

هم مرجع سازی دقیق باند به باند تصاویر چند طیفی هوایی بر اساس کاهش خطای عدم انطباق باندها حاصل از جابه جایی ارتفاعی

محمد حسن پور^۱، فرزانه دادرسی جوان^۲، فرهاد صمدزادگان^۲ و نیما زرین پنجه^۲

چکیده

با گسترش بهیادها در کاربردهای کشاورزی، دوربین های چند طیفی جدید به گونه ای در ابعاد کوچک طراحی شدند تا بر روی این سکوها قابل نصب باشند. این دوربین ها دارای ساختار چند عدسی می باشند که هر عدسی مربوط به یک بخش از طیف الکترومغناطیس است. به دلیل ساختار نوری (اپتیک) این دسته از دوربین ها و نحوه ی چیدمان عدسی های آن ها، در پردازش داده های به دست آمده از آن ها، چالش عدم انطباق باندهای تصویر چند طیفی مطرح هست. این عدم انطباق به ویژه در مناطق با اختلاف ارتفاع زیاد و فاصله تصویربرداری کم، بیشتر بوده که در کاربردهایی چون تحلیل سلامت گیاهان و پایش آفت ها غیر قابل چشم پوشی است. چراکه در ارتفاع پرواز پایین، جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع برای یک عارضه در عدسی های مختلف از دوربین چند طیفی، یکسان نبوده و این عدم یکنواختی جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع دچار خطای عدم انطباق در باندها می شود که در کاربردهای پایش آفات و سلامت گیاهان بسیار با اهمیت می باشد. هدف از این مطالعه ارائه یک روش هم مرجع سازی مبتنی بر فضای تصویر به منظور کاهش اثر خطای جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع بر عدم انطباق باندها است. به همین منظور، سه داده متفاوت که شامل عوارض با اختلاف ارتفاع های متفاوت بوده در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل نشان از مقابله ۸۳ درصدی با خطای مذکور در هم مرجع سازی باندهای تصویری بر اساس روش پیشنهاد شده است.

کلیدواژه ها

هم مرجع سازی باند به باند، تصاویر چند طیفی، جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع، عدم انطباق باندها، تصاویر هوایی

۱ مقدمه

هم مرجع سازی تصاویر یکی از مهم ترین فرآیندهای پردازش تصاویر است که به منظور منطبق کردن تصاویر حاصل از

سنجندهای گوناگون به هم مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به کاربردهای متنوع، هم مرجع سازی تصاویر شامل منطبق کردن حداقل دو تصویر بر روی هم است که این تصاویر یا می توانند خروجی سنجندهای نوری و یا داده های رستری به دست آمده از منابع دیگر مانند مدل رقومی ارتفاعی باشند [۱][۲]. این تصاویر می توانند در زمان ها یا از منظرهای گوناگونی و یا حتی به وسیله سنجندهای گوناگون اخذ شده باشند [۳][۴].

اگرچه برخی از سنجندهای چند طیفی سنجنش ازدور نیاز به منطبق کردن باندهای تصویری بر روی هم ندارند اما اغلب دستگاه های تصویربرداری هوایی که اخذ تصاویر چند طیفی شان توسط چند دوربین یا چند عدسی انجام می شود، نیاز به هم مرجع سازی به صورت تصویر یا باند به باند دارند [۵].

این مقاله در ماه شهریور سال ۹۸ دریافت، سومین بازنگری در خردادماه سال ۹۹ انجام و در تیرماه همان سال پذیرفته شد.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران.

رایانامه: mhd.hassanpour@ut.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران.

رایانامه: samadz@ut.ac.ir و fdadrasjavan@ut.ac.ir

^۳ دانشکده عمران و نقشه برداری، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران.

رایانامه: nzarrin@qiau.ac.ir

رویکرد مبتنی بر فضای تصویر و مبتنی بر فضای شیء تقسیم بندی نمود. در روش های مبتنی بر فضای تصویر، همه مراحل هم مرجع سازی در فضای تصویر صورت می گیرد اما در روش های مبتنی بر فضای شیء، تصاویر پس از انتقال به فضای مدل یا شیء وارد مرحله ی هم مرجع سازی می شوند.

در بخش فضای تصویر، ژاویانگ ژاو^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، با هم مرجع سازی سه دسته داده از دوربین های چند طیفی، چند دوربین^۳ و یک دوربین با قابلیت تغییر فیلتر تصویربرداری، با راهکار تطبیق هیستوگرام تصویر و پنجره ی محلی به دقتی زیر یک پیکسل دست یافتند [۵].

فنگ ژو^۴ و همکاران (۲۰۱۸)، بر روی تصاویر چند زمانه^۵ با راهکار دو مرحله ای هم مرجع سازی اولیه و دقیق^۶ به هم مرجع سازی دقیق بین این تصاویر پرداختند. بدین صورت که در ابتدا با یک روش معمولی و الگوریتم SIFT هم مرجع سازی اولیه انجام می شود، سپس از روش تناظریابی متراکم SIFT به هم مرجع سازی دقیق می پردازند [۱۶].

یانجیا چن^۷ و همکاران (۲۰۱۷)، با راهکار دو مرحله ای هم مرجع سازی اولیه و دقیق به هم مرجع سازی تصاویر مرئی و حرارتی پرداختند. آن ها بر روی ۱۱ داده ی متفاوت راهکار خود را آزمایش کردند و به دقت زیر پیکسل تا ۴٫۸ پیکسل دست یافتند [۱۷].

صداقت^۸ و همکاران (۲۰۱۱)، با ارائه الگوریتم UR-SIFT^۹ به استخراج و پراکندگی مناسبی از نقاط بر روی انواع متنوعی از داده های هوایی و ماهواره ای پرداختند. در این الگوریتم، تصویر به شبکه هایی منظم تقسیم بندی شده و شایستگی هر بخش به منظور دارا بودن میزان عارضه ی درون آن ها مشخص می شود. سپس بر حسب میزان شایستگی هر بخش، نقاط استخراج می شوند و بدین ترتیب پراکندگی مناسبی از نقاط در سراسر تصویر وجود خواهد داشت. برای عملیات تناظریابی نیز در دو مرحله به تناظریابی میان نقاط می پردازند. مرحله ی اول شامل تناظریابی از روش مدل پروژکتیو و سپس آزمون نسبت نزدیک ترین همسایگی و در مرحله ی دوم به وسیله ی LSM^{۱۰} به تناظریابی دقیق میان نقاط می پردازند [۱۸].

صداقت و همکاران (۲۰۱۵)، با ارائه ی توصیفگر DOBSS^{۱۱} به استخراج قوی تر و دقیق تر عوارض توسط الگوریتم UR-SIFT پرداخته اند. این توصیفگر به منظور پایداری در برابر تغییرات بسیار

با توسعه ی پهناده ها، دوربین های تصویربرداری رقومی نیز کوچک تر شدند تا بر روی پهناده ها قابل نصب باشند [۶]. اغلب دوربین های رقومی تنها در سه باند قرمز، سبز و آبی تصویربرداری می کنند که نتیجه ی آن تصاویر رنگی و مرئی است.

با این وجود در کاربردهایی که مربوط به کشاورزی و منابع طبیعی با تمرکز بر مناطق گیاهی می باشند، دوربین های مرئی به تنهایی نمی توانند نیاز این کاربردها را برآورده کنند. بنابراین، دوربین های چند طیفی سبک با تعداد باند محدود توسعه داده شده اند. برخی از دستگاه های تصویربرداری حتی بیش از دو یا سه باند جدا از هم را به این دوربین ها اضافه کردند که در این صورت می توانند علاوه بر باندهای اصلی یعنی قرمز، سبز و آبی، در دو باند Red-Edge و مادون قرمز نزدیک نیز تصویربرداری کنند [۷]. حتی برخی دیگر از دستگاه های تصویربرداری از چهار یا بیش از چهار عدسی برای تصویربرداری در طیف های مختلف استفاده می کنند. این نوع از دستگاه های تصویربرداری به طور عموم دارای قابلیت تصویربرداری هم زمان همه ی عدسی ها و ذخیره ی تصاویر آن ها به صورت جداگانه می باشند [۸][۹].

اگرچه دستگاه هایی که برپایه ی تصویر رقومی می باشند، نیازمند هم مرجع سازی و کالیبراسیون رادیومتریکی هستند، اما مزایای بسیاری برای سنجش اذور از جمله هزینه کم، اندازه ی کوچک و استفاده آسان را فراهم کرده اند [۱۰]. برخلاف برخی دوربین های چند طیفی و ابرطیفی که بر پایه ی سنجنده های آرایه خطی است و نیازی به منطبق کردن باندها بر روی هم ندارند، دوربین های متداول چند طیفی که به صورت قاب^۱ مورد استفاده قرار می گیرند و دارای چند لنز هستند نیاز به هم مرجع سازی بین باندها دارند [۵].

معمولاً هم مرجع سازی تصاویر به دو روش ناحیه مینا و ویژگی مینا مطرح است [۱۱]. اساس روش ناحیه مینا بر پایه ی ضریب همبستگی بین نواحی، تکنیک های فوریه، اطلاعات دوجانبه و الگوریتم های بهینه سازی استوار است [۱۲]. الگوریتم های ناحیه مینا عموماً به استخراج و تناظریابی به وسیله ی شدت روشنایی صورت می گیرد، که تناظریابی آن ها توسط یک پنجره محدود می شود [۱۱][۱۳]. علاوه بر این، شدت های روشنایی که به صورت ناحیه مینا استخراج شده اند شامل اطلاعات کمی هستند که نتایج هم مرجع سازی را غیر قابل اعتماد می کنند [۱۴]. بنابراین از آنجایی که سنجنده ها در طیف های متفاوتی تصویربرداری و شدت روشنایی های متفاوتی را ذخیره می کنند؛ روش های ناحیه مینا برای هم مرجع سازی تصاویر چند طیفی مناسب نمی باشند. از طرفی در تصاویر چند عدسی، روش ویژگی مینا به دلیل اینکه الگوریتم های آن ها معمولاً ویژگی های بارز تصویر نظیر نقاط، منحنی ها و نواحی را استخراج می کنند، مناسب تر است [۱۵]. همچنین می توان روش های هم مرجع سازی را به دو

² Xiaoyang Zhao

³ Multi-Camera

⁴ Fang Xu

⁵ Multi-Temporal

⁶ Coarse and Fine registration

⁷ Yanjia Chen

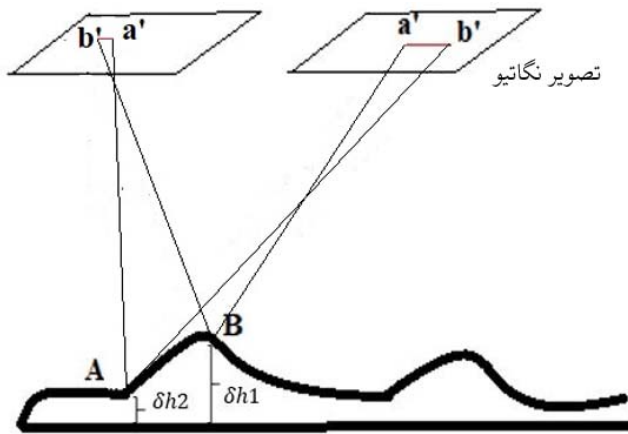
⁸ Sedaghat

⁹ Uniform Robust Scale Invariant Feature Transform

¹⁰ Least Squares Matching

¹¹ Distinctive Order Based Self-Similarity Descriptor

¹ Frame



شکل ۱ عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در تصاویر

- ارتفاع تصویربرداری در بسیاری از کاربردها مثل باغ‌ها در برابر اختلاف ارتفاعات منطقه کم است و جابجایی ناشی از تغییر ارتفاع، زیاد و غیرقابل چشم‌پوشی است.
 - این میزان اختلاف ایجادشده، در کاربردهایی نظیر تشخیص آفت‌ها، بیماری گیاهی، تشخیص تغییرات در رشد و نمو گیاهان، تشخیص در ترک آسفالت خیابان‌ها و جاده‌ها و به طور کلی نظارت کشاورزی و شهری غیرقابل چشم‌پوشی بوده و نیاز به تصحیح این خطا است.
- هدف اصلی این مطالعه توسعه‌ی یک رویکرد نوین به منظور هم مرجع سازی تصاویر چند طیفی نوری از نوع دوربین‌های قاب رقومی مبتنی بر فضای تصویر است. همچنین در مسیر هم مرجع سازی در فضای تصویر مطرح است. بخش اول مربوط به استخراج نقاط متناظر با تراکم بالا و پراکندگی یکنواخت است؛ و بخش دوم مربوط به تابع انتقال بهینه به منظور برازش خوب به تغییرات تصویر است. در این تحقیق بخش اول یعنی افزایش نقاط تناظرایی و دقت آن و مقایسه با روش‌های رایج دیگر در راستای کار قرار گرفته است.

۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ دوربین چند طیفی

در این مطالعه از دوربین چند طیفی هوایی سبک باقابلیت نصب بر روی پهپاد استفاده شده است که شامل پنج باند با پنج عدسی مجزا است.

دوربین نوری چند طیفی Red-Edge (شرکت MicaSense (آمریکا) با پنج باند، تصاویر را در باندهای آبی (۴۶۵-۴۸۵ nm)، سبز (۵۵۰-۵۷۰ nm)، قرمز (۶۶۳-۶۷۳ nm)، مادون قرمز نزدیک (۸۲۰-۸۶۰ nm) و Red-Edge (۷۱۲-۷۲۲ nm) به صورت جدا از هم و هم‌زمان اخذ می‌کند. تصاویر گرفته شده توسط این دوربین دارای ابعاد ۱۲۸۰*۹۶۰ پیکسل و در فرمت ۱۶ بیتی TIF است. در شکل ۲ این دوربین نشان داده شده است.

شدید روشنایی تعریف شده است که در استخراج دقیق عوارض کارآمد خواهد بود [۱۹].

صداقت و همکاران (۲۰۱۲)، به منظور تناظرایی دقیق میان نقاط در تصاویر ماهواره‌ای، پس از هم مرجع سازی اولیه، با استفاده از الگوریتم استخراج گوشه Harris با استفاده از روش LSM و با ایجاد یک شبکه کنترل چهار ضلعی^۱ به تناظرایی دقیق میان نقاط پرداختند [۲۰].

در بخش فضای شیء، هاوگان^۲ و همکاران (۲۰۱۸)، به منظور هم مرجع سازی تصاویر مرئی و حرارتی، در ابتدا نقاط تصویر مرجع به فضای مدل منتقل می‌شود، سپس با انتقال آن به فضای تصویر دوم، جست و جو برای نقاط متناظر با دقت بیشتری انجام می‌شود. در نهایت به هم مرجع سازی بین تصاویر پرداخته شده است [۲۱].

جان-پینگ جان^۳ و همکاران (۲۰۱۶-۲۰۱۷-۲۰۱۸)، به هم مرجع سازی باند به باند تصاویر چند طیفی با استفاده از راهکار MPT^۴ به ترتیب بر روی دوربین‌های Mini-MCA12، Red-Edge و Mini-MCA12 و در نهایت برای دوربین‌های Mini-MCA12، Red-Edge و Sequoia اقدام کردند و به دقت زیر پیکسل دست یافتند [۲۲][۲۳][۲۴].

با توجه به مطالعات انجام شده، دقت هم مرجع سازی برای دوربین‌های چند طیفی بیشتر از ۱ تا ۲ پیکسل برآورد شده است یا برای رسیدن به دقت مطلوب زیر پیکسل، ارتفاع پرواز بالا پیشنهاد شده است.

هنگامی که دوربین‌های چند طیفی بر روی پهپادها نصب می‌شوند و در ارتفاع پایین تصویربرداری می‌کنند، عدم انطباق باندها برهم نمود بیشتری پیدا می‌کند. همچنین در عوارضی که اختلاف ارتفاع بالایی دارند، خطایی مبنی بر عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در تصاویر نمایان می‌شود که به صورت کاملاً اغراق آمیز در شکل ۱ نشان داده شده است.

بر این اساس می‌توان موارد زیر را در نظر داشت:

- دوربین‌های چند طیفی شامل چند عدسی هستند. دوربین Red-Edge با ۵ عدسی، یکی از رایج‌ترین دوربین‌ها در کاربردهای کشاورزی است.

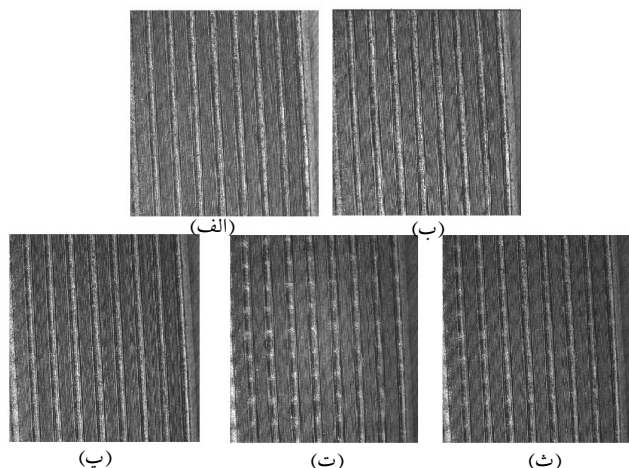
^۱ Quadrilateral Control Network

^۲ Hao Gan

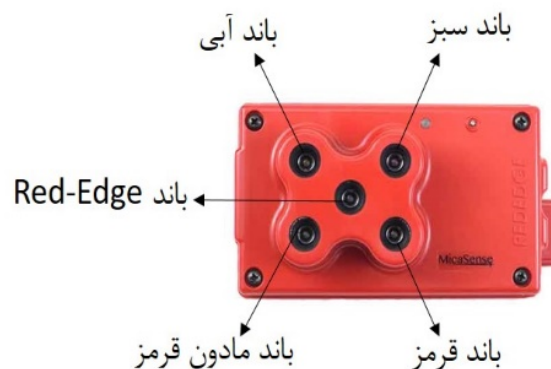
^۳ Jyun-Ping Jhan

^۴ Modified Projective Transformation

هم مرجع سازی دقیق باند به باند تصاویر چند طیفی هوایی بر اساس کاهش خطای عدم انطباق باندها حاصل از جابه‌جایی ارتفاعی



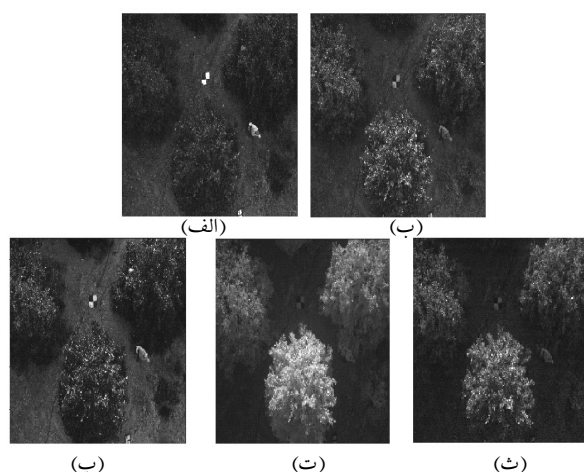
شکل ۲: نمایشی از دوربین Red-Edge و آرایش قرارگیری باندهای آن در کنار یکدیگر



شکل ۲: نمایشی از دوربین Red-Edge و آرایش قرارگیری باندهای آن در کنار یکدیگر

۲-۲ مجموعه داده

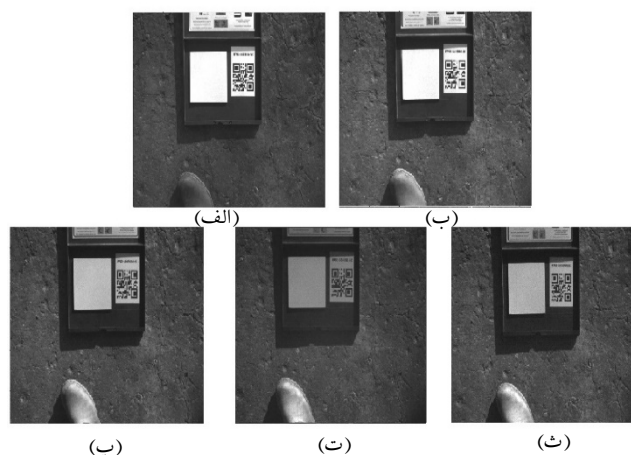
در این تحقیق به منظور بررسی اثر جابه‌جایی‌های ارتفاعی بر مسئله هم مرجع سازی، توسط دوربین Red-Edge از سه منطقه متفاوت که دارای عوارض ارتفاعی گوناگونی هستند، تصویر تهیه شده است. تصاویری که داده‌ی اول را تشکیل می‌دهند از یک صفحه^۱ کالیبراسیون گرفته شده است که دارای ارتفاع کم و سطح تقریباً صاف است. داده‌ی دوم از یک مزرعه که درختچه‌های آن دارای ارتفاع ۲ تا ۳ متر است و با الگوی یکسانی اخذ شده است. داده‌ی سوم از یک منطقه‌ی باغی که درختان آن دارای ارتفاعی متفاوت با بیش از ۳ متر گرفته شده است. در شکل ۳ تا ۵ این سه دسته داده نمایش داده شده است.



شکل ۳: مجموعه داده سوم: (الف) باند آبی؛ (ب) باند سبز؛ (پ) باند قرمز؛ (ت) باند مادون قرمز نزدیک و (ث) باند Red-Edge است

۲-۳ هم مرجع سازی باند به باند

به دلیل ساختار نوری و چیدمان عدسی‌های دوربین چند طیفی، تصاویر این نوع دوربین‌ها بر هم منطبق نبوده و در حالتی که اخذ تصاویر در ارتفاع کم صورت بگیرد، خطایی بنا بر عدم یکنواختی جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع در تصاویر ایجاد می‌گردد. برای درک بهتر، این موضوع در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده است.



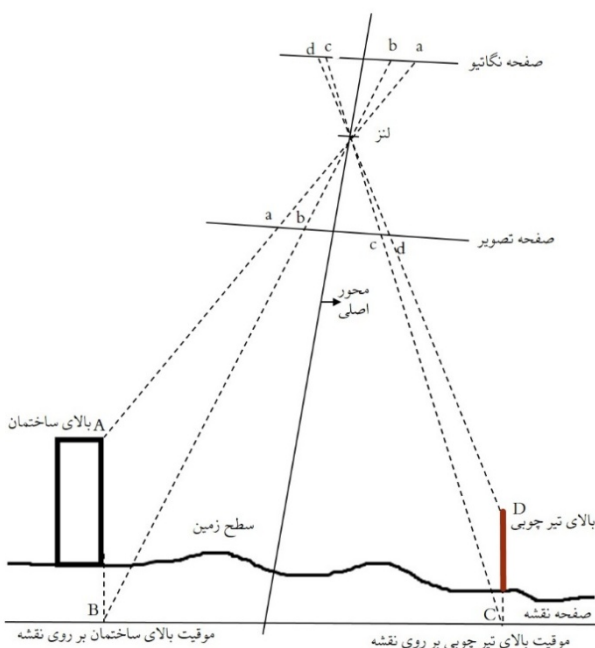
شکل ۳: مجموعه داده اول: (الف) باند آبی؛ (ب) باند سبز؛ (پ) باند قرمز؛ (ت) باند مادون قرمز نزدیک و (ث) باند Red-Edge است

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، نقاطی بر روی درخت قرار دارند که دارای بردار خطای بزرگ‌تری نسبت به نقاطی است که در ارتفاع کمتری قرار دارند.

۴-۲ روش پیشنهادی در هم مرجع سازی تصاویر چند طیفی هوایی

از آنجایی که جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع یکی از موردهای مهم در فتوگرامتری و چالش اصلی در دوربین‌های چند طیفی نصب‌شده بر روی پهپادها است؛ بنابراین نخست شرحی پیرامون جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع داده خواهد شد. جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در واقع مقدار فاصله‌ی شعاعی بالای یک عارضه و پایین آن در تصویر است در حالی که بالا و پایین آن عارضه در یک موقعیت مسطحاتی قرار دارند [۲۵]. شکل ۹ گویای این اندازه جابه‌جایی است.

این اندازه جابه‌جایی برای ارتفاع‌های مختلف، متفاوت است. از طرفی رابطه‌ی بین پارالاکس (اختلاف منظر) و ارتفاع عوارض را می‌توان به وسیله‌ی رابطه ۱ بیان کرد.



شکل ۹ نمایشی از جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع [۲۵]

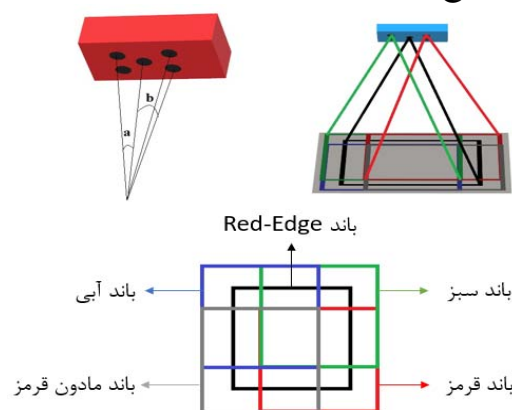
$$dh = \frac{dp}{dp + b} \times H \quad (1)$$

که در آن dh ارتفاع عارضه، dp اختلاف پارالاکس، b باز عکسی و H ارتفاع پرواز است. در صورتی که باندهای دوربین چند طیفی بر هم منطبق گردند، مقدار جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع را می‌توان برابر با اختلاف منظر در رابطه ۱ دانست. با استفاده از اطلاعات پرواز نظیر ارتفاع پرواز، ارتفاع متوسط منطقه و فاصله‌ی باز هوایی (فاصله‌ی بین دو ایستگاه تصویربرداری است که در این جا از فاصله‌ی جدایی بین عدسی‌ها استفاده می‌شود) بر روی تصویر، می‌توان اختلاف پارالاکسی را محاسبه کرد که



شکل ۶ عدم انطباق باندهای تصاویر چند طیفی

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، هر عدسی در موقعیتی متفاوت از دیگر عدسی‌ها قرار دارد که تصاویر گرفته‌شده توسط این عدسی‌ها، دارای عدم انطباق نسبت به هم است. همچنین با توجه به زاویه‌های دید متفاوت هر عدسی نسبت به یک عارضه، خطای ناشی از اختلاف ارتفاع در هر تصویر با دیگر تصاویر متفاوت خواهد بود که این امر در پروازهای ارتفاع پایین، پس از هم مرجع سازی باندها موجب خطای عدم انطباق در عوارض با ارتفاع زیاد می‌شود.



شکل ۷ نمایش عدم انطباق باندهای دوربین چند طیفی در عدسی‌ها



شکل ۸ نمایش بردار خطای نقاط از تصویر هم مرجع سازی شده با ۲۰ برابر بزرگنمایی. نقاط با مربع آبی و جهت بردارها با خط قرمز ترسیم شده است

مرکزیت هر یک از نقاط، نقاط جدیدی استخراج کرده، سپس هم مرجع سازی انجام می‌شود. این امر در پراکندگی نقاط به صورت مناسب در سرتاسر تصویر کمک زیادی می‌کند. چراکه هرچه عوارض منطقه دارای اختلاف ارتفاعات شدیدتری باشد، پراکندگی نقاط با مشکلاتی همراه خواهد بود که عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع را تشدید می‌کند. مراحل کار در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۲-۴-۱ روش پیشنهادی برای داده‌هایی دارای ارتفاع‌های کمتر از یک متر

در تصویر مرجع و سایر باندها با یک الگوریتم استخراج نقاط، نقاطی را استخراج کرده سپس این نقاط با استفاده از آزمون نسبت نزدیک‌ترین همسایگی یا مجموع اختلاف مربعات، تناظریابی می‌شوند. نقاط تناظریابی شده دارای اشتباه می‌باشند. بنابراین با استفاده از RANSAC که مدلی را بین نقاط برازش می‌دهد و می‌تواند نقاط اشتباه را شناسایی کند، تناظرهای اشتباه حذف می‌شوند. در نهایت با استفاده از یک تابع انتقال نظیر افین، انتقال هندسی بین تصاویر انجام شده و برای کنترل کار، تعدادی نقاط کنترل دقیق در نظر گرفته و با آن‌ها مقایسه شده است.

۲-۴-۲ روش پیشنهادی برای داده‌هایی دارای ارتفاع‌های بین ۱ تا ۳ متر

در این روش ابتدا تصاویر به بخش‌هایی پوشش‌دار تقسیم می‌شوند. این پوشش به این دلیل است که بین بخش‌ها فضای خالی و بدون نقطه ایجاد نشود. اندازه بخش‌ها با توجه به اندازه تصویر و عوارض موجود در منطقه انتخاب می‌شوند. هرچه اختلاف ارتفاعات عوارض زیاد باشد، بخش‌ها باید کوچک‌تر و بیشتر باشند اما نباید به حدی کوچک باشند که باعث افزایش بیش از حد حجم نقاط و افزایش زمان محاسبات گردد. نحوه‌ی انتخاب بخش‌ها برای این مطالعه به صورت تجربی در جدول ۲ بررسی شده است. با توجه به جدول ۲، که تعداد نقاط استخراج شده و متناظر را به همراه زمان اجرا در ۶، ۱۲ و ۲۰ بخش نمایش می‌دهد، می‌توان دریافت که هر چه تعداد بخش‌ها بیشتر شود، تعداد نقاط متناظر نیز بیشتر می‌شود، اما با توجه به برتری زمانی که ۶ بخش نسبت به ۱۲ و ۲۰ بخش دارد و همچنین اختلاف کم نقاط متناظر آن‌ها موجب آن شد که در این مطالعه تعداد بخش‌ها شش عدد انتخاب شود.

در هر بخش از تصویر مرجع و سایر باندها به استخراج نقاط پرداخته می‌شود. پس از استخراج نقاط در هر بخش، نقاط را در تصویر اصلی (بدون در نظر گرفتن بخش‌ها) در کنار هم قرار داده و تناظریابی سراسری انجام می‌شود. نقاط متناظر می‌توانند دارای اشتباه باشند که پس از استفاده از RANSAC، نقاط اشتباه حذف می‌شوند. در نهایت با استفاده از یک تابع انتقال نظیر افین، انتقال

نمایانگر ضرورت در نظر گرفتن جابه‌جایی ارتفاعی در آن داده است، همچنین این خطا نسبت به نقطه نادیر شعاعی بوده و با دور شدن از نقطه نادیر بیشتر می‌شود. بدین ترتیب با ثابت بودن ارتفاع پرواز، هر چه ارتفاع عارضه بیشتر شود این اندازه جابه‌جایی نیز بیشتر می‌شود. جدول ۱ مقادیر متفاوتی از اختلاف پارالاکس برای مناطق مختلف با ارتفاع پرواز ثابت و حداکثر فاصله‌ی جدایی بین عدسی (۱۰ سانتی متر) را نشان می‌دهد.

جدول ۱ خطای عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در ارتفاع پروازهای متفاوت

ارتفاع پرواز	ارتفاع متوسط منطقه		
	تقریباً سطح (پیکسل)	۳< ارتفاع (پیکسل)	ارتفاع < ۳ (پیکسل)
۱۵ متر	نزدیک به صفر	۲< خطا < ۰,۵	خطا < ۲
۲۵ متر	نزدیک به صفر	۱< خطا < ۰,۵	خطا < ۱
۶۰ متر	نزدیک به صفر	۰,۵< خطا < ۱	خطا < ۰,۵

با توجه به جدول ۱، واضح است که هرچه ارتفاع پرواز بیشتر شود، این میزان جابه‌جایی قابل چشم پوشی بوده است. اما با توجه به ارتفاع پرواز پایین و ارتفاع عوارض بیش از ۳ متر، خطاهایی به بزرگی بیش از ۲ پیکسل قابل مشاهده است. از آنجایی‌که در کاربردهای تشخیص آفت‌ها و بیماری گیاهان نیاز به پرواز در سطح پایینی است، می‌توان داده‌های اخذ شده را به سه دسته زیر تقسیم نمود.

- داده‌هایی با عوارض تقریباً مسطح که عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در آن قابل چشم‌پوشی است.
- داده‌هایی با عوارض ارتفاع متوسط حدود ۱ تا ۳ متر که عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در آن کم است.
- داده‌هایی با عوارض بیش از ۳ متر که عدم یکنواختی جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در آن چشم‌پوشی ناپذیر است.

بنابراین در ابتدا داده‌ها را از لحاظ عوارض ارتفاعی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده سپس سه روش هم مرجع سازی مورد بحث قرار خواهد گرفت. در روش اول یک هم مرجع سازی سراسری بر روی کل تصویر صورت می‌گیرد. در روش دوم تصاویر به چند بخش تقسیم می‌شوند و در هر بخش استخراج نقاط انجام می‌شود.

در روش سوم، ابتدا تصاویر را به چند بخش تقسیم کرده و پس از استخراج نقاط در هر بخش، دوباره در قالب پنجره‌هایی به

هندسی انجام می‌شود. نقاط کنترل دقیق نیز در برآورد دقت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۲ زمان و تعداد نقاط متناظر در بخش‌بندی‌های متفاوت از داده با اختلاف ارتفاع بیش از ۳ متر

زمان (نقطه بر ثانیه)	نقاط متناظر	نقاط استخراج شده	باندها	تعداد بخش
۱۸,۳۴	۴۲۵	۴۷۵	قرمز	۶
۱۸,۲۲	۲۸۸۸	۲۹۴۲	سبز	
۱۷,۵۱	۶۴۵	۶۹۱	آبی	
۱۵,۱۰	۱۷۷۹	۱۸۸۸	مادون قرمز نزدیک	
۳۲,۰۵	۴۹۰	۷۵۹	قرمز	۱۲
۳۱,۳۶	۲۸۹۶	۳۱۶۷	سبز	
۳۱,۲۲	۷۱۰	۸۱۹	آبی	
۲۹,۴۹	۱۷۹۱	۱۹۳۷	مادون قرمز نزدیک	
۶۵,۰۹	۵۶۴	۹۲۰	قرمز	۲۰
۶۹,۵۰	۲۹۲۴	۳۴۳۲	سبز	
۷۰,۳۹	۸۰۶	۱۰۰۲	آبی	
۶۲,۴۸	۱۹۲۶	۲۳۵۱	مادون قرمز نزدیک	

مرحله ۴: استخراج نقاط در هر زیر تصویر. در این مرحله در هر بخش به مرکزیت نقاط انتخاب شده، پنجره‌هایی (زیر تصویر) لحاظ می‌شود و در هر یک از آن‌ها استخراج نقاط صورت می‌گیرد.

مرحله ۵: تناظریابی محلی. در هر زیر تصویر (پنجره) و زیر تصویر نظیرش، برای نقاط استخراج شده، عملیات تناظریابی انجام می‌گیرد. این امر نه تنها سرعت جست‌وجو را بهبود می‌دهد بلکه سبب پراکندگی یکنواخت‌تری در اکثر نواحی تصویر خواهد شد. سپس بار دیگر همه‌ی نقاط تناظریابی شده در همه‌ی زیرتصویرها، بر روی تصویر اصلی قرار می‌گیرد. تحقیقات زیادی وجود دارد که بر روی تناظریابی نقاط کار شده است که در این بین می‌توان به عنوان پراکندترین روش‌های تناظریابی نقاط به روش‌های نسبت فاصله نزدیک‌ترین همسایگی (NNR) و مجموع اختلاف مربعات (SSD) اشاره کرد. در این تحقیق از نسبت فاصله‌ی نزدیک‌ترین همسایگی (NNR) برای شناسایی جفت نقاط متناظر استفاده شده است. وقتی

نسبت فاصله‌ی نزدیک‌ترین همسایه به دومین نزدیک‌ترین همسایه کمتر از یک حد آستانه معین باشد، آنگاه نزدیک‌ترین نقطه به عنوان نقطه‌ی متناظر انتخاب می‌شود. در غیر این صورت، آن جفت نقطه متناظر نیستند [۵]. به‌طور پیش‌فرض، در این مطالعه این نسبت ۰,۶ در نظر گرفته شده است.

مرحله ۶: حذف تناظریابی‌های اشتباه. بعد از این که نقاط تکراری حذف شدند، نقاط متناظر همراه با اشتباه در تمام سطح تصویر به دست می‌آیند. بنابراین به‌وسیله‌ی MSAC یا RANSAC که هر دو یک مدل انتقال افاین را تخمین می‌زنند، به حذف نقاط متناظر اشتباه پرداخته می‌شود. اصل رابطه‌ی هندسی آن می‌تواند یک مدل انتقال افاین را ارائه دهد. MSAC با به‌کارگیری از یک رابطه مکانی به حذف تناظریابی‌های اشتباه می‌پردازد. نسخه‌ی بهبودیافته‌ی آن RANSAC است که به‌طور گسترده‌تری در عملیات حذف تناظریابی‌های اشتباه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر دو الگوریتم در ابتدا یک مدل افاین تقریبی را با ۳ نقطه‌ی تصادفی تخمین می‌زنند. سپس مدل انتقال به‌وسیله‌ی یک تابع هدف به همه‌ی نقاط برازش داده می‌شود. در این مطالعه از RANSAC^۱ برای حذف تناظرهای اشتباه استفاده شده است و به‌طور پیش‌فرض، تعداد حداکثر نقاط تصادفی برای یافتن متناظرها ۱۰۰۰ و اعتمادپذیری برای یافتن بیشترین متناظرها، بر روی ۰,۹۹ تنظیم شده است. بنابراین، به‌منظور تخمین انتقال بین نقاط، حداکثر فاصله در پیکسل‌ها از یک نقطه تا نقطه‌ی متناظر آن، بر روی ۱,۵ تنظیم شده است [۵].

۳-۴-۲ روش پیشنهادی برای داده‌هایی دارای ارتفاع‌های بیشتر از ۳ متر

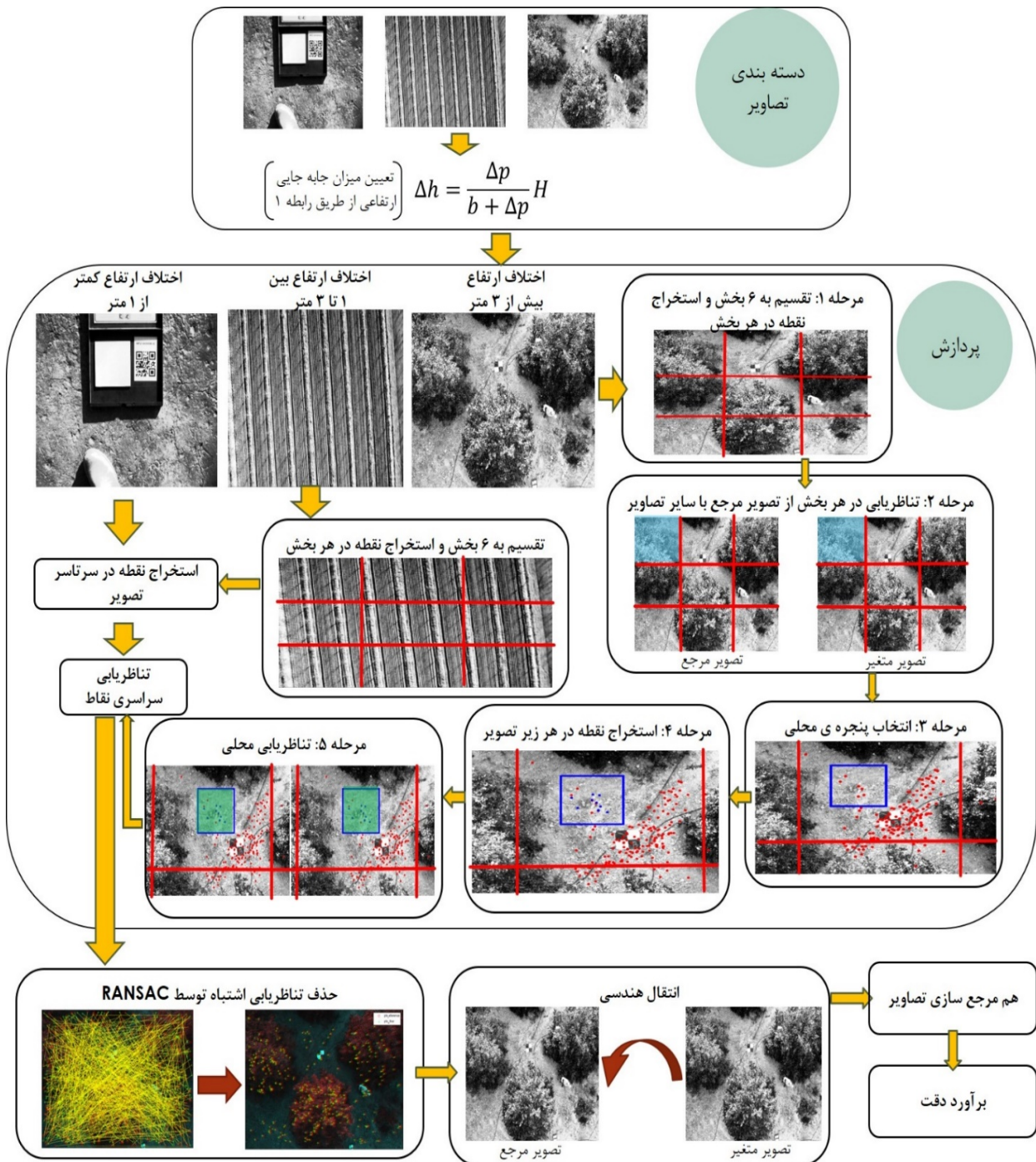
در این روش که شامل دو روش قبلی نیز می‌شود، دارای مراحل زیر است:

مرحله ۱: تقسیم به ۶ بخش و استخراج نقطه در هر بخش. ابتدا تصاویر به بخش‌هایی تقسیم‌بندی می‌شوند. شرایط تقسیم‌بندی بخش‌ها در قسمت ۲-۴-۲ گفته شده است. سپس در هر بخش، نقاط استخراج می‌شوند.

مرحله ۲: تناظریابی در هر بخش. هر بخش از تصویر مرجع را با بخش نظیرش در باندهای دیگر در نظر گرفته و در آن‌ها استخراج نقطه انجام می‌شود. سپس برای هر بخش با بخش نظیرش در سایر باندها، عملیات تناظریابی انجام می‌شود. سپس نقاط تناظریابی شده همه‌ی بخش‌ها بر روی تصویر قرار می‌گیرد.

مرحله ۳: انتخاب پنجره. نقاط تناظریابی شده در تصویر مرجع و تصویر دیگر، به‌عنوان مرکز پنجره‌ها انتخاب شده‌اند. درواقع به مرکزیت هر یک از نقاط، یک پنجره در نظر گرفته می‌شود که خود یک زیر تصویر از تصویر اصلی خواهد بود. اندازه پنجره‌ها باید در همه‌جا یکسان باشد. با استفاده از تجربیات به‌دست‌آمده از Xiaoyany Zhao (۲۰۱۸)، یک پنجره مربعی با اندازه $(1 + \sqrt{2}) * (2 + \sqrt{2})$ انتخاب می‌شود. این شعاع بر اساس اندازه تصویر، مقیاس و اختلاف ارتفاع‌های منطقه تعیین می‌گردد [۵]. همچنین، در قسمت نتایج اندازه گوناگونی از پنجره‌ها بررسی شده است.

^۱ برای اطلاعات بیشتر از روابط این الگوریتم، به بخش پیوست‌ها مراجعه شود.



شکل ۱۰ نمودار روش پیشنهادی

مرحله ۷: انتقال. بر پایه نقاطی که به عنوان نقاط متناظر به دست آمده‌اند و با استفاده از یک مدل انتقالی، سایر تصاویر بر روی تصویر مرجع انتقال می‌یابند. ریشه‌ی میانگین مربع خطا (RMSE) برای بیان دقت هم مرجع سازی برآورد می‌شود. تابع انتقالی که برای مختصات نقاط کنترل متناظر در دو تصویر مرجع و تصویر متغیر تعریف می‌شود، برای انتقال هندسی تصویر متغیر به تصویر مرجع است، که درواقع دو تصویر را بر هم منطبق می‌کند. از آنجایی که برخی از تغییرات نظیر انتقال، دروان، مقیاس یا ترکیبی از این‌ها که تصاویر را از حالت اصلی خارج می‌کند، از انتقال هندسی افاین استفاده شده است. در این فرآیند، آرایه نقاط

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

۳ نتایج

۳-۱ مقایسه آشکارسازها

برای یک انتقال مناسب، انتخاب المان‌های متناظر شامل جفت نقاط کنترل، در تصویر مرجع و سایر تصاویر ضروری است. لو^۱ از اختلاف گوسین (DOG) برای پیدا کردن نقاط در تصویر استفاده کرده است [۲۶]. از آنجایی که LOG، DOG را تخمین می‌زند، نتیجه‌ی رفتار آشکارساز آن شبیه به استخراج حباب لیندبرگ^۲ بود [۲۷]. نام این آشکارساز که از DOG به دست می‌آید را اپراتور SIFT نامید که مخفف Scale Invariant Feature Transformation است. در SIFT اگر مقدار پیکسل مرکزی DOG کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از همه‌ی ۲۶ همسایه‌اش در فضای مقیاس باشد، اکس‌ترم قدرت تفکیک محلی به‌عنوان ویژگی یک نقطه در نظر گرفته می‌شود.

بای^۳ و همکاران، برای به دست آوردن اندازه حباب، به‌جای جست‌وجو برای یافتن آستانه DOG یا LOG، بیشینه‌ی دترمینان ماتریس هسین محلی در فضای مقیاس و مقیاس دترمینانی که بیشینه‌ی آن می‌تواند استفاده شود را پیشنهاد کرده‌اند. این آشکارساز دارای تکرارپذیری و قابل مقایسه با SIFT است. اما اگر محاسبات آن از سرعت بالایی برخوردار بود آنگاه از SIFT هم بهتر عمل می‌کرد [۲۹].

الگوریتم استخراج گوشه‌ی Harris توسط کریس هریس^۴ و مایک استوهن^۵ در سال ۱۹۸۸ ارائه شده است [۳۰]. الگوریتم استخراج گوشه Harris با استفاده از یک پنجره‌ی محلی به اندازه‌گیری درجات خاکستری در تصویر می‌پردازد. پردازش‌های لازم این الگوریتم عبارت است از: تبدیل تصویر به یک تصویر سیاه‌وسفید، محاسبه‌ی اختلاف تصویر، نرم‌کننده‌ی گوسین، محاسبه‌ی بیشینه و کمینه‌ی محلی و انتخاب نقاط گوشه.

FAST، یک اپراتور استخراج گوشه با سرعت بالا است که توسط روستن^۶ و دروموند^۷ در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است [۳۱]. اگر شدت روشنایی n پیکسل مجاور در یک دایره به شعاع ۳ پیکسل که به مرکزیت یک پیکسل قرار دارد، بیشتر از روشنایی پیکسل مرکزی به‌اضافه‌ی یک حد آستانه (یا کمتر از پیکسل مرکزی منهای یک حد آستانه) باشد آنگاه FAST آن پیکسل را به‌عنوان گوشه انتخاب می‌کند.

BRISK، یک اپراتور استخراج گوشه است که بر پایه‌ی آشکارسازی در فضای مقیاس الگوریتم FAST با ترکیب توصیف‌گر

رشته‌ای است که از مقایسه‌ی شدت روشنایی بازیابی شده به وسیله‌ی نمونه‌برداری از نقاط همسایه قرار دارد. این الگوریتم سرعت بالایی دارد که توسط استیفان لیوتننجر^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۱ ارائه شده است [۳۲].

در این مطالعه، تعداد نقاط استخراجی، سرعت استخراج نقاط و نرخ تناظریابی صحیح از آشکارسازهای بالا مقایسه و مناسب‌ترین آن‌ها انتخاب شده است، که پایه مراحل بعدی در هم مرجع سازی تصویر گذاشته شده است.

بنابراین، پنج الگوریتم استخراج نقطه شامل SURF، SIFT، FAST، Harris و BRISK، بر روی داده اول تا سوم، هم بر روی تصویر رفرنس و هم بر روی تصویر متغیر مورد آزمایش قرار گرفته است. به‌منظور مقایسه نرخ تناظریابی صحیح برای الگوریتم‌های استخراج نقطه در شرایط استاندارد، پارامترها به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که تقریباً در هر داده‌ای بیشترین اندازه استخراج نقطه را داشته باشند به گونه‌ای که در عملیات تناظریابی، زمان محاسبات و مقدار اشتباه‌ها به حداقل میزان خود برسند. به عنوان نمونه برای الگوریتم SURF مقدار آستانه انتخاب قوی‌ترین عارضه بر روی ۱ و تعداد سطوح مقیاس در هر اکتاو برابر ۷، برای الگوریتم FAST از مقادیر پیش فرض، برای الگوریتم SIFT مقدار اکتاوها برابر با ۵ و تعداد سطوح مقیاس در هر اکتاو برابر ۶ در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب پارامترهای سایر الگوریتم‌ها نیز برای شرایط فوق تنظیم شده‌اند. لازم به ذکر است که این پارامترها به‌صورت آزمون و خطا تعیین گردیده‌اند. برای عملیات تناظریابی از آزمون نسبت نزدیک‌ترین همسایگی و برای حذف تناظریابی اشتباه از RANSAC استفاده شده است. سرعت استخراج نقاط و نرخ تناظریابی نیز به صورت نقطه بر ثانیه محاسبه شده است. جدول ۳ تا ۵ نتایج به‌دست آمده از تناظریابی ۵ آشکارساز را ارائه می‌دهد.

جدول ۳ مقایسه الگوریتم‌های استخراج نقطه برای داده اول

نام	زمان استخراج نقاط	تعداد نقاط استخراج شده	سرعت استخراج نقاط (نقطه بر ثانیه)	تعداد نقاط متناظر	تعداد نقاط متناظر صحیح
SURF	۰/۸۶۴	۹۶۱۸۹	۸۹/۸۲	۲۱۵۶۸	۱۰۴۲۵
FAST	۰/۰۲	۷۵۹۸	۲۶/۳۲	۹۸۱	۴۹۱
SIFT	۰/۸۲۳	۹۰۸۸۴	۹۰/۵۵	۱۹۱۲۵	۹۵۶
BRISK	۰/۲۶۷	۵۱۹۷	۵۱/۳۷	۱۸۹	۷۵
Harris	۰/۲۵۹	۲۵۴۸	۱۰/۱۶	۹۰۹	۸۳

^۱ Lowe^۲ Lindeberg^۳ Bay^۴ Chris Harris^۵ Mike Steohen^۶ Rosten^۷ Drummond^۸ Stefan Leutenegger^۹ Octave

هم مرجع سازی دقیق باند به باند تصاویر چند طیفی هوایی بر اساس کاهش خطای عدم انطباق باندها حاصل از جابه جایی ارتفاعی

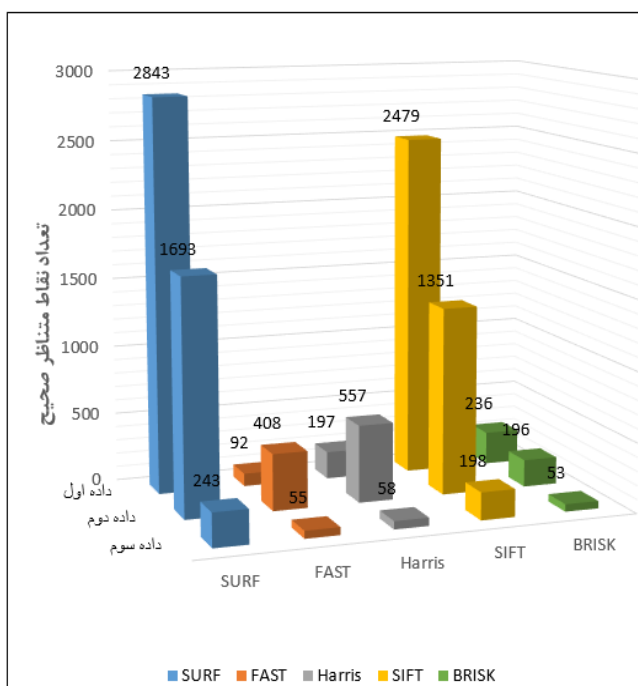
بالایی دارد، اما در تعداد نقاط متناظر صحیح، ضعیف عمل می کند. الگوریتم SIFT با سرعت استخراج مطلوب نقاط و تعداد تناظریابی صحیح قابل قبول، عملکرد خوبی داشت اما الگوریتم SURF نسبت به الگوریتم SIFT برای این دسته از داده ها با اندکی اختلاف عملکرد بهتری را نشان داد. الگوریتم SURF به عنوان محاسباتی ترین الگوریتم در میان الگوریتم های بالا شناخته می شود. این الگوریتم با سرعت استخراج نقطه ی مناسب و تعداد نقاط متناظر صحیح بیشتر نسبت به سایر الگوریتم ها، بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. برای اثربخشی به روش پیشنهادی از الگوریتم SURF به عنوان یک الگوریتم استخراج نقطه ی مناسب برای این ۳ داده استفاده شده است.

جدول ۴ مقایسه الگوریتم های استخراج نقطه برای داده دوم

تعداد نقاط متناظر صحیح	تعداد نقاط متناظر	سرعت استخراج نقاط (نقطه بر ثانیه)	تعداد نقاط استخراج شده	زمان استخراج نقاط	نام
۹۶۷	۲۶۴۳	۱۳/۷۷	۵۴۵۹۳	۰/۷۵۲	SURF
۲۴۷	۷۳۹	۴۰/۶۰	۴۹۲۵	۰/۰۲	FAST
۷۶۲	۱۹۴۶	۱۴/۹۵	۴۱۲۶۵	۰/۶۱۷	SIFT
۷۳	۱۰۶	۶۸/۳۸	۳۶۴۱	۰/۲۴۹	BRISK
۷۹	۷۴۲	۱۸/۲۶	۱۳۷۴	۰/۲۵۱	Harris

جدول ۵ مقایسه الگوریتم های استخراج نقطه برای داده سوم

تعداد نقاط متناظر صحیح	تعداد نقاط متناظر	سرعت استخراج نقاط (نقطه بر ثانیه)	تعداد نقاط استخراج شده	زمان استخراج نقاط	نام
۲۴۳	۱۰۶۶	۱۸/۹۲۶	۲۸۲۶۵	۰/۵۳۵	SURF
۵۵	۳۶۱	۷۰/۲۷	۱۴۲۳	۰/۰۱	FAST
۱۹۸	۹۶۷	۳۰/۴۴	۲۰۴۶۵	۰/۶۲۳	SIFT
۵۳	۹۵	۸۲/۰۵	۲۰۸۴	۰/۱۷۱	BRISK
۵۸	۵۴۴	۱۹/۰۳	۸۲۵	۰/۱۵۷	Harris



شکل ۱۱ مقایسه ی تعداد نقاط متناظر صحیح برای ۵ الگوریتم استخراج نقطه، بر روی باند اول (قرمز) هر سه داده با مرجع قرار دادن باند red-edge

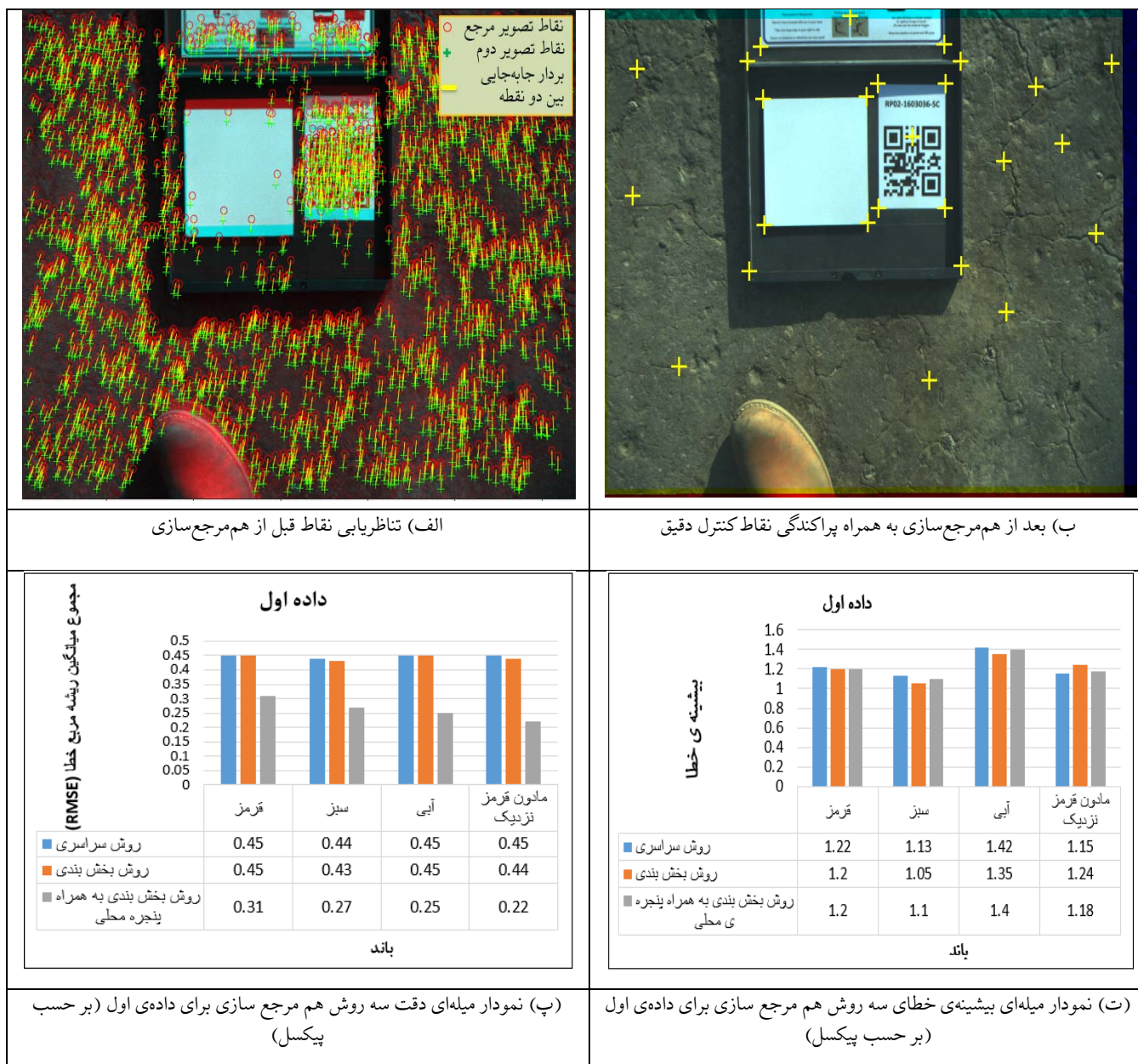
۲-۳ هم مرجع سازی در مناطق با اختلاف ارتفاعی پایین

در شکل ۱۲ (الف) نتیجه ی تناظریابی نقاط برای باند قرمز و باند مرجع (red-edge) در داده اول را با استفاده از الگوریتم SURF و روش سراسری، قبل از هم مرجع سازی نشان می دهد و شکل ۱۲ (ب) نتیجه ی هم مرجع سازی برای سه باند قرمز، سبز و آبی را نشان می دهد. لازم به ذکر است، انتخاب باند red-edge به عنوان باند مرجع به دو دلیل صورت گرفته است.

با توجه به جدول ۳ تا ۵، الگوریتم SURF سرعت و دقت بالایی در تناظریابی دارد. اگرچه باید تعداد نقاط متناظر نیز در نظر گرفته شود و افزایش یابد.

الگوریتم FAST با سرعت خیلی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم ها، استخراج نقاط را انجام می دهد اما تعداد نقاط استخراج شده آن و نقاط متناظر صحیح آن به نسبت SURF کمتر است. الگوریتم SIFT به نسبت سایر الگوریتم ها عملکرد قابل قبولی را از خود نشان داده است اما در مقایسه با الگوریتم SURF، کمی ضعیف عمل کرده است. الگوریتم BRISK و Harris با سرعت بالایی، تعداد نقاط خوبی را استخراج می کنند اما تعداد نقاط متناظر صحیح آن ها کم می باشند. برای درک بهتر، در شکل ۱۱ تعداد نقاط متناظر استخراج شده در باند قرمز از داده ی سوم توسط ۵ الگوریتم بالا نمایش داده شده است.

به عنوان توضیحات تکمیلی و با توجه به شکل ۱۱ می توان اینگونه بیان کرد که BRISK به شدت، محاسبات ضعیفی را در این مطالعه نشان داده است. اپراتور استخراج نقطه ی Harris نسبت به دوران مقاوم است اما تغییرات مقیاس بر روی نتایج آن تأثیرگذار است. همچنین تعداد نقاط متناظر صحیح آن نیز کم است. الگوریتم FAST با وجود اینکه سرعت استخراج نقاط بسیار



شکل ۱۲ نمایش تناظریابی، هم مرجع سازی و دقت داده ی اول

روشنایی پایین به عنوان مرجع لحاظ شود، مقدار تناظرهای اشتباه تا حد زیادی کاهش می یابد [۵].

همچنین دقت هم مرجع سازی برای ۴ باند متفاوت با مرجع قرار دادن باند red-edge، در شکل ۱۲ (پ) و بیشینه خطا برای هر روش در شکل ۱۲ (ت) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲ (پ)، دقت روش پیشنهادی (بخش بندی به همراه پنجره محلی) از دو روش دیگر بهتر است اما از لحاظ زمان اجرا بسیار طولانی است. از طرفی با توجه به دقت، بیشینه خطا، میانگین خطا (که برای روش سراسری ۰٫۷، روش بخش بندی ۰٫۶۵ و روش سراسری ۰٫۵۹ پیکسل است)، پراکندگی نقاط قابل قبول و همچنین سرعت بالای روش سراسری برای این دسته از داده ها،

اول به این دلیل که باند red-edge در مرکز دوربین قرار دارد و دوم این که درجه روشنایی^۱ پایینی به نسبت سایر باندها و شباهت جزئی آن به باند مادون قرمز نزدیک دارد. زیرا، هرچه باند مرجع درجه روشنایی بالاتری داشته باشد، در مناطق با وضوح بالا نقاط بیشتری استخراج شده و عملیات تناظریابی بین آن و یک تصویر با درجه روشنایی پایین، منجر به تناظرهای اشتباه بیشتری می شود. در واقع بسیاری از نقاط که در باند مرجع استخراج شده اند، ممکن است متناظر آنها در تصویر با درجه روشنایی پایین استخراج نشده باشد. اما اگر تصویر با درجه

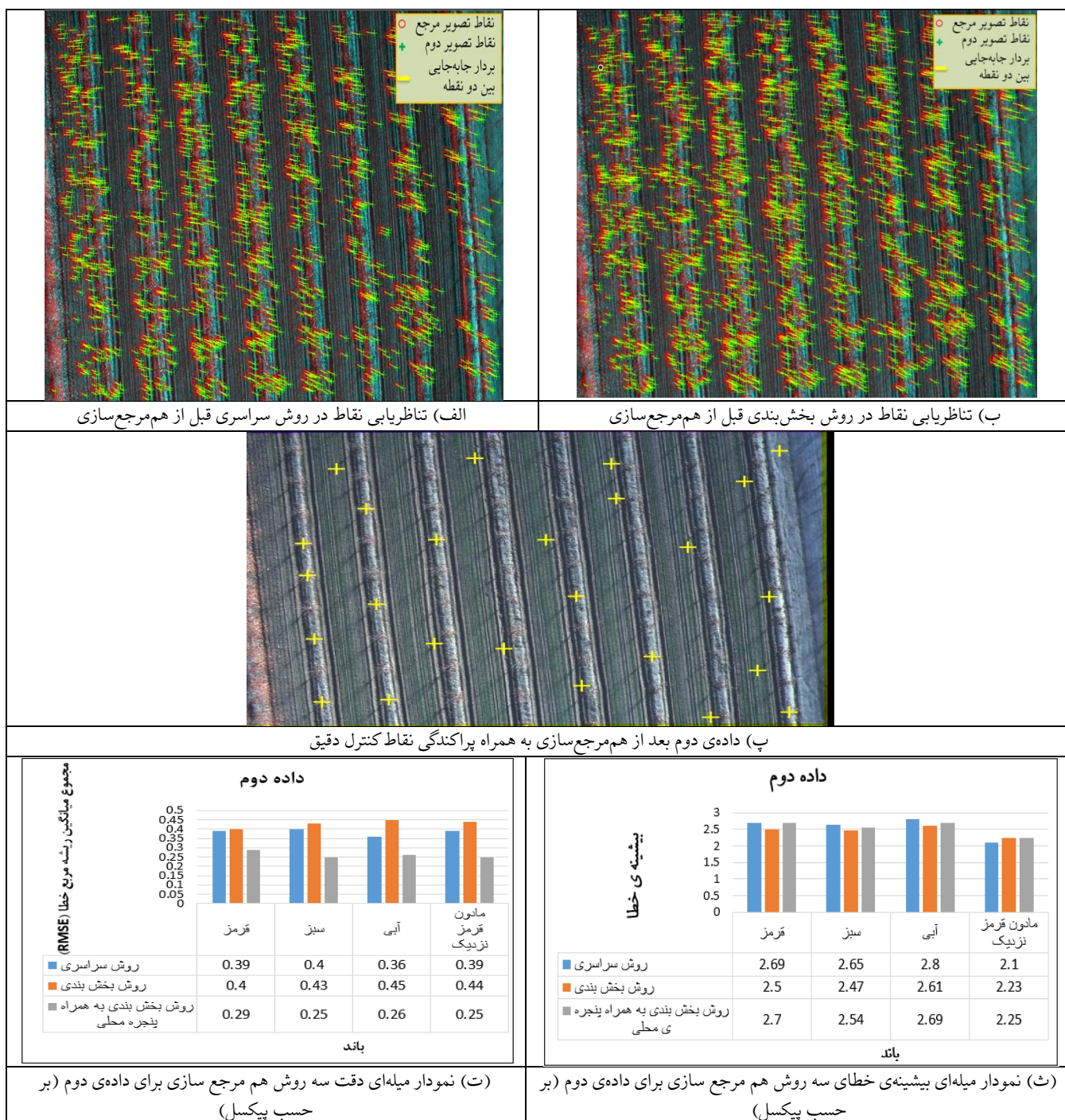
^۱ Contrast

شکل ۱۳ (ت) مشخص است، دقت روش پیشنهادی از دو روش دیگر بهتر است اما زمان محاسبات در روش سوم برای داده‌ی دوم نیز بسیار طولانی است. از این رو با توجه به بیشینه‌ی خطا، میانگین خطا (که برای روش سراسری ۰,۸۹، روش بخش‌بندی ۰,۶۸ و روش بخش‌بندی به همراه پنجره‌ی محلی ۰,۵۱ پیکسل است)، پراکندگی مناسب نقاط و دقت قابل‌قبولی که روش بخش‌بندی نسبت به روش سراسری برای این نوع از داده‌ها دارد، روش بخش‌بندی را می‌توان گزینه‌ی مناسبی برای داده‌های نظیر داده‌ی دوم در نظر گرفت.

می‌توان روش سراسری را گزینه‌ی مناسبی برای این نوع از داده‌ها در نظر گرفت.

۳-۳ هم مرجع سازی در مناطق با اختلاف ارتفاعی متوسط

نتیجه‌ی تناظریابی نقاط برای روش سراسری و بخش‌بندی و همچنین هم مرجع سازی برای سه باند قرمز، سبز و آبی برای داده دوم در شکل ۱۳ نمایش داده‌شده است. همچنین دقت سه روش هم مرجع سازی برای داده‌ی دوم نیز در شکل ۱۳ (ت) و بیشینه خطا در شکل ۱۳ (ث) نشان داده‌شده است همان‌طور که از



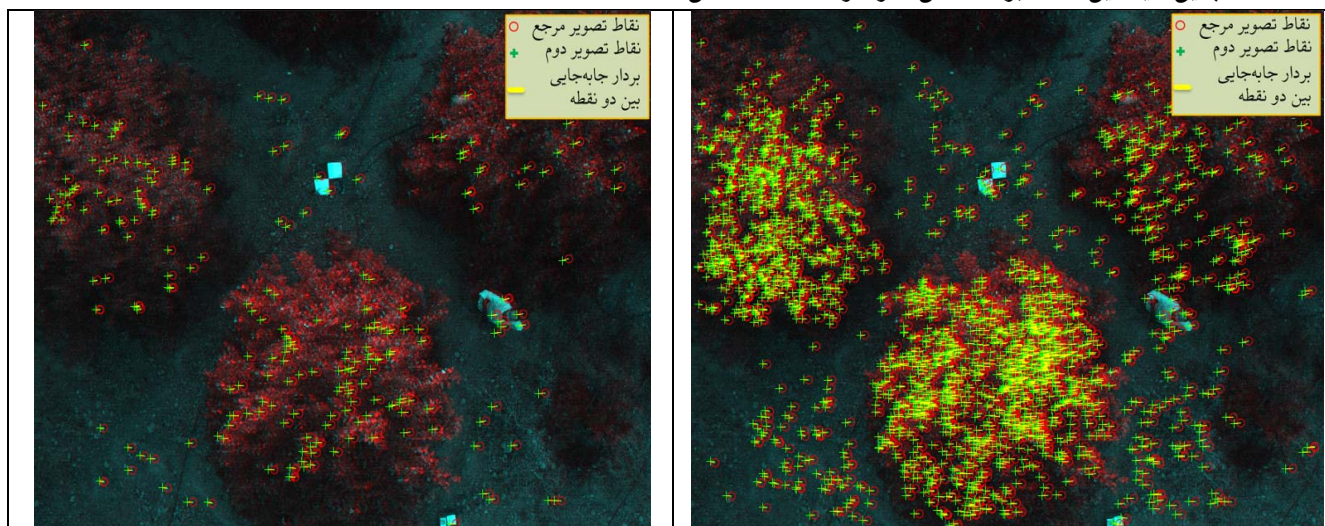
شکل ۱۳ نمایش تناظریابی، هم مرجع سازی و دقت برای داده دوم

بخش بندی ۱,۲۵ و روش بخش بندی به همراه پنجره‌ی محلی ۰,۵۵ پیکسل است.

با توجه به نتایج به دست آمده از محتویات تصاویر، دقت هم مرجع سازی می تواند متفاوت باشد. با این وجود، مقدار RMSE در دو جهت x و y برای روش پیشنهادی در داده‌ی سوم به صورت میانگین ۰,۲۸ پیکسل برآورد شده است.

۳-۴ هم مرجع سازی در مناطق با اختلاف ارتفاعی بالا

نحوه‌ی تناظر یابی نقاط در روش معمولی و روش بخش بندی به همراه پنجره محلی برای داده‌ی سوم در شکل ۱۴ آورده شده است. همچنین دقت سه روش هم مرجع سازی برای داده سوم نیز در شکل ۱۴ (ت) و بیشینه‌ی خطا در شکل ۱۴ (ث) نمایان است. همچنین میانگین خطا برای روش سراسری ۱,۹۸، روش

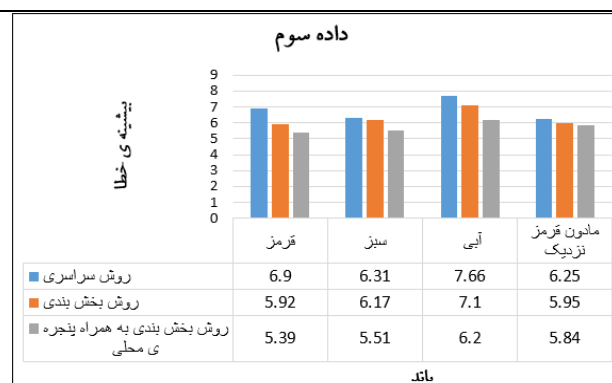
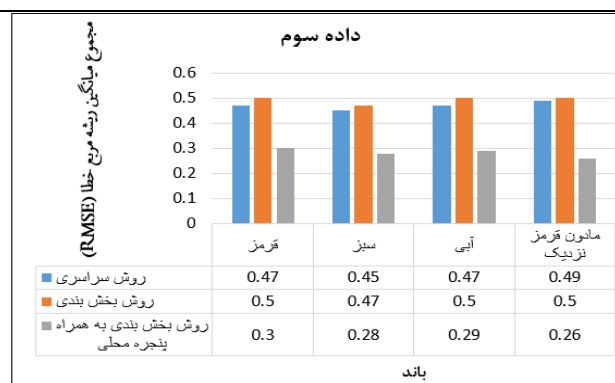


الف) تناظر یابی نقاط در روش سراسری قبل از هم مرجع سازی

ب) تناظر یابی نقاط در روش پیشنهادی قبل از هم مرجع سازی



پ) داده‌ی سوم بعد از هم مرجع سازی به همراه پراکنندگی نقاط کنترل دقیق



ت) نمودار میله‌ای دقت سه روش هم مرجع سازی برای داده سوم (بر حسب پیکسل)

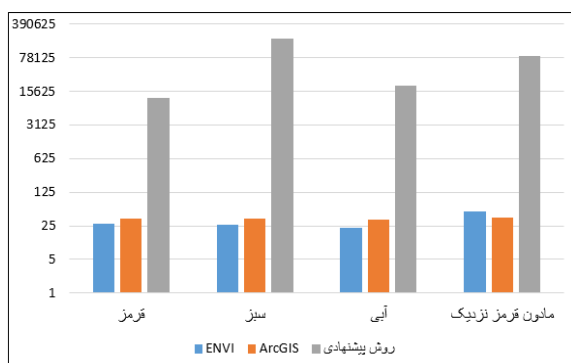
ث) نمودار میله‌ای بیشینه‌ی خطای سه روش هم مرجع سازی برای داده‌ی سوم (بر حسب پیکسل)

شکل ۱۴ نمایش تناظر یابی، هم مرجع سازی و دقت برای داده سوم

محلی استفاده شود، زمان محاسبات به شدت افزایش یافته و دقتی تقریباً برابر با روش سراسری دارد. پس بهتر و معقول تر است که در تصاویر مسطح نظیر داده‌ی اول از روش سراسری استفاده شود.

۵-۳ مقایسه‌ی روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

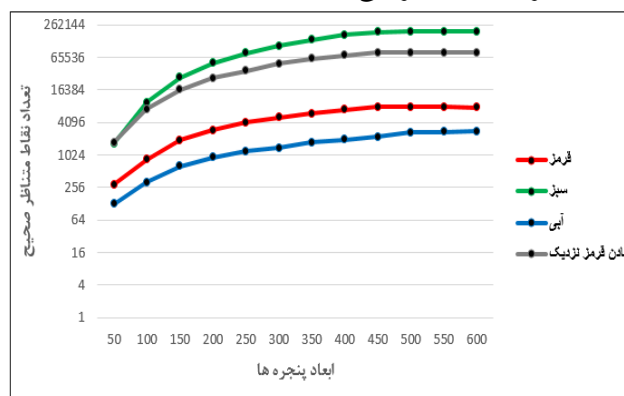
برای اعتبار دادن بیشتر به روش پیشنهادی، نتایج هم مرجع سازی با نرم‌افزارهای دیگری نظیر ArcGIS و نرم‌افزار ENVI مقایسه شده است. این دو نرم‌افزار به این دلیل انتخاب شده‌اند که در زمینه هم مرجع سازی تصاویر شناخته شده هستند و اکثر کاربران از این نرم‌افزارها برای هم مرجع سازی تصاویر بهره می‌جویند. سه داده در این دو نرم‌افزار با مرجع قرار دادن باند red-edge، هم مرجع سازی شدند. نرم‌افزار ArcGIS به صورت اتوماتیک نقاط را در دو تصویر استخراج کرده و پس از تناظریابی از طریق یکی از مدل‌های ریاضی چند جمله‌ای، افاین و پروژکتیو، عملیات انتقال را انجام می‌دهد که در این تحقیق از مدل پروژکتیو به دلیل دقت مناسب‌تر نسب به سایر مدل‌ها برای این نرم‌افزار استفاده شده است. برای بیان دقت در این نرم‌افزار نیز از RMSE استفاده شده است. ENVI حداقل به ۳ نقطه کنترل به جهت انجام خودکار هم مرجع سازی نیاز دارد. در این نرم‌افزار می‌توان الگوریتم استخراج گوشه نظیر Harris، Forstner و Moravec را انتخاب کرد و پس از تناظریابی، با استفاده از یکی از مدل‌های ریاضی افاین، چند جمله‌ای و پروژکتیو، عملیات انتقال صورت می‌گیرد. بنابراین، برای الگوریتم استخراج نقطه از Harris و از مدل پروژکتیو به عنوان مدل انتقالی استفاده شده است. شکل ۱۶ تعداد جفت نقاط متناظر صحیح را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ مقایسه نقاط صحیح متناظر برای روش پیشنهادی با نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS در داده سوم

همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، تعداد نقاط متناظر در روش پیشنهادی بسیار بیشتر از ENVI و ArcGIS است. نقاط متناظر برای هر سه دسته داده، در نرم‌افزار ENVI و ArcGIS در نواحی همگن رخ داده است که ممکن است دقیق نباشد. دقت هم مرجع سازی روش پیشنهادی، خوب و قابل قبول

بر روی سه داده متفاوت، بر پایه الگوریتم SURF سه روش هم مرجع سازی سراسری، هم مرجع سازی بخش‌بندی و هم مرجع سازی به روش بخش‌بندی به همراه پنجره محلی آزمایش شده است. در روش پیشنهادی با در نظر گرفتن حداقل نقاط استخراج شده توسط الگوریتم SURF، تعداد ۱۰۰۰ پنجره در تصاویر مرجع و متغیر انتخاب شده است، که ابعاد پنجره‌ها باید یکسان باشد. در شکل ۱۵ روند تغییرات نتایج تناظریابی برای پنجره با ابعاد متفاوت نشان داده شده است. با افزایش ابعاد پنجره، تعداد استخراج نقاط متناظر بیشتر می‌شود اما ممکن است نقاط تکراری هم استخراج شوند که خود موجب افزایش زمان محاسبات می‌شود. هرچه ابعاد پنجره بزرگ‌تر شود، نرخ تناظریابی صحیح کمتر و سرعت اجرا با کاهش شدیدی روبه‌رو می‌شود. بنابراین پنجره با ابعاد کوچک، دقت بیشتری را در تناظریابی دارد.



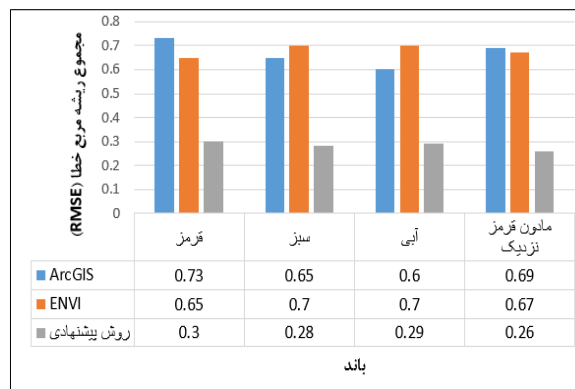
شکل ۱۵ نمایش تعداد نقاط صحیح متناظر نسبت به تغییرات اندازه‌های پنجره محلی

بنابراین در داده‌ی سوم که تصاویر دارای عوارض با اختلاف ارتفاعات زیادی است از روش بخش‌بندی همراه با پنجره محلی استفاده می‌شود تا بتوان نقاط متناظر را با پراکندگی مناسبی در سطح تصاویر استخراج کرد. چراکه هرچه اختلاف ارتفاعات در تصویر بیشتر باشد (به‌طور مثال منطقه جنگلی باشد) نقاط تنها در بخش‌های خاصی از تصویر استخراج می‌شوند که با انتخاب پنجره محلی، استخراج نقاط در سرتاسر تصویر، به پراکندگی مناسبی می‌رسد.

اما اگر تصویر دارای اختلاف ارتفاعات متوسط و معمولی باشد (مانند مناطق دارای درختچه) آنگاه روش بخش‌بندی تصاویر، پراکندگی نقاط مناسبی را به همراه خواهد داشت، درحالی‌که بخش‌بندی همراه با پنجره محلی با افزایش شدید نقاط متناظر، زمان محاسبات را بسیار طولانی کرده و دقتی تقریباً برابر با دقت روش بخش‌بندی دارد.

در تصویری که حالت دشتی یا مسطح دارد، استخراج نقطه به‌صورت سراسری، پراکندگی نقاط مناسبی در تصویر دارد و نقاط متناظر با دقت بالایی محاسبه می‌شوند. اگر برای این دسته از تصاویر از روش بخش‌بندی یا بخش‌بندی همراه با پنجره

است. با توجه به شکل ۱۷، دقت روش پیشنهادی بهتر از ENVI و ArcGIS است.



شکل ۱۷ مقایسه دقت روش پیشنهادی با نرم افزارهای ENVI و ArcGIS در داده سوم (بر حسب پیکسل)

۴ بحث و نتیجه گیری

هدف از بیان روش‌های ذکر شده که بر پایه‌ی آشکارساز SURF بود، افزایش و پراکندگی مناسب نقاط متناظر صحیح در سرتاسر تصویر است. بنابراین با اهمیت دادن به روش سوم و محتویات داده‌ی سوم (که دارای عوارض با اختلاف ارتفاعات زیاد است)، یافتن اندازه‌ی مناسب پنجره به عنوان یک پارامتر مهم مطرح است. اندازه پنجره‌ی بهینه به محتویات تصویر وابسته است. درواقع هر چه محتویات تصویر از عدم یکنواختی بیشتری برخوردار باشد، استفاده از پنجره و اندازه مناسب آن کارآمدتر است. اما اگر محتویات تصویر دارای الگوی یکسان به همراه اختلاف ارتفاعات کم عوارض باشد، استفاده از پنجره مقرون به صرفه نخواهد بود.

از طرفی مدل ریاضی مورد استفاده برای این تحقیق از مهم‌ترین چالش‌هایی می‌باشد که باید به آن پرداخته شود. همان‌گونه که در قسمت مقدمه بیان شده است، راهکار این تحقیق یک راهکار مبتنی بر فضای تصویر می‌باشد. پس تمامی عملیات‌های لازم برای این فرآیند در فضای تصویر انجام گرفته است. مدل دو بعدی پروژکتیو یک مدل تبدیل ۸ پارامتری است که بسیار مناسب برای انتقال از یک سیستم مختصات دوبعدی به سیستم مختصات دوبعدی دیگر یا سه بعدی دیگر است. مدل دو بعدی افاین یک مدل تبدیل ۶ پارامتری با تصحیحات مقیاس و دوران است که توسط آن می‌توان از یک سیستم مختصات دو بعدی به دو بعدی دیگر رفت. مدل تبدیل پروژکتیو برای انتقال نقاط در چنین موضوعی مناسب است، اما این انتظار می‌رود که بهترین تاثیر آن در راهکار مبتنی بر فضای شیء به دست آید. چراکه انتظار می‌رود مقابله با خطای جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع و هم مرجع سازی تصاویر چند طیفی در محیط شیء با دارا بودن مدل ارتفاعی زمین و پارامترهای دوربین، نتیجه‌ی بهتری داشته باشد که خود می‌تواند موضوعی برای تحقیقات

جدید باشد. اما با توجه به راهکار مبتنی بر فضای تصویر که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، مدل دوبعدی افاین با سرعت مناسب و نتیجه‌ی مطلوب‌تری نسبت به مدل پروژکتیو به عنوان مدل ریاضی انتقال این تحقیق انتخاب شده است. در آزمایش‌های انجام شده دقتی که از طریق مدل ریاضی پروژکتیو حاصل شده است از ۰٫۸ پیکسل تا ۱٫۲ پیکسل است که مدل افاین نتیجه‌ی مطلوب‌تری را در این تحقیق داشت که در بخش نتایج قابل مشاهده است. همچنین از دیگر چالش‌های موجود در این تحقیق می‌توان استفاده بلوکی از تصاویر را نام برد چراکه در این تحقیق هم مرجع سازی تک تصویر مد نظر بوده و باید نتیجه‌ی الگوریتم بر روی بلوکی از تصاویر را بررسی نمود.

در این تحقیق یک روش جدید برای هم مرجع سازی تصاویر هوایی، بر پایه‌ی الگوریتم SURF، بخش‌بندی تصویر همراه با پنجره‌ی محلی ارائه شد. از دوربین چند طیفی Red-Edge نیز که شامل باندهای قرمز، سبز، آبی، مادون قرمز نزدیک و Red-Edge استفاده شده است. این تحلیل تصویر نشان می‌دهد که آشکارساز SURF با سرعت پردازش بالا برای استخراج نقاط متناظر مناسب است. انتخاب یک پنجره مناسب برای تصاویر با محتویات و اختلاف ارتفاعات زیاد، برای استخراج نقاط در سرتاسر تصویر بسیار کارآمد است که باعث افزایش ۴۰ تا ۹۰ برابری تعداد نقاط در حالت عادی و بدون پنجره است.

هرچه تعداد عوارض یک تصویر بیشتر باشد، تعداد نقاط استخراج شده بیشتر است و هرچه ابعاد پنجره کوچک‌تر باشد، دقت تناظر یابی بیشتر است. اما اگر در تصاویر اختلاف ارتفاعات کمی وجود داشته باشد، انتخاب پنجره تنها زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. در این تحقیق اندازه پنجره‌ی مناسب تقریباً یک‌دهم اندازه تصویر انتخاب شده است. علاوه بر این مقدار RMSE در راستای x و y به‌طور میانگین ۰٫۲۸ پیکسل برای روش پیشنهادی در داده سوم است که بیانگر این است که روش پیشنهادی از روش‌های دیگر و هم مرجع سازی‌های خودکار ArcGIS و ENVI بهتر است. در روش پیشنهادی برای داده‌ی سوم، به طور میانگین از بین ۱۸۵۶ نقطه با بزرگی خطایی از ۲ تا ۷ پیکسل و بیشتر، که اکثر آن‌ها برای بالای درختان می‌باشند، به مقدار ۱۵۴۱ نقطه مقابله شده و دقت آن‌ها به زیر ۰٫۵ پیکسل کاهش یافته است که حاکی از رسیدن به دقت ۸۳ درصدی در برخورد و مقابله با چنین خطایی است. علاوه بر آن، روش پیشنهادی هیچ‌گونه نیازی به ورود نقطه توسط کاربر به صورت دستی ندارد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در تحقیقات آینده، برای رسیدن به نتیجه‌ی بهتر، فضای شیء و مدل ریاضی پروژکتیو، نیاز به بررسی بیشتر دارد. برای ارزیابی انتخاب پنجره و الگوریتم استخراج نقطه نظیر SURF و سایر آشکارسازها به منظور هم مرجع سازی تصاویر سنجش از دور و داده‌های هوایی به تحقیقات بیشتری نیاز است. به عنوان نمونه، الگوریتم UR-

- via sparse and dense feature matching", JOSA A, Vol. 33, 1313-1322, 2016.
- [5] Zhao, Xiaoyang, Jian Zhang, Chenghai Yang, Huaibo Song, Yeyin Shi, Xingen Zhou, Dongyan Zhang, and Guozhong Zhang, "Registration for Optical Multimodal Remote Sensing Images Based on FAST Detection, Window Selection, and Histogram Specification", Remote Sensing, Vol. 10, 2018.
- [6] Grant, Barbara G, "UAV imagery analysis: challenges and opportunities", Long-Range Imaging II, vol. 10204, 2017.
- [7] Zhang, Jian, Chenghai Yang, Huaibo Song, Wesley Hoffmann, Dongyan Zhang, and Guozhong Zhang, "Evaluation of an airborne remote sensing platform consisting of two consumer-grade cameras for crop identification", Remote Sensing, Vol. 8, 2016.
- [8] Kelcey, Joshua, and Arko Lucieer, "Sensor correction and radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing", In The 12th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 39, pp. 393-398, 2012.
- [9] Dehaan, Remy, "Evaluation of Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Derived Imagery for the Detection of Wild Radish in Wheat", Charles Sturt University: Albury-Wodonga, Australia, 2015.
- [10] McKee, Mac, "The remote sensing data from your UAV probably isn't scientific, but it should be!", In Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping II, vol. 10218, International Society for Optics and Photonics, 2017.
- [11] Joglekar, Jyoti, and Shirish S. Gedam, "Area based image matching methods—A survey", Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng, Vol. 2, pp. 130-136, 2012.
- [12] Le Moigne, Jacqueline, Nathan S. Netanyahu, and Roger D. Eastman, eds. *Image registration for remote sensing*, Cambridge University Press, 2011.
- [13] Hong, Gang, and Yun Zhang, "Combination of feature-based and area-based image registration technique for high resolution remote sensing image", In 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 377-380, IEEE, 2007.
- [14] Behling, Robert, Sigrid Roessner, Karl Segl, Birgit Kleinschmit, and Hermann Kaufmann, "Robust automated image co-registration of optical multi-sensor time series data: Database generation for multi-temporal landslide detection", Remote Sensing, Vol. 6, pp. 2572-2600, 2014.
- [15] Habib, Ayman F., and Rami I. Alruzouq, "Line-based modified iterated Hough transform for automatic registration of multi-source imagery", The Photogrammetric Record, Vol. 19, pp. 5-21, 2004.
- [16] Xu, Fang, Huai Yu, Jinwang Wang, and Wen Yang, "Accurate Registration of Multitemporal UAV Images Based on Detection of Major Changes", In 2018 21st

SIFT و DOBSS مورد بررسی قرار گرفته و تلفیق آن‌ها با روش پیشنهادی، نتیجه‌ی بهتری حاصل شود. همچنین می‌توان راهکارهای نوین را در بخش تناظریابی، نظیر کنترل شبکه‌ی چهار ضلعی مورد بررسی قرار داد. از طرفی این راهکار باید بر روی حجم بالاتری نظیر یک بلوک از تصاویر چند طیفی مورد بررسی قرار بگیرد.

پوست

معادلات ریاضی الگوریتم RANSAC

هر دو الگوریتم RANSAC و MSAC در ابتدا یک مدل افاین تقریبی را با ۳ نقطه‌ی تصادفی تخمین می‌زنند. سپس مدل انتقال به‌وسیله‌ی یک تابع هدف به هم‌ه‌ی نقاط برازش داده می‌شود که در معادله‌ی ۳ نمایش داده‌شده است.

$$c = \sum_i p(e_i^2) \quad (3)$$

در رابطه ۳، i تعداد نقاط متناظر، e مقدار خطا و p احتمال نقاط اشتباه است که در رابطه ۴ معرفی شده است.

$$p(e_i^2) = \begin{cases} I & \text{if } e_i^2 < T_m \\ T_m & \text{if } e_i^2 \geq T_m \end{cases} \quad (4)$$

T_m حد آستانه‌ای است بدین معنی که کدامیک از نقاط متناظر اشتباه می‌باشند. I یک متغیر است که اختلاف بین RANSAC و MSAC را معرفی می‌کند. برای RANSAC خطا با رابطه‌ی ۵ بیان می‌شود.

$$p(e_i^2) = I = 0, \text{ if } e_i^2 < T_m \quad (5)$$

رابطه ۵ بدین معنی است که نقاط متناظر اشتباه هیچ تأثیری بر روی ایجاد مدل انتقالی ندارد. برای MSAC هم، خطا از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$p(e_i^2) = I = e_i^2, \text{ if } e_i^2 < T_m \quad (6)$$

بدین معنی که هر یک از نقاط متناظر که برای تعریف مدل انتقال مورد استفاده قرار گرفته است، در تابع هدف اثر متفاوت دارند [۵].

مراجع

- [1] Aicardi, Irene, Francesco Nex, Markus Gerke, and Andrea Lingua, "An image-based approach for the co-registration of multi-temporal UAV image datasets", Remote sensing Vol. 8, 2016.
- [2] Pritt, Mark, and Michael Alan Gribbons, "Automated registration of synthetic aperture radar imagery with high resolution digital elevation models", U.S. Patent, Vol. 8, 2014.
- [3] Tommaselli, Antonio, Mauricio Galo, Marcus de Moraes, José Marcato, Carlos Caldeira, and Rodrigo Lopes. "Generating virtual images from oblique frames", Remote Sensing, Vol. 5, pp. 1875-1893, 2013.
- [4] Chen, Jun, Linbo Luo, Chengyin Liu, Jin-Gang Yu, and Jiayi Ma. "Nonrigid registration of remote sensing images

computer vision, pp. 404-417, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.

- [30] Harris, Christopher G., and Mike Stephens, "A combined corner and edge detector", Alvey vision conference, vol. 15, pp. 10-5244, 1988.
- [31] Rosten, Edward, and Tom Drummond, "Fusing points and lines for high performance tracking", ICCV, vol. 2, pp. 1508-1515, 2005.
- [32] Leutenegger, Stefan, Margarita Chli, and Roland Siegwart, "BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints", In 2011 IEEE international conference on computer vision (ICCV), pp. 2548-2555. Ieee, 2011.



محمد حسن پور دانشجوی کارشناسی ارشد رشته‌ی فتوگرامتری در دانشگاه تهران می‌باشد. همچنین مدرک کارشناسی خود را در رشته‌ی نقشه‌برداری از آموزشگاه سازمان نقشه‌برداری اخذ نموده است. زمینه تحقیقاتی وی پردازش و هم مرجع سازی تصاویر می‌باشد.



فرزانه دادرس جوان استادیار و عضو هیات علمی دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران می‌باشد. ایشان دکتری خود را در رشته‌ی فتوگرامتری در دانشگاه تهران اخذ نموده و تحقیقات و مهارت‌های ایشان در زمینه نقشه‌برداری ژئوماتیک، ناوبری، فتوگرامتری و ادغام داده‌های مکانی می‌باشد.



فرهاد صمدزادگان استاد تمام و عضو هیات علمی دانشکده‌ی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی دانشگاه تهران می‌باشد. مدرک دکتری خود را در سال ۱۳۸۰ در رشته‌ی فتوگرامتری از دانشگاه تهران اخذ نموده است. زمینه تحقیقات ایشان نقشه‌برداری، ناوبری، فتوگرامتری و سیستم اطلاعات مکانی می‌باشد.



نیما زرین پنجه استادیار و عضو هیات علمی دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری دانشگاه آزاد اسلامی قزوین می‌باشد. وی دکتری خود را در سال ۹۱ در رشته فتوگرامتری در دانشگاه تهران اخذ نموده است. زمینه تحقیقات ایشان نقشه‌برداری، فتوگرامتری، ناوبری و سیستم اطلاعات مکانی می‌باشد.

International Conference on Information Fusion (FUSION), pp. 1480-1485. IEEE, 2018.

- [17] Chen, Yanjia, Xiuwei Zhang, Yanning Zhang, Stephen John Maybank, and Zhipeng Fu, "Visible and infrared image registration based on region features and edginess", Machine Vision and Applications, Vol. 29, pp. 113-123, 2018.
- [18] Sedaghat, Amin, Mehdi Mokhtarzade, and Hamid Ebadi, "Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 49, pp. 4516-4527, 2011.
- [19] Sedaghat, Amin, and Hamid Ebadi, "Distinctive order based self-similarity descriptor for multi-sensor remote sensing image matching", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 108, pp. 62-71, 2015.
- [20] Sedaghat, Amin, Hamid Ebadi, and Mehdi Mokhtarzade, "Image matching of satellite data based on quadrilateral control networks", The Photogrammetric Record, Vol. 27, pp. 423-442, 2012.
- [21] Gan, Hao, Won Suk Lee, and Victor Alchanatis, "A photogrammetry-based image registration method for multi-camera systems—With applications in images of a tree crop", Biosystems engineering, Vol. 174, pp. 89-106, 2018.
- [22] Jhan, Jyun-Ping, Jiann-Yeou Rau, and Cho-Ying Huang, "Band-to-band registration and ortho-rectification of multilens/multispectral imagery: A case study of MiniMCA-12 acquired by a fixed-wing UAS", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 114, pp. 66-77, 2016.
- [23] Jhan, J. P., Jiann-Yeou Rau, N. Haala, and M. Cramer, "Investigation of parallax issues for multi-lens multispectral camera band co-registration", The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 42, 2017.
- [24] Jhan, Jyun-Ping, Jiann-Yeou Rau, and Norbert Haala, "Robust and adaptive band-to-band image transform of UAS miniature multi-lens multispectral camera", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 137, pp. 47-60, 2018.
- [25] Sunita Devi, Veena, "Measurement of relief displacement from vertical photograph", IJSETR, Vol. 3, pp. 2800-2805, 2014.
- [26] Lowe, David G, "Object recognition from local scale-invariant features", iccv, vol. 99, pp. 1150-1157. 1999.
- [27] Lindeberg, Tony, "Feature detection with automatic scale selection", International journal of computer vision, Vol. 30, pp. 79-116, 1998.
- [28] Yang, K., Tang, L., Liu, X., Dingxiang, W.U., Bian, Y., Zhenglong, L.I., "Differen source image registration method based on texture common factor", Comput. Eng., Vol. 42, pp. 233-237, 2016.
- [29] Bay, Herbert, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool, "Surf: Speeded up robust features", In European conference on