائمی[۳]

در ابرنقاط هوایی زمین‌مرجع، عمده سطوح دیوار و نمای ساختمان‌هابه صورت قائم بر صفحه xoy نگاشت می‌شوند. از طرف دیگر، در اخذ داده‌های زمینی،

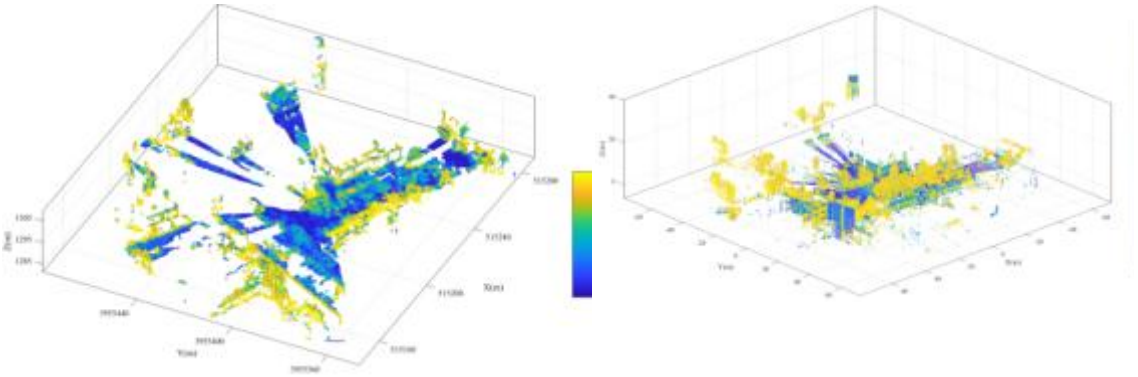
۲ *Exponential*

۳ *Verticality*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

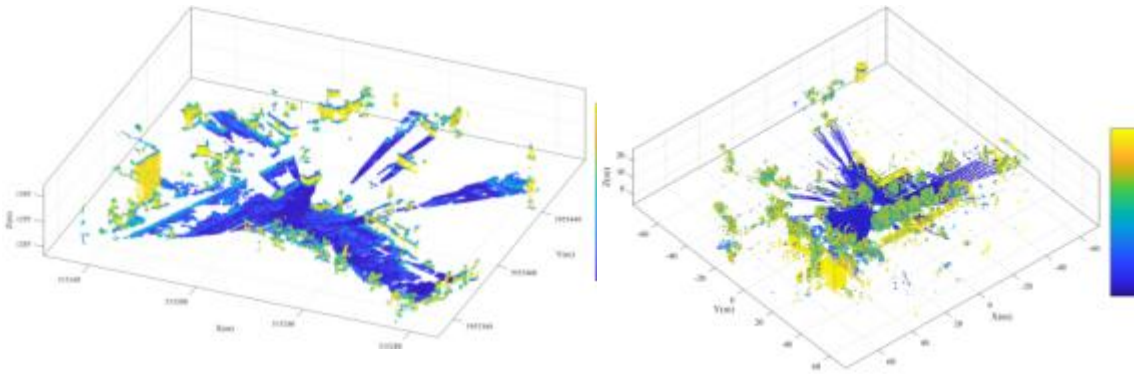
معمولاً لیزراسکنر با استفاده از تجهیزات جانبی تراز، در میدان ثقل زمین قرار گرفته و داده‌های بدون تیلت اخذ می‌کند؛ و یا در صورت عدم تجهیز دستگاه به تراز، تیلت جزئی ناشی از انحراف محور Z دستگاه از راستای شاقولی را می‌توان با استفاده از روش‌های ساده مبتنی بر تبدیل PCA، نظیر آنچه که در تحقیق [۲۷] ارائه شد، تصحیح نمود. به هر صورت، ما در تحقیق حاضر فرضیه ابرنقاط زمینی بدون تیلت را دنبال می‌کنیم. به منظور شناسایی نقاط ویژه قائم، با تکیه بر مؤلفه ارتفاعی بردار نرمال نقاط، مطابق رابطه (۳) نقاطی که بزرگی مولفه n_z آنها کوچکتر از یک حدآستانه از پیش تعریف‌شده (th_{nz}) باشد، به عنوان نقاط ویژه قائم در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۴-الف) و (۴-ب)، نتایج محاسبه معیار قائمی را به ترتیب برای یک نمونه ابرنقطه زمینی و ابرنقطه هوایی کاندید نمایش می‌دهند.

رابطه(۳)
$$|n_z| < th_{nz}$$



(الف) (ب)

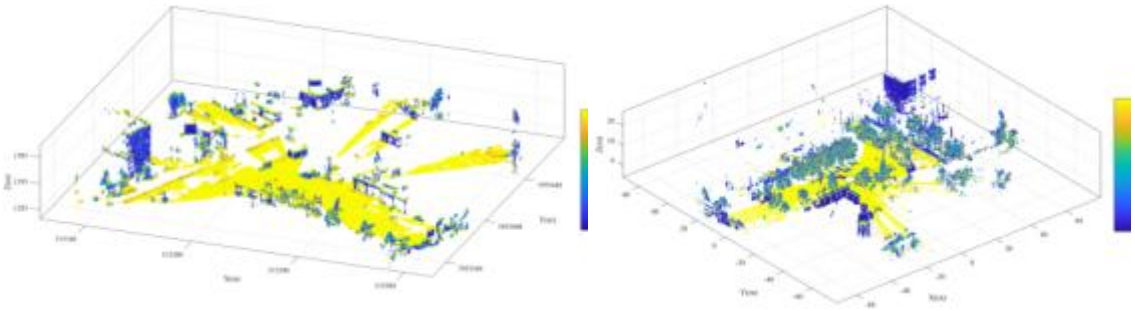
شکل۲: نمایش محاسبه معیار آنتروپی برای نقاط مربوط به (الف) ابرنقاط زمینی نمونه (ب) ابرنقاط هوایی کاندید نمونه



(الف) (ب)

شکل۳: نمایش محاسبه معیار GI برای نقاط مربوط به (الف) ابرنقاط زمینی نمونه (ب) ابرنقاط هوایی کاندید نمونه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

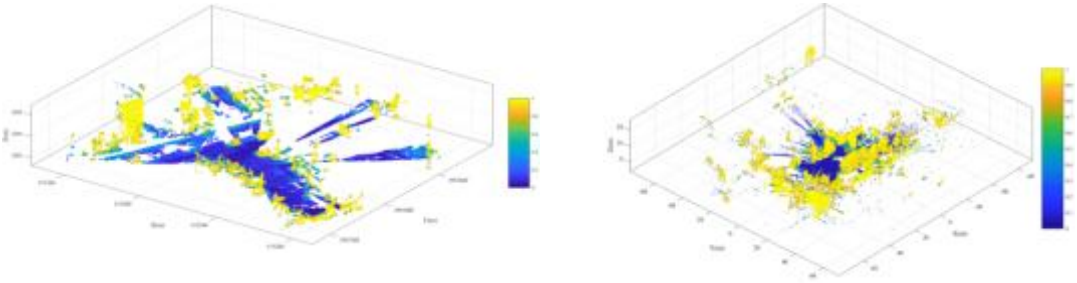


(ب) (الف)

شکل۴: نمایش محاسبه معیار قائمی برای نقاط مربوط به (الف) ابرنقاط زمینی نمونه (ب) ابرنقاط هوایی کاندید نمونه

- ویژگی اختلاف ارتفاع محلی

اغلب ساختارهای شاخص موجود در ابرنقاط مناطق شهری معمولاً مربوط به مکان هندسی رخداد اختلاف ارتفاع‌های ناگهانی هستند. جهت شناسایی نقاط ویژه اختلاف ارتفاع محلی، برای هر نقطه یک همسایگی کروی به شعاع $R_{\Delta z}$ در نظر گرفته می‌شود. اختلاف ارتفاع مرکز همسایگی با سایر نقاط محاسبه و بیشینه مقدار اختلاف ارتفاع محاسبه شده در هر همسایگی، به عنوان ویژگی به آن نقطه منتسب می‌گردد. در نهایت نقاطی که بزرگی ویژگی اختلاف ارتفاع محلی آنها از حدآستانه $0.8R_{\Delta z}$ بزرگتر باشد، به عنوان نقاط ویژه محسوب می‌شوند. شکل (۵-الف) و (۵-ب)، نتایج محاسبه معیار اختلاف ارتفاع محلی را به ترتیب برای یک نمونه ابرنقطه زمینی و ابرنقطه هوایی کاندید نمایش می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل۵: نمایش محاسبه معیار اختلاف ارتفاع محلی برای نقاط مربوط به (الف) ابرنقاط زمینی نمونه (ب) ابرنقاط هوایی کاندید نمونه

۲-۳- تولید توصیفگر هیستوگرام گرادیان‌های جهت‌دار برای نقشه-ویژگی‌های زمینی و کاندید هوایی

با در نظر گرفتن چهار نقشه-ویژگی مستخرج از هر کدام از ابرنقاط مجموعه‌های *CAPC* و *TPC* به عنوان یک کلاس، در تحقیق حاضر مسأله تناظریابی میان اعضای این دو مجموعه در قالب یک مسأله طبقه‌بندی ساختاردهی شده است. هدف این بخش، تولید بردارهای توصیفگر برای هر یک از این نقشه-ویژگی‌ها می‌باشد. این توصیفگرها، جهت آموزش طبقه‌بندی-کننده[۱] و نهایتاً تناظریابی میان اعضای دو مجموعه *TPC* و *CAPC* مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱ *Classifier*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

با توجه به اینکه نقشه-ویژگی‌های تولیدشده برای هر ابرنقطه، بیانگر ساختارهای شاخص موجود در آن می‌باشد، استفاده از توصیفگر هیستوگرام گرادیان‌های جهت‌دار (*HOG*)[۱] که بر اساس توزیع گرادیان‌ها در نواحی مختلف تصویر، کل تصویر را توصیف می‌کند، می‌تواند انتخاب خوبی جهت توصیف نقشه-ویژگی‌های مستخرج از هر ابرنقطه قلمداد شود. توصیفگر *HOG* برای اولین بار در تحقیق [۲۸] ارائه گردید. این توصیفگر تصویر ورودی را در دو سطح مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. مجموعه $m_1 \times n_1$ پیکسل مجاور در تصویر، تشکیل یک سلول *HOG* را می‌دهند و مجموعه $m_2 \times n_2$ سلول مجاور نیز تشکیل یک بلوک *HOG* را می‌دهند. در هر سلول هیستوگرامی از گرادیان‌های محاسبه شده برای پیکسل‌های درون آن سلول تولید می‌شود و هیستوگرام مربوط به هر بلوک از تلفیق هیستوگرام‌های سلول‌های درون آن ایجاد می‌شود. بدین ترتیب، با تلفیق اطلاعات گرادیان بخش‌های مختلف تصویر، یک توصیفگر برای کل تصویر ساخته می‌شود. توصیفگر *HOG* علیرغم قدرت تفکیک‌پذیری بالایی که در توصیف تصاویر دارد، نسبت به دوران حساس است و با دوران تصویر ورودی دستخوش تغییر می‌گردد. این مسأله از آن جهت حائز اهمیت است که، ابرهای نقاط زمینی و هوایی متناظر دارای دوران در صفحه نامشخصی نسبت به یکدیگر هستند. بنابراین، ارائه توصیفی مستقل از دوران برای آن‌ها ضروری است. نسخه مبتنی بر تبدیل فوریه از توصیفگر *HOG* (*F-HOG*) در تحقیق[۲۹] ارائه و در کاربردهای مختلف حیطه سنجش‌ازدور و ماشین‌بینایی مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰]. در توصیفگر *F-HOG* به جای استفاده از یک شبکه گسسته از سلول‌ها و بلوک‌ها و محاسبه گرادیان‌های تصویر در قالب آنها، از توابع پایه فوریه که توابعی پیوسته هستند، با منطقی مشابه سلول‌ها در *HOG* استاندارد استفاده شده است. ویژگی مهم توصیفگر *F-HOG* مستقل بودن آن از دوران است. این ویژگی در توصیفگر *F-HOG*، از رفتار دورانی ساده و مطلوب توابع فوریه حاصل می‌شود. در ادامه بخش‌های کلیدی الگوریتم *F-HOG* آورده شده است.

۲-۳-۱- توصیفگر مستقل از دوران *F-HOG*

در الگوریتم *F-HOG* جهت تولید توصیفگری مستقل از دوران از تصویر ورودی I، ابتدا ماتریسی از گرادیان‌های تصویر در قالب اعداد مختلط با استفاده از روش تفاضل محدود[۲]، ساخته می‌شود. چنانچه گرادیان محاسبه شده برای پیکسل (x,y) از تصویر I برابر با $d=[d_x,d_y]^T \in \Re^2$ و توجیه آن برابر $\Phi(d)$ باشد، توزیع گرادیان‌های تصویر را می‌توان با استفاده از تابع دلتای دیراک[۳] به فرم رابطه (۴) نوشت:

$$h(\varphi) := \|d\|\delta(\varphi - \Phi(d)) \qquad \text{رابطه (۴)}$$

با استفاده از توابع پایه فوریه، تابع دلتای دیراک در رابطه (۴) را می‌توان به صورت پیوسته و متناسب با دوران ارائه نمود. ضرایب فوریه $\hat{f}_m$ تابع h را می‌توان به فرم رابطه (۵) نوشت:

$$\hat{f}_m = < h, e^{im\varphi} > = \|d\| e^{-im\varphi}, m \in Z \qquad \text{رابطه (۵)}$$

چنانچه $k_1 : R^2 \to R$ کرنل کانولوشن جهت تجمع مکانی[۴]، $k_2 : R^2 \to R$ کرنل کانولوشن جهت نرمال‌سازی محلی گرادیان‌های تصویر، D میدان گرادیان و $\hat{F}_m : R^2 \to C$ شامل ضرایب فوریه $\hat{f}_m$ محاسبه شده با تراکم بالا با استفاده از رابطه (۵) باشند، میدان گرادیان *F-HOG* با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است:

$$\tilde{F} = \frac{\hat{F}_m * k_1}{\sqrt{\|D\|^2 * k_2}} \qquad \text{رابطه (۶)}$$

۱ *Histogram of Oriented Gradients*

۲ *Finite Difference Method*

۳ *Dirac delta function*

۴ *spatial aggregation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

میدان گرادیان $\tilde{F}: R^2 \to C^M$ در رابطه (۶) دارای تمامی مزایای توصیفگر HOG استاندارد می‌باشد، به علاوه اینکه بر خلاف آن رفتارهای محلی گرادیان‌ها را با استفاده از یک تابع توزیع پیوسته بیان می‌کند. پارامتر M در میدان گرادیان $\tilde{F}_m$ تعیین‌کننده تعداد ضرایب فوریه مورد استفاده در تابع توزیع مربوطه می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در تحقیق [۲۹]، محدود کردن $|m| \le 4$ به عنوان مرتبه فرکانس بیشینه، اطلاعات کافی از میدان گرادیان را در اختیار خواهد گذاشت و معمولاً نیازی به ضرایب مرتبه بالاتر وجود ندارد. میدان $F\text{-}HOG$ تولید شده، همانند سلول‌ها در الگوریتم HOG استاندارد، تنها تصویر را به صورت محلی می‌تواند توصیف نماید و جهت محاسبه توصیفگر ناحیه‌ای بایستی از توابع پایه فوریه به فرم $U_{j,k} = P(r)e^{im\varphi}$ که رفتار زاویه‌ای ساده و مطلوبی دارند، استفاده نمود (شکل (۶)).

ویژگی حاصل از کانولوشن تابع پایه فوریه $U_{j,k}$ با میدان $F\text{-}HOG$ ($\tilde{F}_m$)، می‌تواند به‌نحو مؤثری پیکربندی گرادیان‌ها را در ناحیه تحت پوشش $U_{j,k}$، توصیف نماید. مطابق رابطه (۷)، ویژگی $U_{j,k} * \tilde{F}_m$ دارای مرتبه دوران $k-m$ می‌باشد.

رابطه(۷)

$$X_{k,m} = U_{j,k} * \tilde{F}_m = \sum_{r,\varphi \in [0,2\pi)} P(r_j) e^{ik\varphi} \hat{f}_m$$

با توجه به رابطه (۷)، چنانچه تصویر اصلی دوران یابد، ضرایب فوریه بایستی بروزرسانی گردند. با توجه به ویژگی انتقال[۱] در تبدیل فوریه، ضرایب فوریه جدید برای تصویر دوران یافته به اندازه α را می‌توان با استفاده از ضرب یک فاکتور مختلط (وابسته به مرتبه ضرایب و زاویه دوران) در ضرایب فوریه تصویر اصلی محاسبه نمود (رابطه (۸)).

رابطه(۸)

$$\begin{aligned} X'_{k,m} &= U_{j,k} * \tilde{F}'_m \\ &= \sum_{r,\varphi} P(r_j) e^{ik\varphi} \hat{f}'_m \\ &= \sum_{r,\varphi} P(r_j) e^{ik\varphi} \hat{f}_m e^{-im\alpha} \end{aligned}$$

در رابطه (۸) چنانچه $k = m$ باشد، رابطه (۹) حاصل می‌شود:

رابطه (۹)

$$X'_{k,m} = \sum_{r,\varphi} P(r_j) \hat{f}_m e^{ik(\varphi-\alpha)}$$

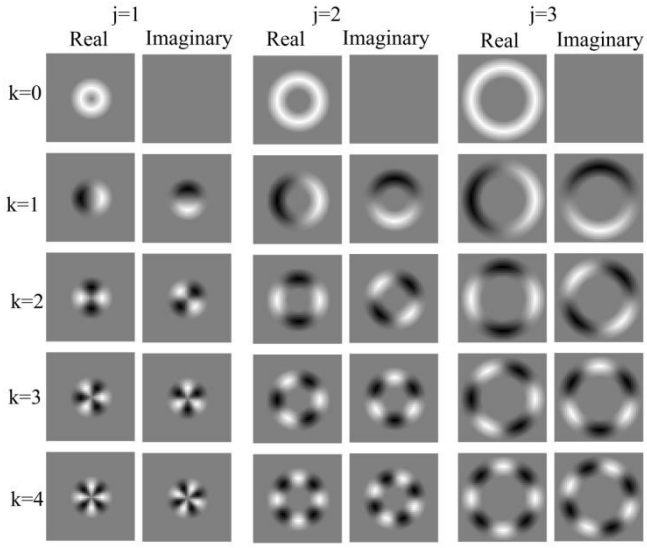
رابطه (۹) پس از دوران تصویر اصلی به اندازه α و تحت شرایط $k = m$ بدست آمده است. به علت پریودیک بودن تابع پایه $U_{j,k}$، در رابطه (۹) چنانچه $k = m$ باشد، ویژگی مستقل از دوران $F\text{-}HOG$ تولید خواهد شد. همچنین تعداد زیادی ویژگی مستقل از دوران دیگر نیز با استفاده از ضرب دو توصیفگر $X_{k1,m1}$ و $X_{k2,m2}$ تحت شرایط $\forall\ k_1 - m_1 = k_2 - m_2$، قابل محاسبه می‌باشد (رابطه (۱۰)).

رابطه(۱۰)

$$X_{k1,m1} X_{k2,m2} = (U_{j1,k1} * \tilde{F}_{m1})(U_{j2,k2} * \tilde{F}_{m2})$$

۱ *Shift*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]



شکل ۶: توابع پایه $U_{j,k} = P(r)e^{im\varphi}$ مورد استفاده جهت توصیف ناحیه‌ای

چهار توصیفگر مستخرج از هر کدام از نقشه-ویژگی-های مجموعه‌های *TFM* و *AFM* به ترتیب مجموعه-های $TFHOG = \left\{ (TFHOG_{it})_j, \begin{matrix} it = 1,2,\ldots,n_T \\ j = 1,2,3,4 \end{matrix} \right\}$ و $AFHOG = \left\{ (AFHOG_{ia})_j, \begin{matrix} ia = 1,2,\ldots,n_A \\ j = 1,2,3,4 \end{matrix} \right\}$ را ایجاد می‌کنند. $(TFHOG_{it})_j$ و $(AFHOG_{ia})_j$ به ترتیب نماینده توصیفگرهای j-ام از ابرنقاط زمینی it-ام و ابرنقاط هوایی کاندید ia-ام می‌باشند.

۲-۴- تناظریابی طبقه‌بندی‌مبنا میان ابرهای‌نقاط زمینی و ابرهای‌نقاط هوایی کاندید

در تحقیق حاضر، مسأله تناظریابی میان عناصر دو مجموعه *CAPC* و *TPC*، به عنوان یک مسأله طبقه-بندی نزدیکترین همسایه (*k-nn*)[۱] سازماندهی شده است. طبقه‌بندی *k-nn* به عنوان یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های آموزش ماشین[۲]، مطرح است که بر اساس نزدیکی داده‌های تست به نمونه‌های آموزشی در فضای ویژگی عمل می‌کند. مرحله آموزشی در طبقه‌بندی‌کننده *k-nn* تنها شامل اخذ بردار ویژگی نمونه‌های آموزشی و همچنین برچسب کلاس هر کدام از این نمونه‌ها می‌باشد. در مرحله طبقه‌بندی، به هر داده آزمون[۳] با رأی‌گیری از k نزدیکترین همسایه آن در فضای ویژگی نمونه‌های آموزشی، برچسب تخصیص می‌یابد [۳۱].

چهار بردار توصیفگر $AFHOG_{ia}$ متناظر با چهار نقشه-ویژگی مربوط به ia-امین ابرنقطه هوایی کاندید، به عنوان نمونه‌های آموزشی مربوط به کلاس ia-ام در نظر گرفته شدند. به منظور تناظریابی میان اعضای مجموعه‌های *CAPC* و *TPC*، هر یک از بردارهای توصیفگر $(TFHOG_{it})_j$ تولیدشده از نقشه-ویژگی‌های مستخرج از ابرنقاط زمینی، به عنوان یک داده آزمون در مرحله طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند. در نتیجه تخصیص برچسب به هر ابرنقطه زمینی، بر اساس رأی‌گیری توسط چهار توصیفگر مربوط به آن انجام می‌پذیرد. به منظور یافتن متناظر عضو it-ام از مجموعه

۱ *K Nearest Neighbor Classification*

۲ *Machine Learning*

۳ *Test data*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

TPC در بین اعضای مجموعه $CAPC$، فاصله هر چهار بردار توصیفگر $TFHOG_{it}$ با هر یک از بردارهای توصیفگر مجموعه $AFHOG$ (با تعداد $4n_A$ عضو) محاسبه گردید. بدین ترتیب برای عضو it-ام مجموعه TPC که خود دارای چهار توصیفگر مستقل می‌باشد، بردار فاصله‌ای به طول $16n_A$ تولید می‌گردد. این بردار مشتمل بر فواصل محاسبه شده بین هر کدام از چهار توصیفگر یک ابرنقطه زمینی با تمامی $4n_A$ توصیفگر تمامی ابرهای نقاط هوایی کاندید می‌باشد. برچسب-دهی به $TFHOG_{it}$، از طریق رأی‌گیری میان تعداد k نزدیکترین همسایه آن در بردار فاصله مربوطه، انجام می‌پذیرد. شبه‌کد مبین روش پیشنهادی تناظریابی میان اعضای مجموعه‌های $CAPC$ و TPC با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده k-nn در زیر آورده شده است.

Input: AFHOG, TFHOG, k, LA *//'k' is the parameter of k-nearest neighbor classification and 'LA' is the label set of CAPC point clouds//*

Output: $LT=\{LT_{it}, i=1,2,\ldots,n_T\}$ *// the label of the it-th member of the TPC is 'LT_{it}'//*

For $it=1$ to n_T do
For $j=1$ to 4 do
For each descriptor vector of AFHOG do // there are '4* n_A' descriptor vector in AFHOG//
Calculate '$d_{it}(AFHOG_i,(TFHOG_{it})_j)$' // *'d' is the distance operator and i=1 to* $4n_A$ //
End For
End For
Compute set 'I_{it}' containing LA indices of the '*k*' smallest distance 'd_{it}'
$L_{it} \leftarrow$ Return majority label for $\{LA_S,\ where\ s \in I_{it}\}$
End For

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش پس از معرفی مجموعه داده‌های مورد استفاده، چگونگی پیاده‌سازی هر کدام از مراحل تحقیق و نتایج این پیاده‌سازی‌ها ارائه گردیده است.

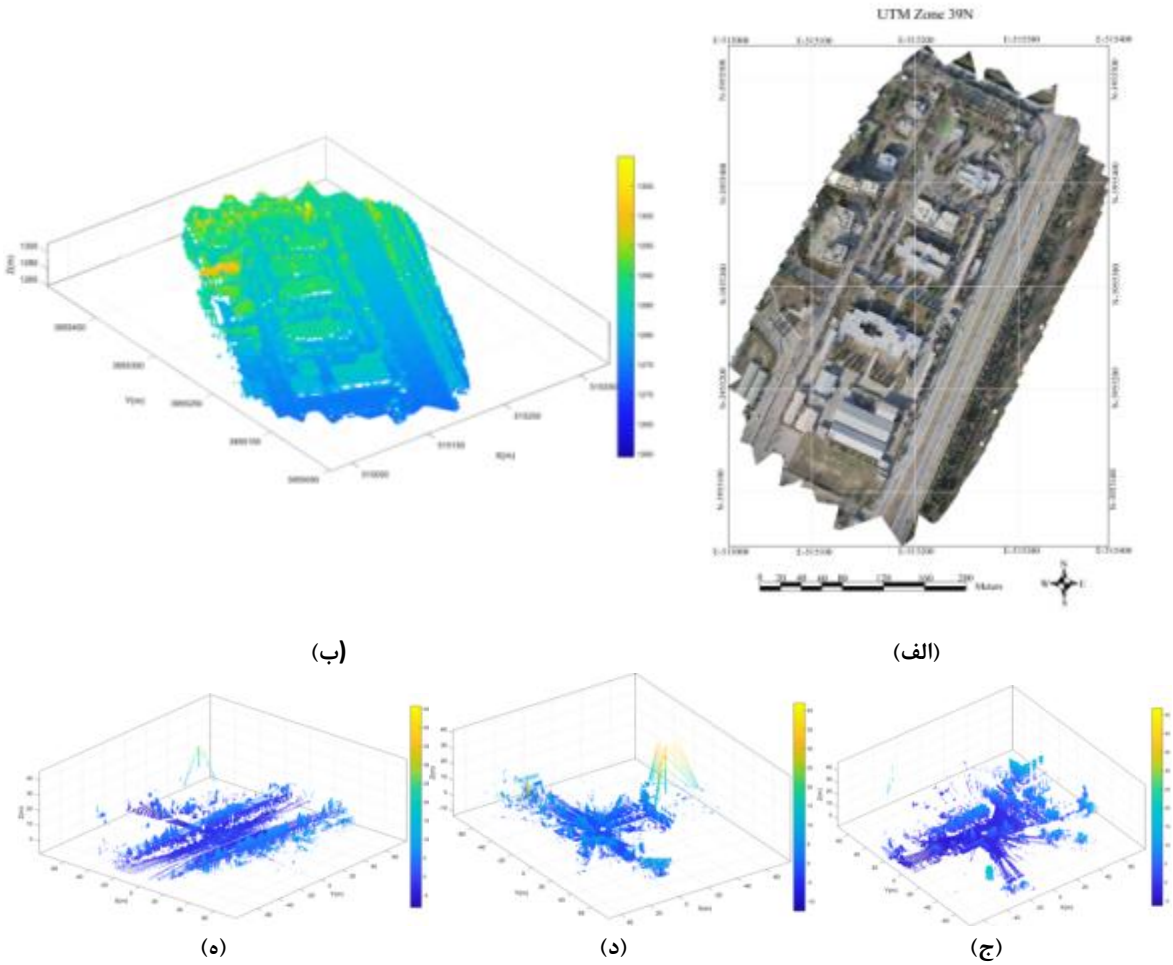
۳-۱- داده‌های مورد استفاده

یک منطقه متراکم شهری در حومه شهر کرج-ایران، به عنوان منطقه مطالعاتی جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی انتخاب شد. مجموعه‌داده اخذ شده از این منطقه شامل یک ابرنقطه هوایی تصویرمبنا و همچنین تعداد ۱۱ ابرنقطه زمینی لیزرمبنا در محدوده تحت پوشش بوسیله داده هوایی می‌باشد. یک پهپاد عمودپرواز مجهز به دوربین رقومی غیرمتریک *Canon EOS M3*، وظیفه اخذ تصاویر از منطقه مطالعاتی را برعهده داشت و برای تولید ابرنقاط از نرم‌افزار فتواسکن[۱] [۳۲] استفاده گردید. زمین‌مرجع سازی ابرنقاط هوایی در سیستم مختصات تصویر شده UTM[۲] با استفاده از تعداد ۱۴ نقطه کنترل با پراکندگی مناسب در منطقه، صورت پذیرفت. به‌منظور کاهش اثر نویز در ابرنقاط هوایی، برای هر نقطه یک همسایگی با تعداد ۱۵ نقطه تعریف شد. فاصله متوسط هر نقطه نسبت به نقاط همسایگی‌اش محاسبه گردید و نقاط با فواصل بیش از فاصله متوسط به علاوه دو برابر انحراف معیار، به عنوان نویز حذف گردیدند. تراکم ابرنقاط هوایی پس از حذف نویز برابر $86\,pts/m^2$ در بخش هموار زمینی برآورد گردید. ابرنقاط زمینی نیز توسط

۱ *Agisoft Photoscan*
۲ *Universal Transverse Mercator*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

لیزراسکنر *RIEGL LMS-Z420i* تولید شدند و از هیچ‌گونه داده‌کمکی و یا تجهیزات جانبی جهت زمین‌مرجع‌سازی آنها استفاده نگردید. حدتفکیک زاویه‌ای دستگاه لیزراسکنر برابر 0.024° تنظیم گردید. همچنین به منظور ساده‌سازی ساختار ابرهای نقاط زمینی، نقاط با فاصله بیشتر از ۸۰ متر نسبت به مرکز استقرار از هر اسکن حذف گردیدند. منطقه مطالعاتی و مجموعه داده‌های مورد استفاده در شکل(۷) نمایش داده شده است.



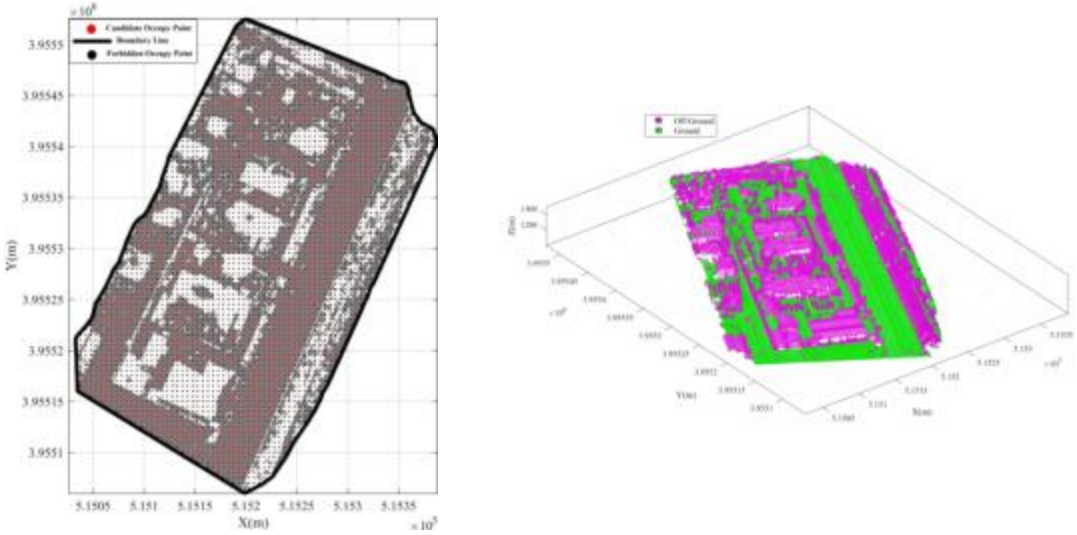
شکل ۷: مجموعه داده‌های مورد استفاده در تحقیق. الف) معرفی منطقه مطالعاتی. ب) ابرنقاط هوایی تصویرمبنا. ج)، د) و ه) ابرنقاط زمینی نمونه.

۳-۲- تولید ابرهای نقاط هوایی کاندید از ابرنقاط هوایی

موقعیت‌های کاندید استقرار از طریق تصویر کردن نقاط زمینی تفکیک‌شده از ابرنقاط هوایی در یک شبکه دو بعدی منظم با ابعاد $N_g \times N_g$، جستجو می‌گردند. ابعاد کوچکتر N_g، افزایش تعداد موقعیت‌های کاندید استقرار را در پی خواهد داشت که در مورد نقاط مجاور دارای تفکیک‌پذیری پایینی نسبت به هم هستند. ابعاد بزرگ آن نیز می‌تواند منجر به از دست دادن بخشی از نواحی گردد که امکان استقرار دستگاه لیزراسکنر در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

آنجا وجود دارد. به منظور بررسی اثر ابعاد N_g بر دقت جانمایی، پنج سطح مختلف از N_g (شامل: ۲/۵، ۳، ۴، ۵ و ۷ متر) در ارزیابی روش پیشنهادی به‌کار گرفته شد. شکل(۸) نتیجه تفکیک نقاط زمینی از غیرزمینی در ابرنقاط هوایی را نمایش می‌دهد (۸-الف). همچنین نتیجه شناسایی نقاط کاندید استقرار در شکل (۸-ب) نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۸: (الف) تفکیک نقاط زمینی و غیرزمینی در ابرنقاط هوایی، (ب) استخراج موقعیت‌های کاندید استقرار (N_g = 5m)

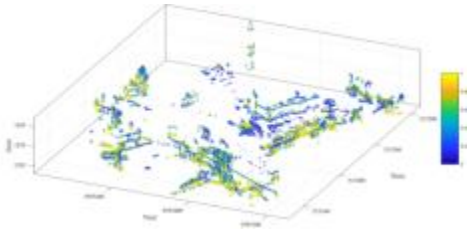
۳-۳- شناسایی ساختارهای عمده موجود در ابر نقاط زمینی و ابرنقاط هوایی کاندید

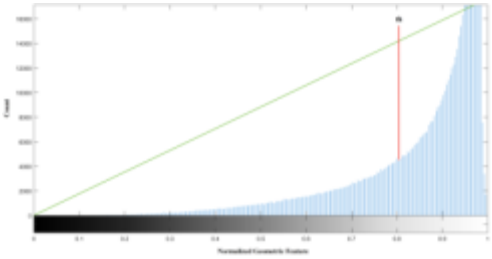
ویژگی‌های هندسی "آنتروپی"، "GI" و "قائمی" برای هر نقطه مبتنی بر تعریف یک فضای همسایگی با تعداد k_{GT} و k_{GA} نزدیکترین همسایه آن نقطه در به ترتیب ابرنقاط زمینی و ابرنقاط هوایی کاندید می‌باشد. این دو پارامتر در تناسب با تراکم ابرنقاط برابر ۱/۳ تراکم متوسط آنها در نظر گرفته شد. همسایگی مورد نظر در ویژگی "اختلاف ارتفاع محلی" از طریق تعریف یک کره به شعاع $R_{\Delta z}$ به مرکزیت هر نقطه ایجاد گردید. مقدار شعاع $R_{\Delta z}$ نقش مهمی در شناسایی نقاط ویژه توسط اختلاف ارتفاع محلی دارد. مقادیر بزرگ آن سبب شناسایی نقاط ویژه بیشتری برای نقطه مورد نظر می‌شود که البته می‌تواند شامل برخی نقاط زائد نیز گردد. مقادیر کوچک آن نیز سبب شود برخی ساختارهای مهم نظیر نماهای با تراکم پایین را در نقاط ویژه از دست بدهیم و به جای آن برخی ساختارهای کم‌اهمیت ناشی از اختلاف ارتفاع‌های کوچک را به عنوان نقاط ویژه شناسایی کنیم. در تحقیق حاضر، براساس آزمون‌های تجربی، مقدار $R_{\Delta z}$ برابر ۲ متر در نظر گرفته شد. نقاط متمایز از دیدگاه ویژگی‌های هندسی "آنتروپی" و "GI" به ترتیب با استفاده از حدآستانه‌های هیستوگرام‌مبنای th_E و th_{GI} از سایر نقاط تفکیک می‌گردند. این حدآستانه‌ها، متناسب با هر کدام از ابرنقاط ورودی، با اعمال روش ساده مثلثی[۱] بر روی هیستوگرام فراوانی مقادیر ویژگی مربوطه محاسبه می‌گردند. روش مثلثی برای اولین بار در محاسبه حدآستانه از هیستوگرام تصاویر در تحقیق [۳۳] ارائه شد. در این روش، خطی

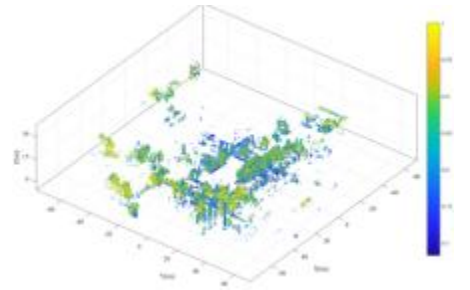
۱ *Triangle Method*

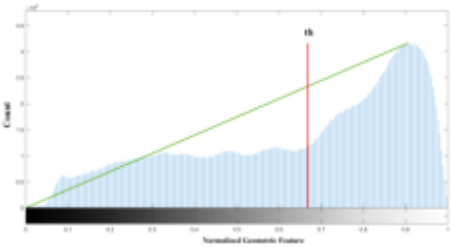
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

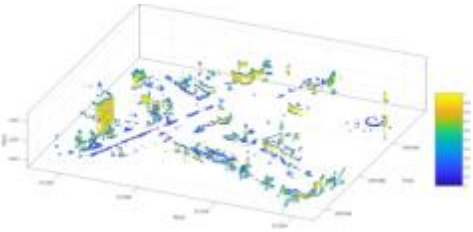
بین نقطه بیشینه (قله) و دورترین نقطه ابتدا یا انتهای هیستوگرام ترسیم می‌گردد و نقطه‌ای از هیستوگرام با بیشترین فاصله از خط ترسیم‌شده، به عنوان حدآستانه در نظر گرفته می‌شود. حدآستانه th_{nz} در تفکیک نقاط ویژه"قائمی"، تعیین‌کننده حد قابل قبول برای قائم‌بودن صفحه محلی حاوی هر نقطه می‌باشد. مقادیر بزرگ th_{nz} سبب مشارکت تعداد بیشتری نقطه به عنوان ویژه قائم می‌شود که شامل برخی نقاط زائد نیز می‌گردد. تنظیم مقادیر کوچک برای آن نیز سبب عدم شناسایی کامل نقاط ویژه قائم می‌شود. جهت تنظیم این دو حدآستانه، از هر دو مجموعه ابرنقاط به صورت تصادفی تعداد ۱۰ نقطه واقع بر نما انتخاب و بزرگترین n_z مربوط به این نقاط به عنوان حدآستانه در نظر گرفته شد ($th_{nz} = 0.06$ برای ابرنقاط مجموعه $CAPC$ و $th_{nz} = 0.03$ برای ابرنقاط مجموعه TPC). این تفاوت در مقدار حدآستانه برآورد شده برای مجموعه‌های $CAPC$ و TPC را می‌توان در چارچوب تفاوت‌های هندسی ابرنقاط تصویرمبنا و لیزرمبنا، تفسیر نمود. حدآستانه جداکننده نقاط ویژه "اختلاف ارتفاع محلی"، به صورت تجربی برابر $0.7R_{\Delta z}$ تنظیم گردید که $R_{\Delta z}$ شعاع همسایگی کروی در محاسبه اختلاف ارتفاع محلی می‌باشد. شکل(۹)، نتایج تفکیک نقاط ویژه آنتروپی و GI را برای یک نمونه ابرنقاط زمینی و هوایی کاندید به همراه هیستوگرام مربوطه نمایش می‌دهد.

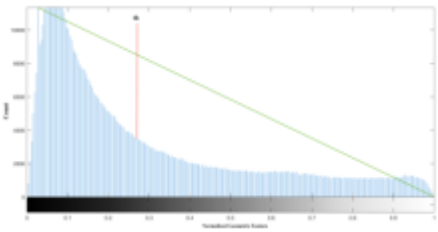

(الف-۱)


(الف-۲)

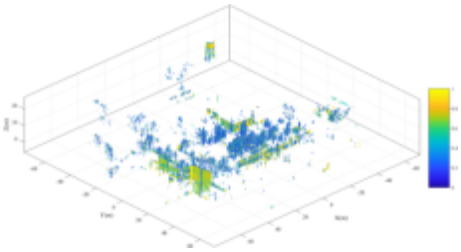

(ب-۱)


(ب-۲)

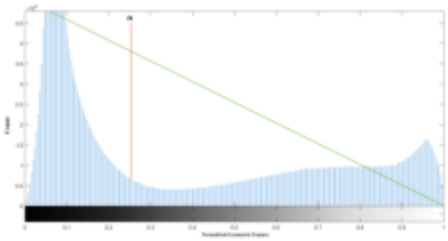

(ج-۱)


(ج-۲)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]



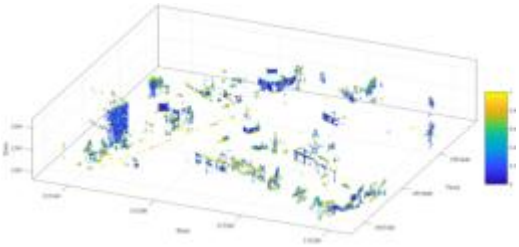
(د-۱)



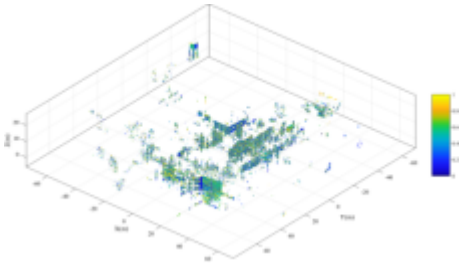
(د-۲)

شکل ۹: نقاط ویژه آنتروپی (الف-۱) و (ب-۱) و حدآستانه تفکیک‌کننده آنها از سایر نقاط (الف-۲) و (ب-۲) در به ترتیب ابرنقاط هوایی و زمینی نمونه. نقاط ویژه GI (ج-۱) و (د-۱) و حدآستانه تفکیک‌کننده آنها از سایر نقاط (ج-۲) و (د-۲) در به ترتیب ابرنقاط هوایی و زمینی نمونه.

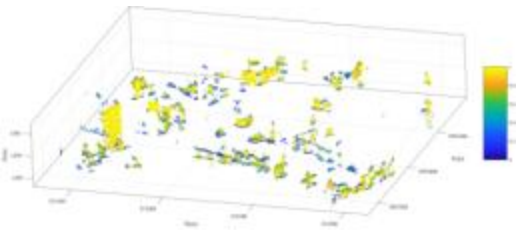
با استفاده از معیار آنتروپی، نقاط حائز مقدار ویژگی کوچکتر از حدآستانه محاسباتی هیستوگرام‌های مربوطه (شکل ۹ (الف-۲ و ب-۲)) از مجموعه نقاط حذف و سایر نقاط به عنوان نقاط ویژه آنتروپی در ساخت نقشه-ویژگی آنتروپی مشارکت می‌کنند (شکل ۹ (الف-۱ و ب-۱)). همچنین با استفاده از معیار *GI*، نقاط حائز مقدار ویژگی بزرگتر از حدآستانه محاسباتی هیستوگرام‌های مربوطه (شکل ۹ (ج-۲ و د-۲)) از مجموعه نقاط حذف و باقی نقاط به عنوان نقاط ویژه *GI*، نقشه-ویژگی *GI* را می‌سازند (شکل ۹ (ج-۱ و د-۱)). شکل ۱۰ نیز نتایج تفکیک نقاط ویژه از ابرنقاط زمینی و هوایی کاندید نمونه را با استفاده از دو ویژگی قائمی (شکل‌های ۱۰ (الف-۱ و الف-۲)) و اختلاف ارتفاع محلی (شکل‌های ۱۰ (ب-۱ و ب-۲)) نمایش می‌دهد.



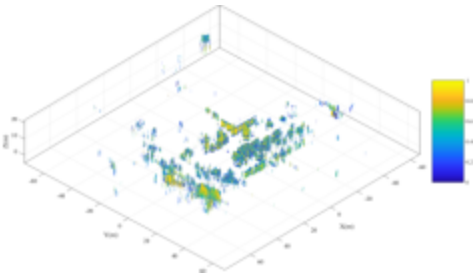
(الف-۱)



(الف-۲)



(ب-۱)



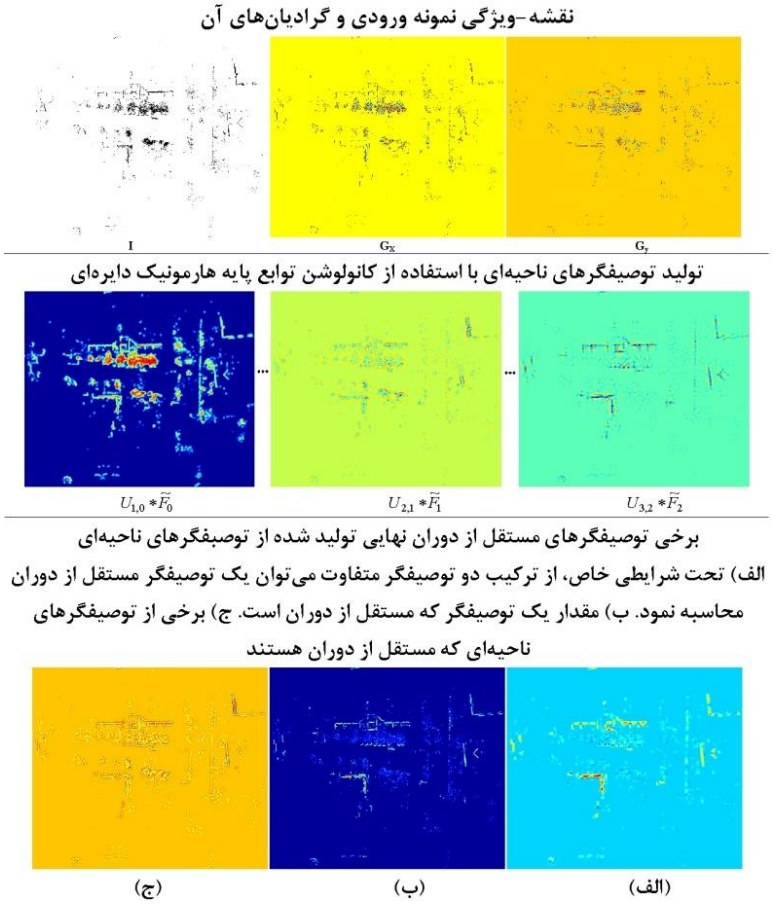
(ب-۲)

شکل ۱۰: نقاط ویژه قائمی مستخرج از ابرنقاط هوایی نمونه (الف-۱) و ابرنقاط زمینی نمونه (الف-۲). نقاط ویژه اختلاف ارتفاع محلی مستخرج از ابرنقاط هوایی نمونه (ب-۱) و ابرنقاط زمینی نمونه (ب-۲)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

۳-۴- توصیف نقشه-ویژگی‌های نماینده ابرنقاط با استفاده از توصیفگر مستقل از دوران *F-HOG*

جهت استخراج توصیفگر *F-HOG* از نقشه-ویژگی‌های تولیدشده برای هر ابرنقطه، از پنج مرتبه نخست ضرایب فوریه $\hat{f}_m$ استفاده گردید ($\hat{f}_m : m \in \{0,1,2,3,4\}$). همچنین، از مرتبه‌های سطح پایین در بازه $-4 \le k \le 4$، در توابع پایه $U_{j,k}$ استفاده گردید. بدین‌ترتیب، توصیفگر *F-HOG* برای هر نقشه-ویژگی با طولی برابر ۲۳۲ مقدار حقیقی تولید شد.



شکل ۱۱: فرآیند تولید توصیفگرهای F-HOG برای یک نقشه-ویژگی نمونه

شکل(۱۱) نمونه‌ای از فرآیند تولید توصیفگر *F-HOG* را که شامل: ابتدا تولید گرادیان‌های تصویر، سپس محاسبه $\tilde{F}_m$ از گرادیان‌های تصویر و استخراج ویژگی-های ناحیه‌ای از آن‌ها با استفاده از کانولوشن آن‌ها با توابع پایه هارمونیک دایره‌ای $U_{j,k}$ و نهایتاً تولید توصیفگر مستقل از دوران *F-HOG* از این ویژگی‌های ناحیه‌ای می‌باشد را برای یک نقشه‌ویژگی نمونه نمایش می‌دهد. در این شکل قسمت حقیقی سه نمونه از این توصیفگرهای ناحیه‌ای نمایش داده شده‌اند ($U_{1,0} * \tilde{F}_0$، $U_{2,1} * \tilde{F}_1$ و $U_{3,2} * \tilde{F}_2$) و از نمایش قسمت موهومی آنها صرفنظر شده است. در نهایت سه نوع مختلف از توصیفگرهای مستقل از دوران از بین آنها به عنوان توصیفگرهای *F-HOG* استخراج شده‌اند. در سه بخش شکل(۱۱) یعنی (الف، ب و ج) یک نمونه از هر سه نوع مختلف توصیفگر *F-HOG* نمایش داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

۳-۵- جانمائی ابرهای‌نقاط زمینی در ابرنقاط هوایی با استفاده از تناظریابی طبقه‌بندی مبنای ابرنقاط‌زمینی و ابرهای‌نقاط هوایی کاندید

در طبقه‌بندی به روش *k-nn*، پارامتر k تعیین می‌کند که چه تعداد نمونه آموزشی در تعیین برچسب هر داده آزمون دخالت داشته باشند. نوع فاصله d نیز در تعیین اینکه کدام k نمونه آموزشی در نزدیکترین فاصله نسبت به داده آزمون واقع شده‌اند، نقشی حیاتی دارد. برای هر کدام از ابرهای نقاط مجموعه *TPC*، چهار توصیفگر به عنوان داده‌های آزمون وجود دارد. از طرفی هر کلاس آموزشی منتسب به یک ابرنقطه از مجموعه *CAPC* نیز متشکل از چهار توصیفگر می‌باشد. بنابراین، جهت یافتن متناظر برای هر کدام از ابرهای نقاط *TPC* در مجموعه *CAPC*، چهار بار رأی‌گیری متناظر با چهار توصیفگر هر یک از ابرهای نقاط *TPC* (به عنوان داده-های آزمون)، قابل انجام است که در هر مرتبه حداکثر تعداد چهار همسایه صحیح به داده آزمون (چهار نمونه آموزشی موجود در هر کلاس) می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، پارامتر $k=4$ تنظیم گردید. فواصل در شکل(۱۲) معرفی شده است.

Distance	Equation
Euclidean	$d=\sqrt{(X_S-X_T)(X_S-X_T)'}$
City Block	$d=\sum_{j=1}^{n}\lvert X_{Sj}-X_{Tj}\rvert$
Chebychev	$d=\max_j\{\lvert X_{Sj}-X_{Tj}\rvert\}$
Cosine	$d=1-\frac{X_S X_T'}{\sqrt{(X_S X_S')(X_T X_T')}}$
Correlation	$d=1-\frac{(X_S-\bar{X}_S)(X_T-\bar{X}_T)'}{\sqrt{(X_S-\bar{X}_S)(X_S-\bar{X}_S)'}\sqrt{(X_T-\bar{X}_T)(X_T-\bar{X}_T)'}}$
Jaccard	$d=\frac{\#[(X_{Sj}\neq X_{Tj})\cap((X_{Sj}\neq 0)\cup(X_{Tj}\neq 0))]}{\#[(X_{Sj}\neq 0)\cup(X_{Tj}\neq 0)]}$
Hamming	$d=(\#(X_{Sj}\neq X_{Tj})/n)$
Spearman	$d=1-\frac{(r_S-\bar{r}_S)(r_T-\bar{r}_T)'}{\sqrt{(r_S-\bar{r}_S)(r_S-\bar{r}_S)'}\sqrt{(r_T-\bar{r}_T)(r_T-\bar{r}_T)'}}$ where r_{Sj} is the rank of X_{Sj} taken over $X_{1j}, X_{2j}, \ldots, X_{mj}$, and $\bar{r}_S=\frac{1}{n}\sum_j r_{Sj}=\frac{(n+1)}{2}$ and $\bar{r}_T=\frac{1}{n}\sum_j r_{Tj}=\frac{(n+1)}{2}$

شکل ۱۲: انواع فاصله مورد استفاده در طبقه‌بندی *k-nn* و روابط مربوطه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

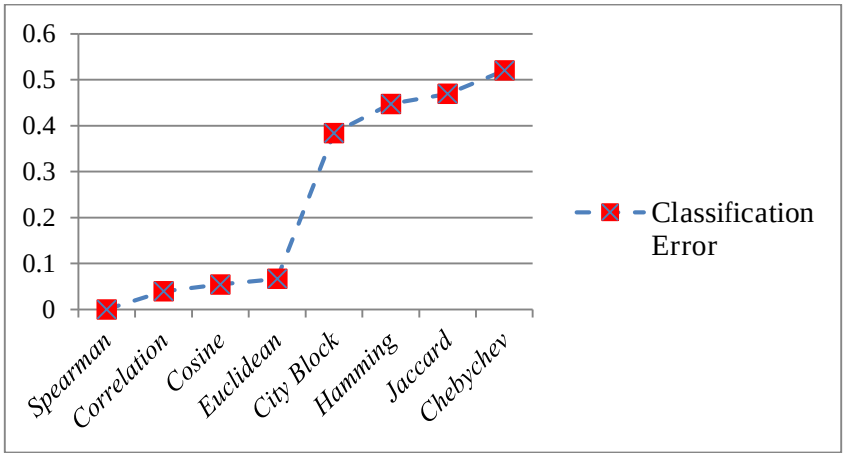
از بین فواصل معرفی‌شده در شکل(۱۲)، از روش اعتبارسنجی متقابل[۱] جهت تعیین نوع فاصله بهینه، استفاده گردید. بدین‌ترتیب که، هر کدام از کلاس‌های آموزشی به ۹۰٪ نمونه آموزشی و ۱۰٪ داده آزمون تفکیک گردید. آموزش طبقه‌بندی‌کننده *k-nn* با استفاده از نمونه‌های آموزشی انجام شد و از داده‌های آزمون جهت ارزیابی دقت طبقه‌بندی استفاده گردید. شکل(۱۳) نتایج مربوطه اعتبارسنجی متقابل در تعیین معیار فاصله بهینه را برای فواصل مورد استفاده نشان می‌دهد. مقایسه نتایج اعتبارسنجی هشت نوع فاصله مورد آزمون در تحقیق حاضر (شکل (۱۳))، نشان می‌دهد فاصله‌های *Spearman*، *Correlation* و *Cosine* از دقت طبقه‌بندی به مراتب بالاتری نسبت به سایر انواع فواصل مورد آزمون برخوردارند. در واقع این سه فاصله به لحاظ مفهومی دارای ساختارهای مشابه هستند و از بین آنها فاصله *Spearman* خطایی در حدود صفر را در اعتبارسنجی طبقه‌بندی دارد. درنتیجه، *spearman* به عنوان معیار فاصله بهینه انتخاب شد و در طبقه‌بندی *k-nn* تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

تناظریابی میان ابرهای‌نقاط زمینی با ابرهای‌نقاط هوایی کاندید را می‌توان به صورت غیرمستقیم معادل با برآورد موقعیت تقریبی مرکز هر یک از اسکن‌های زمینی در ابرنقاط هوایی دانست. در واقع در این مرحله از بین پارامترهای مرتبط‌سازی، سه پارامتر انتقال سه‌بعدی برای هر کدام از ابرهای نقاط زمینی، به صورت تقریبی و در محدوده قدرت تفکیک در نظر گرفته‌شده برای استخراج موقعیت‌های کاندید استقرار، برآورد می‌گردد. جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی جهت جانمایی ابرهای نقاط زمینی در ابرنقاط هوایی، مختصات مسطحاتی مراکز استقرار لیزراسکنر در تمامی ۱۱ ایستگاه استقرار لیزراسکنر تحقیق حاضر در سیستم مختصات مرجع اندازه‌گیری گردید. موقعیت‌های جانمایی بدست آمده برای هر کدام از ابرهای نقاط زمینی که مترتب بر یکی از نقاط کاندید استقرار می‌باشند، با موقعیت اندازه‌گیری شده برای مراکز استقرار لیزراسکنر مقایسه گردید. نتایج بیشینه، کمینه، متوسط و انحراف معیار اختلاف‌های محاسبه شده برای این ۱۱ استقرار، در پنج سطح مختلف گسسته‌سازی ابعاد N_g، در جدول(۱) آورده شده است نمایش موقعیت‌های جانمایی بدست آمده برای ۱۱ اسکن زمینی بر روی ابرنقاط هوایی در شکل(۱۴) نشان داده شده است.

نتایج مندرج در جدول (۱) بیانگر این است که دقت جانمایی ابرنقاط زمینی در ابرنقاط هوایی متناسب با قدرت تفکیک تعریف شده در مرحله شناسایی نقاط کاندید استقرار است. فاصله کمتر از چهار متر بین نقاط کاندید استقرار، در عمل تأثیر چندانی بر دقت جانمایی ندارد. در واقع در صورتی که بین دو نقطه کاندید استقرار مجاور، تفاوت در مناظر رؤیت‌پذیر محسوس نباشد در طبقه‌بندی نیز تفاوت چندانی بین آن دو وجود نخواهد داشت و امکان بروز خطای بیش از حد قدرت تفکیک استخراج نقاط کاندید استقرار از ابرنقاط هوایی وجود خواهد داشت. با توجه به اینکه هدف از جانمایی ابرهای‌نقاط زمینی در ابرنقاط هوایی، بدست آوردن محدوده مشترک بین دو داده و نهایتاً مرتبط‌سازی آنها با توجه به این محدوده مشترک می‌باشد، دقت‌های جانمایی بدست‌آمده در سطح گسسته‌سازی چهار متر، جهت ورود به فاز مرتبط‌سازی دو مجموعه داده، کافی به نظر می‌رسد.

۱ *Cross-validation*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]



شکل ۱۳: نتایج مقایسه میان دقت اعتبارسنجی متقابل در طبقه‌بندی به روش k-nn با استفاده از انواع فاصله

شکل ۱۴: نمایش موقعیت‌های جانمایی بدست آمده برای اسکن‌های زمینی در ابرنقاط هوایی

جدول ۱: نتایج اختلاف موقعیت مسطحاتی بین موقعیت‌های کاندید استقرار بدست آمده و مراکز اسکن‌های زمینی متناظر

N_g (m)	عدم انطباق مسطحاتی (متر)			
	بیشینه	کمینه	متوسط	انحراف معیار
۲٫۵	۵٫۸۱	۱٫۵۳	۳٫۳۰	۱٫۲۳
۳	۵٫۹۹	۱٫۷۷	۳٫۶۵	۱٫۱۷
۴	۶٫۱۲	۲٫۲۳	۴٫۲۹	۱٫۱۹
۵	۱۰٫۶۷	۳٫۳۱	۶٫۰۷	۱٫۹۵
۷	۱۴٫۳۶	۴٫۵۸	۷٫۵۱	۲٫۷۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نوین جهت جانمایی چندین اسکن زمینی در یک ابرنقطه سراسری و بزرگ‌مقیاس هوایی ارائه شده است. این مهم را می‌توان به عنوان یک گام اساسی در راستای تهیه یک پوشش کامل و متراکم از مناطق شهری، با تلفیق منظرهای زمینی و هوایی ارزیابی نمود. جایی که ابرنقاط حاصل از سکوهای هوایی و زمینی معمولاً از فقر اطلاعاتی در به ترتیب سطوح جانبی و سطوح فوقانی عوارض رنج می‌برند. در این راستا، روش‌های متداول اقدام به مرتبط‌سازی یک به یک دو ابرنقطه زمینی و هوایی می‌نمایند، در شرایطی که دو داده تقریباً هم‌وسعت هستند. چنین روندی در مورد مقیاس‌های وسیع که ابرنقاط زمینی از چندین ایستگاه و توسط چندین کاربر و بدون هر گونه محدودیتی از دیدگاه میزان همپوشانی، موقعیت مکانی و ارتباط میان ایستگاه‌های اخذ داده‌های زمینی جمع-آوری می‌شوند، نمی‌تواند کارآمد باشد. بنابراین، جانمایی ابرهای‌نقاط زمینی محلی و جزئی در ابرنقاط هوایی سراسری را می‌توان به عنوان یک راهکار مؤثر برای این موضوع قلمداد نمود.

برای این منظور، روش پیشنهادی مترتب بر تبدیل مسأله مقایسه چند با یک به مقایسه چند با چند می-باشد. در همین راستا روندی جهت ایجاد مجموعه‌ای از چندین ابرنقطه هوایی کاندید ارائه شد که متکی به شناسایی موقعیت‌هایی از ابرنقطه هوایی است که احتمال استقرار دستگاه لیزراسکنر در آنها وجود داشته باشد. پس از ساختاردهی مسأله در قالب یک مقایسه چند با چند، جانمایی ابرهای‌نقاط زمینی در ابرنقطه هوایی در قالب یک مسأله تناظریابی میان ابرهای نقاط زمینی با ابرهای نقاط هوایی کاندید، ساختاردهی شد. به منظور افزایش تجانس میان داده‌های زمینی و هوایی در روند تناظریابی، با استفاده از چهار ویژگی هندسی طراحی‌شده، نقشه-ویژگی‌هایی مبین ساختارهای شاخص برای هر ابرنقطه از دو مجموعه‌داده تولید گردید و سپس توصیفگرهای مستقل از دوران *F-HOG* از هر نقشه-ویژگی استخراج شدند. در ادامه، مسأله تناظریابی میان ابرهای نقاط زمینی با ابرهای نقاط هوایی کاندید، در قالب یک طبقه‌بندی *k-nn* در فضای توصیفگرهای *F-HOG* سازماندهی شد. در نهایت، طبقه‌بندی هر کدام از ابرهای‌نقاط زمینی در یکی از کلاس‌های متناظر با ابرهای‌نقاط هوایی کاندید، منجر به جانمایی هر ابرنقطه زمینی در یک موقعیت کاندید استقرار متناظر با آن کلاس گردید.

نکته حائز اهمیت در روش پیشنهادی تحقیق حاضر این است که تمامی مراحل پیش از طبقه‌بندی به صورت مستقل برای هر دو مجموعه داده اجرا می‌گردد. در نتیجه، امکان ایجاد کتابخانه‌ای مشتمل بر کلاس‌های مستخرج از ابرنقاط هوایی حتی پیش از اقدام به اخذ داده‌های زمینی نیز وجود دارد. همچنین روش پیشنهادی متکی به هیچ‌گونه اطلاعاتی در خصوص ارتباط میان هر کدام از ابرهای نقاط زمینی با یکدیگر نیست، بنابراین امکان جانمایی هر ابرنقطه زمینی با استفاده از کتابخانه ایجاد شده، وجود دارد. نتایج ارزیابی دقت روش پیشنهادی نشان داد که دقت جانمایی متناسب با قدرت تفکیک استخراج موقعیت-های کاندید استقرار در ابرنقاط هوایی متغیر است. بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته، با تنظیم قدرت تفکیک چهار متری دقت جانمایی در حدود پنج متر قابل دستیابی است. جانمایی ابرنقاط زمینی در ابرنقاط هوایی سراسری با چنین دقت‌هایی، جهت ورود به فرایند مرتبط‌سازی این دو مجموعه داده کافی به نظر می‌رسد. در واقع پس از جانمایی یک ابرنقطه زمینی محلی و کوچک‌مقیاس در ابرنقطه هوایی سراسری و بزرگ‌مقیاس، روندهای به خوبی مطالعه‌شده پیشین در خصوص مرتبط‌سازی ابرنقاط زمینی و هوایی، در مورد چنین داده‌هایی نیز قابل اجرا خواهند بود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

مراجع

[1] P. Musialski, P. Wonka, D.G. Aliaga, M. Wimmer, L. van Gool, and W. Purgathofer, "A Survey of Urban Reconstruction", Computer Graphics Forum, 32, 146–177, 2013.

[2] B. Yang, Y. Zang, Z. Dong, and R. Huang, "An automated method to register airborne and terrestrial laser scanning point clouds", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 109, 62-76, 2015.

[3] J. Lee, K. Yu, and A.F. Habib, "Adjustment of discrepancies between LIDAR data strips using linear features", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 4, 475–479, 2007.

[4] M. Favalli, A. Fornaciai, and M.T. Pareschi, "LIDAR strip adjustment: application to volcanic areas", Geomorphology, 2009.

[5] J.Y. Han, N.H. Perng, and H.J. Chen, "LiDAR point cloud registration by image detection technique", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10, 746–750, 2013.

[6] J. Skaloud, and D. Lichti, "Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 61 (1), 47–59, 2006.

[7] C. Brenner, C. Dold, and N. Ripperda, "Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments", ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 63 (1), 4–18, 2008.

[8] Z. Kang, J. Li, L. Zhang, Q. Zhao, and S. Zlatanova, "Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds using Panoramic Reflectance Images", Sensors, 9, 2621-2646, 2009.

[9] P. Theiler, and K. Schindler, "Automatic registration of terrestrial laser scanner point clouds using natural planar surfaces", ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39(3), 86–91, 2012.

[10] B. Yang, and Y. Zang, "Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 95, 109–121, 2014.

[11] P.J. Besl, and N.D. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence", Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 14 (2), 239–256, 1992.

[12] Y. Chen, and G. Medioni, "Object modelling by registration of multiple range images", Image and Vision Computing, 10 (3), 145–155, 1992.

[13] L. Cheng, L. Tong, M. Li, and Y. Liu, "Semi-Automatic Registration of Airborne and Terrestrial Laser Scanning Data Using Building Corner Matching with Boundaries as Reliability Check", Remote Sensing, 5, 6260-6283, 2013.

[14] L. Cheng, L. Tong, Y. Wu, Y. Chen, and M. Li, "Shiftable Leading Point Method for High Accuracy Registration of Airborne and Terrestrial LiDAR Data", Remote Sensing, 7, 1915-1936, 2015.

[15] M. Kedzierski, and A. Fryskowska, "Terrestrial and Aerial Laser Scanning Data Integration Using Wavelet Analysis for the Purpose of 3D Building Modeling", Sensors, 14, 12070-12092, 2014.

[16] A. Baghani, M.J. Valadan Zoej, and M. Mokhtarzade, " Automatic hierarchical registration of aerial and terrestrial image-based point clouds", European Journal of Remote Sensing, 51(1),436-456, 2018, DOI: 10.1080/22797254.2018.1444946

[17] H. Wu, M. Scaioni, H. Li, N. Li, M. Lu, and C. Liu, "Feature-constrained registration of building point clouds acquired by terrestrial and airborne laser scanners", Journal of Applied Remote Sensing, 8(1):083587(1)- 083587(22), 2014.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

[18] W. Von Hansen, H. Gross, and U. Thoennessen, "Line-based registration of terrestrial and airborne LiDAR data", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", 37, 161–166, 2008.

[19] L. Cheng, Y. Wu, L. Tong, Y. Chen, and M. Li, "Hierarchical Registration Method for Airborne and Vehicle LiDAR Point Cloud", Remote Sensing, 7, 13921-13944, 2015.

[20] T-A. Teo, and S-H, Huang, "Surface-Based Registration of Airborne and Terrestrial Mobile LiDAR Point Clouds", Remote Sensing, 6, 12686-12707, 2014.

[21] D. Novak, and K. Schindler, "Approximate registration of point clouds with large scale differences", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 5, 211–216, 2013.

[22] W. Zhang, J. Qi, P. Wan, H. Wang, D. Xie, X. Wang and G. Yan, "An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation", Remote Sensing, 8(6):501, 2016.

[23] N. Chehata, L. Guo, and C Mallet, "Airborne LiDAR feature selection for urban classification using random forests", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39 (Part 3/W8), 207–212, 2009.

[24] C. Mallet, F. Bretar, M. Roux, U. Soergel, and C. Heipke, "Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6), 71-84, 2011.

[25] C.E. Shannon, "Mathematical Theory of Communication", Bell System technical Journal, 27, 379–423, 1948.

[26] B. Rodríguez-Cuenca, S. García-Cortés, C. Ordóñez, and M.C. Alonso, "Automatic Detection and Classification of Pole-Like Objects in Urban Point Cloud Data Using an Anomaly Detection Algorithm", Remote Sensing, 7(10):12680-12703, 2015.

[27] P. Polewski, A. Erickson, W. Yao, N. Coops, P. Krzystek, and U. Stilla, " OBJECT-BASED COREGISTRATION OF TERRESTRIAL PHOTOGRAMMETRIC AND ALS POINT CLOUDS IN FORESTED AREAS", ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-3, 347-354, 2016.

[28] N. Dalal, B. Triggs, "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1(12), 886-893, 2005.

[29] K. Liu, H. Skibbe, T. Schmidt, T. Blein, K. Palme, T. Brox, and O. Ronneberger, "Rotation-Invariant HOG descriptors using Fourier analysis in polar and spherical coordinates," International Journal of Computer Vision, 106(3), 342-364, 2014.

[30] S. Ang, S. Xiaoliang, Z. Yueqiang, and Y. Qifeng, "Efficient rotation-invariant histogram of oriented gradient descriptors for car detection in satellite images", IET Computer Vision, 10(7), 634 – 640, 2016.

[31] N.S. Altman, "An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression". The American Statistician, 46 (3), 175–185, 1992.

[32] Agisoft PhotoScan. (2017). Retrieved June 27, 2017 from http://www.agisoft.com/

[33] G.W. Zhack, and S.A. Latt, "Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency", 25(7), 741-753, 1977.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.8 No.4, Winter 2021

Research Paper

A novel method for locating the local terrestrial laser scans in a global aerial point cloud

Amin Baghani [1*], Mohammad Javad Valadan Zoej [2], Mehdi Mokhtarzade [3]

1- Photogrammetry PhD Student in Faculty of Geodesy and Geomatics Eng. K.N. Toosi University of Technology
2- Professor in Faculty of Geodesy and Geomatics Eng. K.N. Toosi University of Technology
3- Associated Professor in Faculty of Geodesy and Geomatics Eng. K.N. Toosi University of Technology

Abstract

In addition to the heterogeneity of aerial and terrestrial views, the small scale terrestrial point clouds are hardly comparable with large scale and overhead aerial point clouds. A hierarchical method is proposed for automatic locating of terrestrial scans in aerial point cloud. The proposed method begins with detecting the candidate positions for the deployment of the terrestrial laser scanner in the aerial point cloud. After that, by simulating the performance of the laser scanner, the visible portion of the aerial point cloud is detected and it is extracted as the candidate deployment aerial point cloud. As a result, the problem of scan locating is converted to a corresponding one between several local terrestrial point clouds and several local aerial point clouds. In order to increase the comparability of these two datasets in the corresponding process, the main geometric structures of each point cloud are extracted using four predesigned geometric feature indexes, and they are organized in the form of four feature-maps of each point cloud. The feature-maps generated for each point cloud are described by the rotation invariant Fourier-HOG descriptor. Afterward, the corresponding problem is structured in the form of a k-nn classification among the classes established for these descriptors. Finally, the location of each terrestrial scan is obtained based on the classification results. The evaluation results of the proposed method on an urban dataset, showed an average accuracy of about 5 meters for locating the terrestrial scans in aerial point cloud. The obtained accuracies seem to be sufficient to enter the process of registering the terrestrial scans to the aerial point cloud.

Key words: *point cloud, Registration, Classification, Corresponding, Laser scanner, UAV Photogrammetry.*

Correspondence Address *: The Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Mirdamad Blvd, Tehran, Iran.*
Tel *: 09126115940*
Email*: amin_baghani@mail.kntu.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-07-02]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1399.8.4.1.7]
[DOI: 10.52547/jgit.8.4.1]