

ارائه یک الگوریتم خودکار مبتنی بر هیستوگرام زاویه‌ای به منظور ثبت هندسی تصاویر رادار با دریچه مصنوعی

رضا شاه‌حسینی^{۱*}، مصطفی اسمعیلی^۲، عبدالرضا صفری^۳، سعید همایونی^۴، جلال امینی^۲ و حمید عزت‌آبادی‌پور^۵

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۴- استادیار گروه جغرافیا، محیط زیست و ژئوماتیک، دانشگاه اتاوا، کانادا

۵- مربی رشته مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۲۸

چکیده

ثبت هندسی تصاویر راداری و اپتیکی، از پیش‌پردازش‌های مهم در کاربردهای سنجش از دوری از جمله در روش‌های کشف تغییرات و پردازش‌های مبتنی بر تولید اینترفروگرام محسوب می‌شود. به علت سطح نویز بالای تصاویر راداری و ناپستگی زمانی-مکانی شدید بین این تصاویر، ثبت هندسی این تصاویر نسبت به یکدیگر با مشکلات بیشتری همراه است. چراکه پیدا کردن عوارض مشابه در این نوع تصاویر به علت وجود سطح نویز بالا، به سختی قابل انجام است. روش‌های غیر خودکار موجود فرآیندی زمان‌بر بوده و در اکثر مواقع با شکست روبرو می‌شوند، چرا که اختلافات موجود بین دو سیستم تصویربرداری و تصاویر اخذ شده، باعث بروز اختلاف طیفی بین پیکسل‌های متناظر می‌شود. از طرفی دیگر استفاده از نقاط شبکه‌ای به عنوان نقاط گره‌ای در فرآیند ثبت هندسی تصاویر، قابلیت اطمینان این فرآیند را به شدت کاهش می‌دهد. این درحالیست که استفاده از نقاط گوشه در تصاویر رادار می‌تواند این مسئله را حل کند. به همین علت، در این مقاله، الگوریتمی خودکار جهت ثبت هندسی تصاویر راداری با دریچه مصنوعی که در زمان، مکان، موقعیت و ارتفاع متفاوتی اخذ شده‌اند، پیشنهاد و پیاده‌سازی شده‌است. این روش از نقاط گوشه که بصورت خودکار از تصاویر اصلی و فرعی استخراج می‌شوند، به عنوان نقاط گره‌ای استفاده می‌کند و بر خلاف الگوریتم‌های مرسوم، به عمل تطابق نیاز ندارد. این الگوریتم بر روی سه مجموعه داده راداری با دریچه مصنوعی اعمال شد. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا روش پیشنهادی در فرآیند ثبت هندسی متقابل تصاویر راداری، برای مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن و مجموعه داده مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن به ترتیب ۰.۳۵، ۰.۲۹ و ۰.۴۳ بدست آمد. آنالیز مقایسه‌ای دقت روش پیشنهادی با روش مبتنی بر درون‌یابی همگشت‌مبنای درجه ۳ نشان داد که روش پیشنهادی به ترتیب برای مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن و مجموعه داده مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن، ۵٪، ۵٪ و ۹٪ دقت ثبت تغییرات را نسبت به روش مبتنی بر درون‌یابی همگشت‌مبنای درجه ۳ بهبود بخشید. نتایج بدست آمده، نشان دهنده کارایی و دقت بالای الگوریتم پیشنهادی در سطح زیر پیکسل، در ثبت هندسی متقابل تصاویر راداری است. همچنین ثابت شد که الگوریتم پیشنهادی در مواردی که زاویه چرخش و مقیاس بین دو تصویر اصلی و فرعی، مقادیر بزرگی دارند، کارایی بالایی دارد.

کلیدواژه‌ها: ثبت تصاویر، تصاویر رادار با دریچه مصنوعی، روش‌های مبتنی بر ویژگی، عملگر هریس، همبستگی متقابل

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران-میدان انقلاب-خیابان کارگر شمالی-بالا تر از چهارراه امیرآباد- دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران تلفن: ۰۹۱۲۲۱۶۱۹۴۹، ۰۲۱۶۱۱۱۴۲۵۶

۱- مقدمه

به منظور ثبت هندسی متقابل^۱ چند تصویر با یکدیگر، یک تصویر به عنوان تصویر اصلی^۲ و مابقی تصاویر، به عنوان تصاویر فرعی^۳ در نظر گرفته می شوند. ثبت هندسی تصاویر با یکدیگر منجر به انطباق تصاویر از نقطه نظر هندسی می گردد. اولین روش های ثبت هندسی تصاویر به صورت سنتی قبل از سال ۱۹۹۲ شروع شد. اخیراً روش های خودکار و نیمه خودکار زیادی بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند [۱]، [۲]. روش های ثبت تصاویر به دو گروه اصلی روش های مبتنی بر ویژگی^۴، روش های مبتنی بر سطح^۵ تقسیم می شوند.

در روش های مبتنی بر ویژگی، با استفاده از ویژگی های مشابه موجود در دو تصویر، که شامل (۱) ویژگی های مبتنی بر ناحیه^۶، که با روش های قطعه سازی^۷ آشکار می شوند، (۲) ویژگی های مبتنی بر خط^۸ که با روش های استاندارد آشکارسازی لبه^۹ بدست می آیند و (۳) ویژگی های مبتنی بر نقطه^{۱۰} همانند تقاطع خطوط، گوشه ها و مرکز نواحی بسته، به ثبت هندسی دو تصویر، می پردازند [۳]. در این میان، معمولاً انتخاب خودکار ویژگی ها کارایی بالاتری بدست می دهد. از آنجایی که بسیاری از ویژگی های پیشنهاد شده، وابسته به خصوصیات درجه خاکستری نیستند، بنابراین برای ثبت هندسی تصاویری که با چند ماهواره اخذ شده اند، مناسب تر می باشند. روش های مبتنی بر ویژگی دارای کارایی بالایی هستند، اما تنها

در مواردی کاربرد دارند که اطلاعات ویژگی در هر دو تصویر اصلی و فرعی بخوبی حفظ شوند [۴] [۵]. در روش های مبتنی بر سطح، معمولاً یک پنجره ای از نقاط در نظر گرفته می شود، تا با استفاده از روش های اندازه گیری مقدار همبستگی، موقعیت های با همبستگی بالا استخراج شوند. از پرکاربردترین این روش ها می توان به روش های همبستگی متقابل نرمال شده^{۱۱} و روش مجموع مربعات تفاضل^{۱۲} اشاره کرد. روش های مبتنی بر سطح، بدون اینکه از آنالیزهای ساختاری استفاده کنند، تنها از خصوصیات شدت درجه خاکستری پیکسل ها در دو تصویر اصلی و فرعی استفاده می کنند [۶]. این روش ها نسبت به تغییرات شدت درجه خاکستری حساس هستند. در بسیاری از مواقع این روش بخوبی عمل می کند و نسبت به روش های مبتنی بر ویژگی قابلیت اطمینان بالاتری بدست می دهند. اما اگر دوران بین دو تصویر خیلی زیاد باشد، مقادیر همبستگی متقابل بین دو تصویر، به میزان زیادی تحت تأثیر این اختلافات قرار گرفته و در نتیجه تناظر بین ویژگی های استخراج شده از پنجره های موجود در تصاویر، بسختی بدست می آید [۷]. [۸]

جهت حل این مشکل، روش های زیادی جهت تخمین پارامتر دوران بین دو تصویر ارائه شدند. ژنگ و چلاپا^{۱۳} روشی جهت تعیین پارامتر دوران بین دو تصویر اصلی و فرعی پیشنهاد کردند. در این روش از مدل لامبرتی برای مدل کردن تصاویر استفاده شد. در این روش، زاویه چرخش با محاسبه اختلاف بین جهت های روشنایی به دست می آید. این روش در بسیاری از مواقع خوب عمل می کند، اما در مواردی که تصویر شامل تعداد زیادی ساختمان و عارضه باشد، ممکن است که ویژگی های با تطابق^{۱۴} کاذب به دست دهد [۹].

11 Normalized Cross Correlation

12 Sum of Squared Difference

13 Zheng & Chellappa

14 Matching

1 Corregistration

2 Master Image

3 Slave Images

4 Feature Base

5 Area Base

6 Region Feature

7 Segmentation

8 Line Feature

9 Edge Detection

10 Point Feature

همکارانش با استخراج نقاط با همدوسی بالا (پراکنش گر غالب) در تصاویر راداری و استفاده از این نقاط جهت ثبت هندسی متقابل^۹ تصاویر اصلی و فرعی، دقت این روش را بهبود بخشید. جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی از سری زمانی تصاویر راداری مربوط به منطقه شهری در منطقه آناتولی ترکیه استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده دقت بالای روش ثبت هندسی پیشنهادی بر اساس شاخص پایداری دامنه می‌باشد [۱۴]. ناتسوآکی^{۱۰} و همکارانش یک روش ثبت هندسی متقابل محلی و غیرخطی که از نقاط منفرد به عنوان معیار ارزیابی استفاده می‌شود، پیشنهاد دادند. از این روش جهت افزایش دقت ثبت هندسی متقابل در فرآیند تولید مدل رقومی زمین استفاده شد. نتایج تجربی ثابت کرد که استفاده از روش پیشنهادی، نسبت سیگنال به نویز را در مدل رقومی زمین تولید شده، افزایش می‌دهد [۱۵]. تنگ^{۱۱} و همکارانش یک روش ثبت خودکار جهت ثبت هندسی متقابل تصاویر راداری هوابرد با گذر تکراری^{۱۲} ارائه کرد. روش پیشنهادی مبتنی بر ترکیب تبدیل فوریه^{۱۳} و الگوریتم ضرایب همبستگی^{۱۴} در قالب یک طرح چند مقیاسی^{۱۵} می‌باشد. جهت ارزیابی دقت روش پیشنهادی از تصاویر راداری مربوط به ماهواره آلوس و سنجنده پالسار^{۱۶} و ماهواره رادارست-۲^{۱۷} استفاده شد. نتایج بدست آمده، دستیابی به دقت زیرپیکسل الگوریتم خودکار ثبت هندسی متقابل پیشنهادی را بدون نیاز به داشتن دانش قبلی از تصاویر راداری نشان می‌دهد [16]. زو و لی^{۱۸} جهت ثبت

روش‌های زیادی بر پایه تبدیلات هاف^۱ ارائه شده تا به حل این مشکل بپردازد. این روش فضای ویژگی را به فضای پارامتر می‌نگارد. در این الگوریتم، از روشی مبتنی بر رای‌گیری، برای تخمین مقدار پارامتر دوران در فضای پارامتر استفاده می‌کند. این روش‌ها دارای هزینه محاسباتی بسیار بالایی هستند [۱۰].

شخار^۲ و همکارانش نیز یک روش جهت ثبت هندسی تصاویر ارائه داد. این روش بسیار شبیه روش تبدیلات هاف است. اما از استراتژی جستجوی متفاوتی جهت حل این مشکل استفاده می‌کند. در این روش، از مکانیزم اجتماع ویژگی‌ها، جهت تخمین مقادیر پارامترهای تبدیل، شامل دوران، انتقال و مقیاس استفاده می‌شود [۱۱]. روش تبدیل هاف، در مواردی که ویژگی‌های خطوط و نقاط در دو تصویر بخوبی حفظ شوند، کارایی و دقت بالایی دارد. شیه^۳ و همکارانش، از روشی مبتنی بر لبه^۴، برای تخمین پارامتر جهت^۵ دوران، قبل از اجرای مرحله شباهت، پیشنهاد دادند. در این روش از تبدیل موجک^۶ به منظور شناسایی ویژگی‌های نقطه‌ای استفاده شد. جهت هر یک از ویژگی‌های نقطه‌ای، بر اساس جهت لبه‌ها تخمین زده می‌شود [۱۲]. با محاسبه اختلاف جهت هر یک از ویژگی‌های نقطه‌ای متناظر در تصاویر اصلی و فرعی، هیستوگرام زاویه‌ای تشکیل می‌شود و از آن، اختلاف جهت بین تصاویر با همپوشانی جزئی^۷ تخمین زده شود. این روش، در مواقعی که اختلاف جهت بزرگی بین دو تصویر وجود داشته باشد، بسیار خوب عمل می‌کند. با این وجود، اختلاف مقیاس بین دو تصویر نباید بیشتر از ۱۰٪ باشد [۱۳]. ونگ^۸ و

9 Corregistration

10 Natsuaki

11 Tang

12 Repeat Pass

13 Fourier Transform

14 Correlation Coefficient Algorithm

15 Multi Scale Plan

16 ALOS-PALSAR

17 RadarSAT-2

18 Zou و Li

1 Generalized Hough Transform

2 Shekhar

3 Hsieh

4 Edge Based

5 Orientation

6 Wavelet Transform

7 Partially

8 Wang

مشکل ثبت هندسی تصاویر در حالتی که دوران، مقیاس و انتقال بین تصاویر اصلی و فرعی خیلی بزرگ است، قابل استفاده است.

۲- روش شناسی

۲-۱- عملگر آشکارساز گوشه هریس

عملگر آشکارساز گوشه هریس یکی از پرکاربردترین عملگرهای آشکارسازی نقطه است که علت گسترش استفاده از این عملگر، مستقل بودن آن نسبت به پارامترهای دوران، مقیاس، تغییرات روشنایی و نویز تصاویر می باشد [۵]. این عملگر بر پایه تابع خودهمبستگی^۴ محلی سیگنال بنا نهاده شده است. در این روش، به منظور اندازه گیری تغییرات محلی قطعه ها، به ازای جابه جایی خیلی کم آنها در جهات مختلف، از تابع خودهمبستگی محلی استفاده می شود [۱۸].

مراوک^۵ فرم گسسته عملگر آشکارساز هریس را ارائه داد که گسسته بودن آن به جابه جایی قطعه ها برمی گردد [۱۹].

برای نقطه با مختصات (x, y) با مقدار جابجایی $(\Delta x, \Delta y)$ ، تابع خودهمبستگی بصورت زیر تعریف می شود:

رابطه (۱)

$$c(x, y) = \sum_w [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2$$

که در آن $I(\dots)$ نشان دهنده تابع تصویر و (x_i, y_i) نقاطی هستند که در هسته گوسین بوده و در نقطه (x, y) متمرکز شده است [۲۰].

تصویر انتقال داده شده، با استفاده از بسط مرتبه اول تیلور به صورت زیر تقریب زده می شود:

هندسی تصاویر، ابتدا از تبدیل موجک جهت استخراج اطلاعات با فرکانس بالا (لبه) استفاده کرده و در مرحله بعد از الگوریتم آشکارساز گوشه هریس^۱ جهت استخراج نقاط گوشه به عنوان نقاط گره ای در تصاویر راداری با دریچه مصنوعی استفاده شد. از سه مجموعه داده راداری مربوط به منطقه هنگ کنگ جهت آنالیز دقت روش پیشنهادی استفاده کرد. به منظور آنالیز مقایسه ای دقت، نقاط گره ای به دو شکل نقاط شبکه ای و نقاط گوشه از تصاویر راداری استخراج گردید. نتایج نشان داد که دقت روش پیشنهادی در فرآیند تولید اینترفروگرام^۲، با استفاده از نقاط گوشه بالاتر بوده و دارای قابلیت اطمینان بیشتری است [۱۷].

در این مقاله یک روش ثبت هندسی خودکار برای محاسبه پارامترهای دوران، مقیاس و انتقال دو بعدی بین تصاویر اصلی و فرعی رادار با دریچه مصنوعی ارائه می شود. این الگوریتم بر فرض های زیر استوار است:

اول اینکه، از آنجایی که فاصله بین ماهواره و عارضه موجود در زمین بسیار زیاد است، می توان فرض کرد که تصاویری که بوسیله این ماهواره ها اخذ می شوند، دارای محورهای نورانی موازی هستند. دوم اینکه، فرض می شود که تغییرات شدت درجه خاکستری بین تصاویر کوچک است. در این روش، تعدادی قطعه^۳ بروی تصاویر اصلی و فرعی در نظر گرفته می شود که مراکز آنها گوشه های موجود در تصاویر است که در مرحله قبل بوسیله عملگر هریس بدست آمده است. یک هیستوگرام زاویه ای برای محاسبه اختلاف جهت بین قطعه های این دو تصویر با روند رای دهی تشکیل می شود. پارامترهای دوران و مقیاس نیز با استفاده از هیستوگرام زاویه ای تعیین می شوند. این روش برای حل

1 Harris

2 Interferogram

3 Patch

4 Autocorrelation

5 Moravec

$$I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) \approx I(x_i, y_i) + [I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن $I_x(\cdot)$ و $I_y(\cdot)$ ، نشان‌دهنده مشتق در جهت x و y تصویر می‌باشند. با جایگذاری تقریب معادله (۲) در معادله (۱) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} c(x, y) &= \sum_w [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2 \\ &= \sum_w (I(x_i, y_i) - I(x_i, y_i) - [I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix})^2 \\ &= \sum_w (-[I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix})^2 \\ &= \sum_w ([I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i)] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix})^2 \\ &= [\Delta x \quad \Delta y] \begin{bmatrix} \sum_w (I_x(x_i, y_i))^2 & \sum_w I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i) \\ \sum_w I_x(x_i, y_i)I_y(x_i, y_i) & \sum_w (I_y(x_i, y_i))^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \\ &= [\Delta x \quad \Delta y] C(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

خواهد بود. این حالت نشان‌دهنده لبه است [۲۱]. اگر هر دو مقدار ویژه بزرگ باشند، در این حالت تابع خودهمبستگی محلی، دارای یک برآمدگی واضحی است. بنابراین تغییر در هر جهتی منجر به افزایش قابل توجهی در $C(x, y)$ خواهد شد. این حالت نشان‌دهنده گوشه می‌باشد [۲۲].

۲-۲ جهت قطعه‌های تصاویر

ماتریس کوواریانس متناظر با هریک از قطعه‌های موجود در تصویر، $P(i, j)$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$CPV_p = E\{(X - m_x)(X - m_x)^T\} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)، $X = \begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix}$ ، موقعیت پیکسل بوده

که در آن $C(x, y)$ ، ساختار شدت درجه خاکستری همسایه‌های محلی می‌باشد. با فرض اینکه λ_1 و λ_2 ، مقادیر ویژه ماتریس $C(x, y)$ باشد، این مقادیر ویژه یک توصیف غیردورانی (ناوردا نسبت به دوران) را تشکیل می‌دهند. در این رابطه، همواره شرایط زیر برقرار است.

اگر مقادیر λ_1 و λ_2 کوچک باشند، به طوریکه تابع خودهمبستگی محلی مسطح باشد، ناحیه موجود در پنجره، تقریباً دارای شدت ثابتی خواهد بود. اگر یکی از مقادیر ویژه بزرگ و دیگری کوچک باشد، در این حالت تابع خودهمبستگی محلی دارای برآمدگی بوده، پس با یک جابجایی محلی در یک جهت (در طول برآمدگی)، باعث ایجاد یک تغییر کوچک در $C(x, y)$ و تغییر قابل توجه در جهت عمود بر آن

محاسبه می‌شوند [۲۳].

$$|COV_p - \lambda I| = 0 \quad \text{رابطه (۸)}$$

با حل معادله (۸)، مقادیر ویژه λ_1 و λ_2 به دست می‌آید. با فرض اینکه مقدار ویژه λ_1 بزرگتر از مقدار ویژه λ_2 باشد. در این حالت، بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه λ_1 و λ_2 ، که همان V_1 و V_2 هستند، بر هم عمود می‌باشند.

بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه λ_1 و λ_2 ، از حل معادله زیر به دست می‌آیند [۲۵]:

$$\begin{cases} V_1^T COV_p V_1 = \lambda_1 \\ V_2^T COV_p V_2 = \lambda_2 \end{cases} \quad \text{رابطه (۹)}$$

امتداد بردار ویژه V_1 به عنوان جهت قطعه $P(i, j)$ تصویر، تعریف می‌شود.

جهت محاسبه امتداد بردارهای ویژه V_1 و V_2 ، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، از روابط (۱۰) استفاده می‌شود [۲۳].

زوایای φ_1 و φ_2 متناظر با بردارهای ویژه V_1 و V_2 نیز، از روابط (۱۱) بدست می‌آیند [۲۳].

$$\tan 2\varphi_1 = \frac{2C_{12}}{C_{11} - C_{22}}$$

$$= \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})(j - m_{xj})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})^2 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(j - m_{xj})^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$m_x = \begin{pmatrix} m_{xi} \\ m_{xj} \end{pmatrix}$$

و مرکز جرم قطعه $P(i, j)$ در تصویر می‌باشد (ممان اینرسی مرتبه اول) [۲۴].
رابطه (۵)

$$\begin{cases} m_{xi} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m jp(i, j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)} \\ m_{xj} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ip(i, j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)} \end{cases}$$

از معادله اول خواهیم داشت:

$$COV_p = \frac{1}{N_2 - 1} \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن:

$$\begin{cases} C_{11} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})^2 \\ C_{12} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})(j - m_{xj}) \\ C_{12} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(j - m_{xj})(i - m_{xi}) \\ C_{22} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(j - m_{xj})^2 \end{cases}$$

با حل معادله (۸)، مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس

رابطه (۱۱)

به صورت $\varphi_t = \{\varphi_t^j, j = 1, 2, \dots, n_t\}$ محاسبه نمود
[۲۳].

به طور مشابه برای تصویر اصلی نیز می توان مجموعه ای
از قطعه ها به صورت $P_f = \{p_f^j, j = 1, 2, \dots, n_f\}$
ایجاد نمود و مجموعه جهت های متناظر با آن قطعه ها
را به صورت $\varphi_f = \{\varphi_f^j, j = 1, 2, \dots, n_f\}$
محاسبه کرد.

با فرض اینکه φ زاویه دورانی بین تصویر فرعی و
اصلی بوده و هر دو تصویر یک صحنه را پوشش دهند،
برای هر قطعه در تصویر فرعی p_t^j ، اختلاف جهت
این قطعه، با تمامی قطعه های موجود در تصویر اصلی
 $P_f = \{p_f^j, j = 1, 2, \dots, n_f\}$ به صورت زیر
محاسبه می شود.

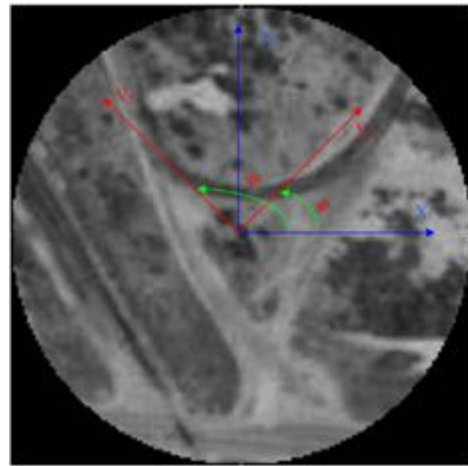
$$\Delta\varphi^l = |\varphi_t^j - \varphi_f^l|, \quad i = 1, 2, \dots, n_f \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

از آنجایی که دو تصویر اصلی و فرعی، یک صحنه را
پوشش می دهند، بنابراین یک قطعه p_f^m
در تصویر اصلی وجود دارد که متناظر با قطعه p_t^j
در تصویر فرعی می باشد. بنابراین
مقدار اختلاف جهت بین این دو قطعه، برابر
زاویه چرخش بین دو تصویر اصلی و فرعی می باشد
[۲۶].

$$\Delta\varphi^m = |\varphi_t^j - \varphi_f^l| = |\varphi| \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

می توان ثابت کرد که برای سایر قطعه ها در
تصویر اصلی، مقدار اختلاف جهت متفاوت خواهد بود.
اگر این اختلاف زاویه، برای تمامی قطعه ها
 $\{p_t^j, j = 1, 2, \dots, n_t\}$ در تصویر فرعی محاسبه شود،
در نهایت یک مجموعه اختلاف جهت
 $\Delta\varphi = \{\Delta\varphi^l, l = 1, 2, \dots, n_t \times n_f\}$ خواهیم داشت
و n_t عدد قطعه های متناظر با تصویر اصلی،

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_1 &= \arctan \left(\frac{\lambda_1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})(j - m_{xj})} \right) \\ \varphi_2 &= \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})(j - m_{xj})}{\lambda_2 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(i, j)(i - m_{xi})^2} \right) \end{aligned} \right.$$



شکل ۱: جهت قطعه در تصویر [۲۵]

که در آن φ_1 و φ_2 ، امتداد بردارهای ویژه V_1 و
 V_2 می باشند [۲۵]. بنابراین با استفاده از روابط بیان
شده در این قسمت می توان جهت هر یک از قطعه ها را
در دو تصویر اصلی و فرعی محاسبه کرد.

۲-۳ هیستوگرام زاویه ای برای پارامترهای دوران و مقیاس تصویر

۲-۳-۱ حالتی که مقیاس بین دو تصویر فرعی و
اصلی برابر یک است.

برای تصویر فرعی می توان مجموعه ای از قطعه ها
به صورت $P_t = \{p_t^j, j = 1, 2, \dots, n_t\}$ ایجاد کرد و در
ادامه مجموعه جهت های متناظر با آن قطعه ها را

۲-۳-۲ حالتی که در آن مقیاس بین تصاویر رفرنس و مشاهده شده برابر یک نیست.

در این حالت، با استفاده از یک روند رای دهی، پارامتر مقیاس این دو تصویر محاسبه می‌شود. در این روش، با تغییر در ابعاد قطعه‌ها در تصاویر و محاسبه هیستوگرام زاویه‌ای، مجموعه‌ای از هیستوگرام‌های زاویه‌ای به دست می‌آید. در مرحله بعد، هیستوگرام زاویه‌ای که دارای بیشترین مقدار تکرار است، انتخاب می‌شود [۲۳].

با فرض اینکه ابعاد قطعه‌ها در تصویر فرعی برابر $A_{ti} (i=1,2,...,n_1)$ و در تصویر اصلی برابر $A_{fi} (i=1,2,...,n_2)$ باشد، برای هر یک از زوج ابعاد قطعه‌ها در تصاویر، (A_{fi}, A_{ti}) ، یک هیستوگرام زاویه‌ای $H^k (k=1,2,...,n_1 \times n_2)$ و متناظر با آن یک مجموعه از اختلاف جهت $\Delta\phi^k (k=1,2,...,n_1 \times n_2)$ محاسبه می‌شود. در مرحله آخر، هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشینه تعداد تکرار در هیستوگرام انتخاب می‌شود.

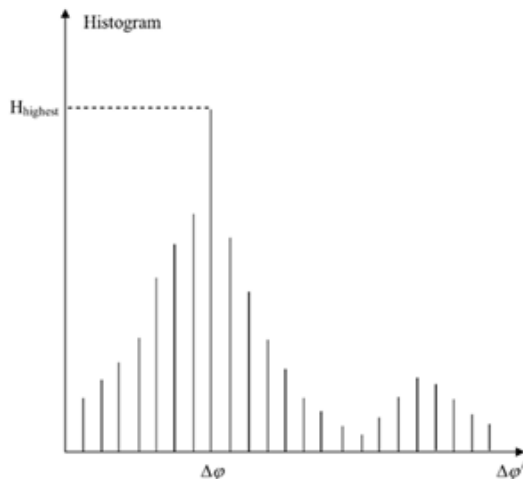
$$H_h = \max_k \{H^k, k=1,2,...,n_1 \times n_2\} \quad (۱۴)$$

با فرض اینکه A_f و A_t نشان دهنده ابعاد قطعه‌ای باشند که متناظر با هیستوگرام H_h با بیشینه تعداد تکرار در هیستوگرام است. مقدار مقیاس بین تصاویر اصلی و فرعی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$s = \sqrt{A_t / A_f} \quad (۱۵)$$

در نهایت، اختلاف جهت $\Delta\phi$ متناظر با هیستوگرام H_h زاویه چرخش بین دو تصویر اصلی و فرعی می‌باشد [۲۳].

تعیین خواهد شد. برای این زوج n_t قطعه‌های متناظر، مقدار اختلاف جهت، زاویه چرخش بین دو تصویر را به دست می‌دهد. سایر $n_t \times n_f - n_t$ اختلاف جهت، با یکدیگر متفاوت خواهند بود [۲۳].

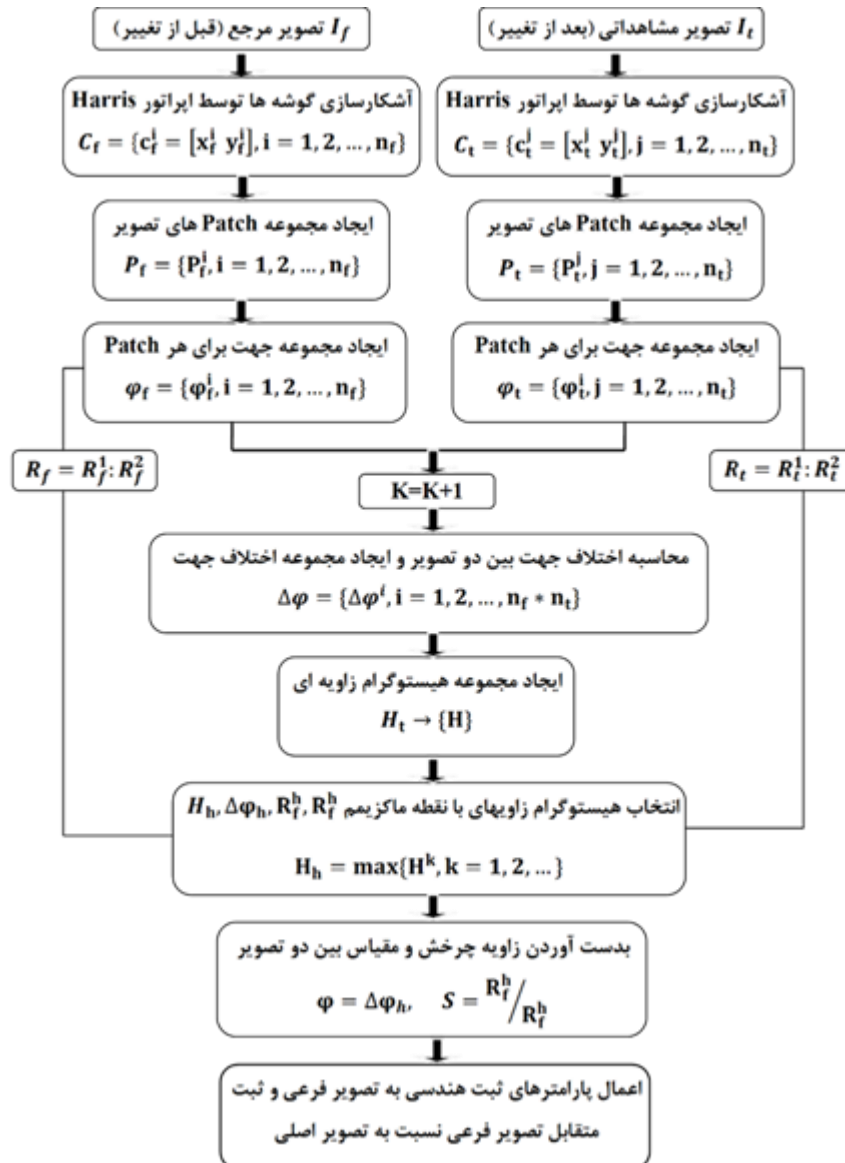


شکل ۲: هیستوگرام زاویه‌ای مربوط به اختلاف جهت‌های محاسبه شده

در این مرحله، یک هیستوگرام برای اختلاف جهت‌های محاسبه شده، ترسیم می‌شود. همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود، تعداد تکرارهای مقدار اختلاف جهت بین قطعه‌های متناظر در دو تصویر، از سایر مقادیر اختلاف جهت بیشتر است. به علت خطاهای محاسباتی و ابعاد قطعه‌ها، تعداد این تکرارها دقیقاً برابر n_t نخواهد بود. بر پایه این تئوری می‌توان زاویه چرخش بین دو تصویر اصلی و فرعی را محاسبه نمود. این عمل با استفاده از یک پروسه رای دهی بدست می‌آید. در این روش، در مرحله اول، اختلاف جهت تمامی قطعه‌ها در تصاویر اصلی و فرعی محاسبه شده و $\Delta\phi^l (l=1,2,...,n_t \times n_f)$ برای تمامی قطعه‌ها بدست می‌آید. در مرحله دوم یک هیستوگرام برای مقادیر $\Delta\phi^l (l=1,2,...,n_t \times n_f)$ ترسیم می‌شود و سرانجام $\Delta\phi$ متناظر با بیشینه تعداد تکرار در هیستوگرام، به عنوان زاویه چرخش بین تصاویر اصلی و فرعی در نظر گرفته می‌شود [۲۷].

۳- الگوریتم پیشنهادی

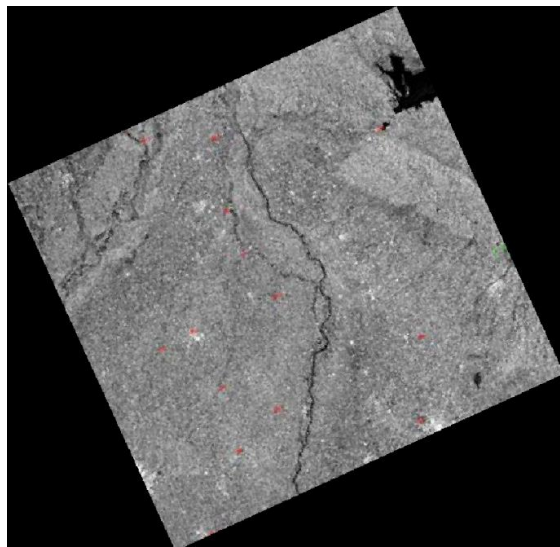
فلوچارت الگوریتم پیشنهادی ثبت خودکار تصاویر



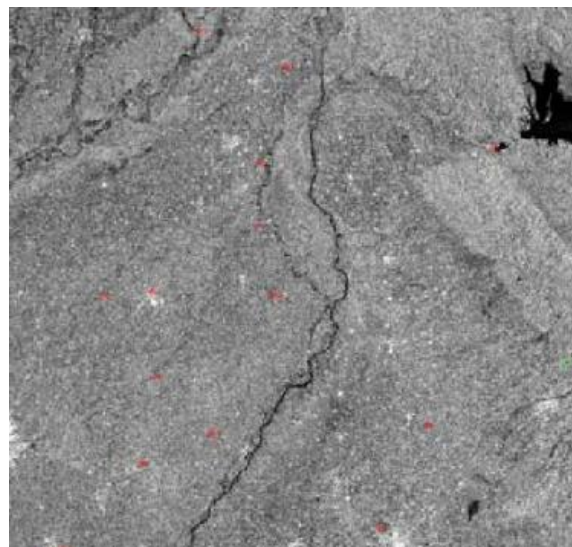
شکل ۳: الگوریتم پیشنهادی ثبت خودکار تصاویر راداری با دریچه مصنوعی

تشکیل داده می‌شود. در این مقاله از قطعه‌های دایره‌ای به‌منظور بررسی وضعیت دورانی هریک از قطعه‌ها استفاده شده‌است. همانطور که گفته شد، با تغییر در ابعاد قطعه، می‌توان پارامتر مقیاس را تخمین زد. پارامتر جهت برای هریک از قطعه‌های تصاویر، با استفاده از بردارهای ویژه محاسبه می‌شوند.

به‌منظور ثبت خودکار تصاویر راداری با دریچه مصنوعی، در یک روند چند مرحله‌ای، با اعمال عملگر هریس بر روی تصاویر اصلی و فرعی، به استخراج گوشه‌ها در این تصاویر پرداخته می‌شود. در مرحله بعد، قطعه‌های متناظر با هریک از این نقاط گوشه، در تصاویر اصلی و فرعی



ب



الف

شکل ۴: الف. تصویر اصلی ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالا اخذ شده در تاریخ ۱۷ آوریل ۲۰۰۳ و ب. تصویر فرعی ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالا اخذ شده در تاریخ ۲۳ فوریه ۲۰۰۴

۴- نتایج تجربی

۴-۱- منطقه مورد مطالعه و تصاویر راداری مورد استفاده

به منظور ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی، از سه مجموعه داده راداری در دو منطقه مطالعاتی مربوط به ماهواره‌های رادارست-۲ و تراسار-ایکس، استفاده شد. مجموعه داده اول مربوط به تصاویر دامنه^۱ ماهواره رادارست-۲ در باند C اخذ شده از منطقه باتالا^۲ در هندوستان است. تصویر قبل از تغییر (تصویر اصلی) در تاریخ ۱۷ آوریل ۲۰۰۳ با ابعاد (۵۱۲×۴۸۴) و تصویر بعد از تغییر (تصویر فرعی) در تاریخ ۲۳ فوریه ۲۰۰۴ با ابعاد (۸۲۲×۸۰۳)، از این منطقه اخذ شده‌اند. به علت وجود نویز لکه‌ای^۳ در این تصاویر، از فیلتر کوآن^۴ برای حذف این نویز استفاده گردید. تصاویر اصلی و فرعی بعد از اعمال فیلتر کوآن بترتیب در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده‌است.

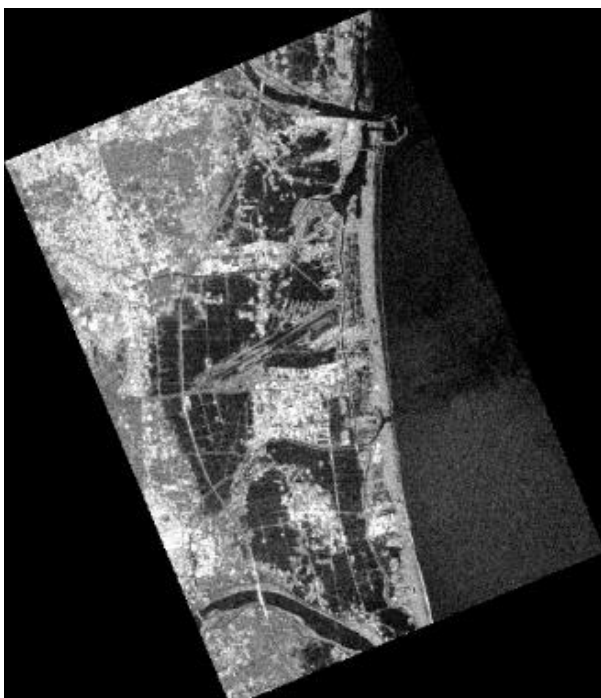
با محاسبه اختلاف جهت قطعه‌ها بین تصاویر اصلی و فرعی، یک هیستوگرام زاویه‌ای با روند رای‌دهی ایجاد می‌شود. اختلاف جهت متناظر با بیشینه مقدار تکرار در هیستوگرام زاویه‌ای، نماینده زاویه چرخش بین دو تصویر اصلی و فرعی می‌باشد. برای بررسی پارامتر مقیاس، با تغییر در شعاع دایره، ابعاد قطعه‌ها در تصاویر تغییر داده شده، تا جایی که قطعه‌های متناظر در دو تصویر اصلی و فرعی، یک صحنه را پوشش دهند. ابعاد مختلف قطعه‌های موجود در تصاویر، منجر به تشکیل هیستوگرام زاویه‌ای متفاوتی می‌شود. با انتخاب هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشینه مقدار تکرار، مقیاس بین دو تصویر، بدست می‌آید. در مرحله آخر، با اعمال پارامترهای محاسبه شده به تصویر فرعی، این تصویر نسبت به تصویر اصلی ثبت می‌شود.

1 Amplitude

2 Batala

3 Speckle Noise

4 Kuan



ب



الف

شکل ۵: الف. تصویر قبل از وقوع زلزله (تصویر اصلی) مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندی ژاپن اخذ شده در تاریخ ۱۷ مارس ۲۰۱۰ و ب. تصویر بعد از وقوع زلزله (تصویر فرعی) مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندی ژاپن اخذ شده در تاریخ ۱۲ مارس ۲۰۱۱

ماهواره تراسار-ایکس در باند X اخذ شده بصورت استریپ مپ^۴ از منطقه سندی در ژاپن است. تصویر قبل از وقوع زلزله در تاریخ ۲۰ اکتبر ۲۰۱۰ با ابعاد (۲۰۶۵×۲۳۷۹) و تصویر بعد از تغییر در تاریخ ۱۲ مارس ۲۰۱۱ با ابعاد (۳۰۳۳×۳۲۹۳)، از این منطقه اخذ شده‌اند. در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا از فیلتر لی با پارامتر انحراف معیار ۰.۶۵ و سپس فیلتر مدین با ابعاد پنجره ۵×۵ برای کاهش سطح نویز موجود در تصاویر استفاده گردید. شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)، تصاویر قبل و بعد از وقوع زلزله و بعد از انجام مرحله پیش‌پردازش را نشان می‌دهد.

مجموعه داده دوم مربوط به تصاویر دامنه ماهواره رادارست-۲ در باند C اخذ شده از منطقه سندی^۱ در ژاپن است. تصویر قبل از وقوع زلزله در تاریخ ۱۷ مارس ۲۰۱۰ با ابعاد (۱۴۴۵×۲۱۰۹) و تصویر بعد از تغییر در تاریخ ۱۲ مارس ۲۰۱۱ با ابعاد (۳۰۸۹×۳۲۹۳)، از این منطقه اخذ شده‌اند. در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا از فیلتر لی^۲ با پارامتر انحراف معیار ۰.۶۵ و سپس فیلتر مدین^۳ با ابعاد پنجره ۵×۵ برای کاهش سطح نویز موجود در تصاویر استفاده گردید. شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب)، تصاویر قبل و بعد از وقوع زلزله و بعد از انجام مرحله پیش‌پردازش را نشان می‌دهد.

مجموعه داده سوم مربوط به تصاویر دامنه

1 Sendai

2 LEE

3 Median Filter

4 Strip-Map



ب



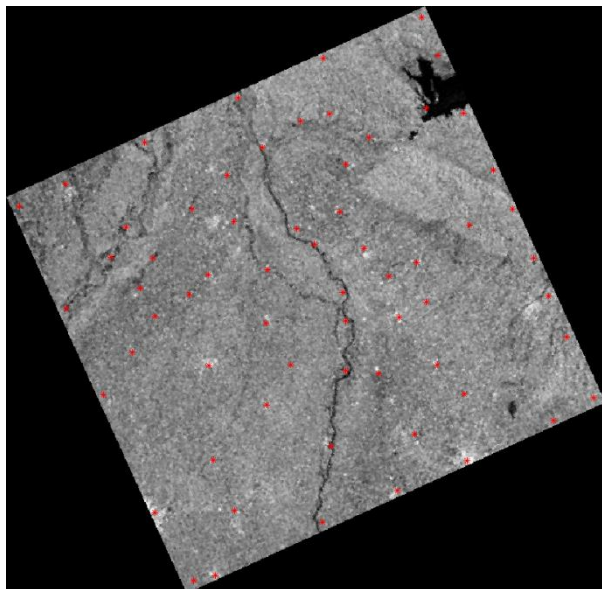
الف

شکل ۶: الف. تصویر قبل از وقوع زلزله (تصویر اصلی) مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن اخذ شده در تاریخ ۲۰ اکتبر ۲۰۱۰ و ب. تصویر بعد از وقوع زلزله (تصویر فرعی) مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن اخذ شده در تاریخ ۱۲ مارس ۲۰۱۱

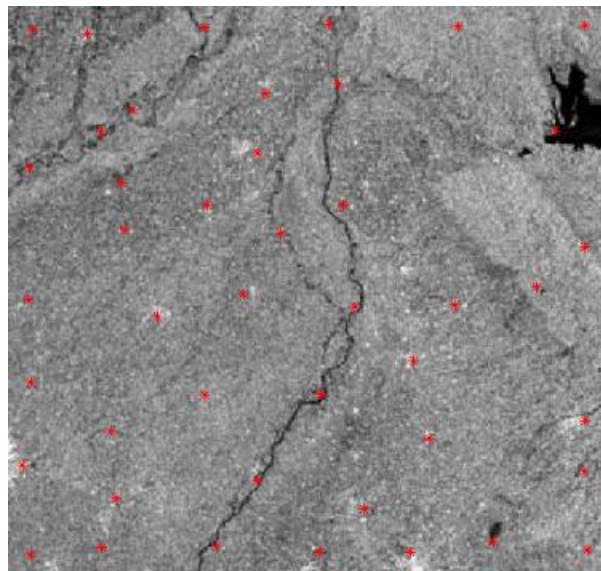
اصلی و فرعی مربوط به هر سه مجموعه داده راداری، در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹)، نشان داده شده است.

۴-۲- نتایج

نتایج مربوط به اعمال عملگر هریس بر روی تصاویر

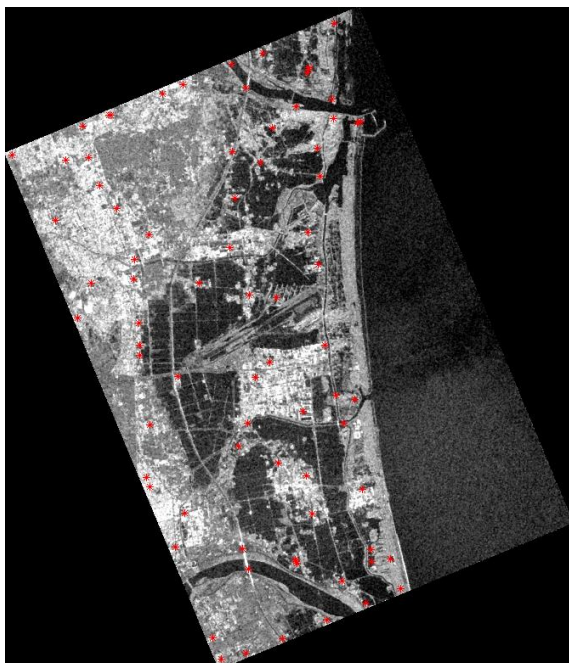


ب



الف

شکل ۷: الف: گوشه‌های استخراج شده در تصویر اصلی بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، ب: گوشه‌های استخراج شده در تصویر فرعی بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان

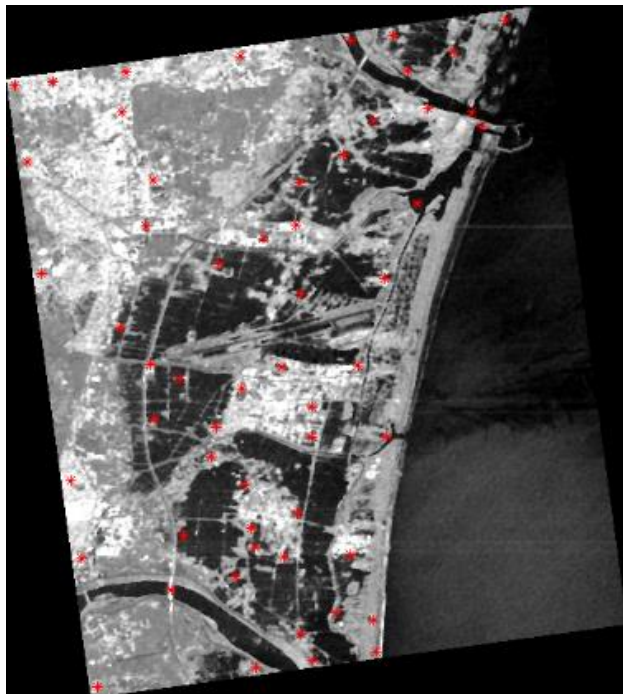


ب

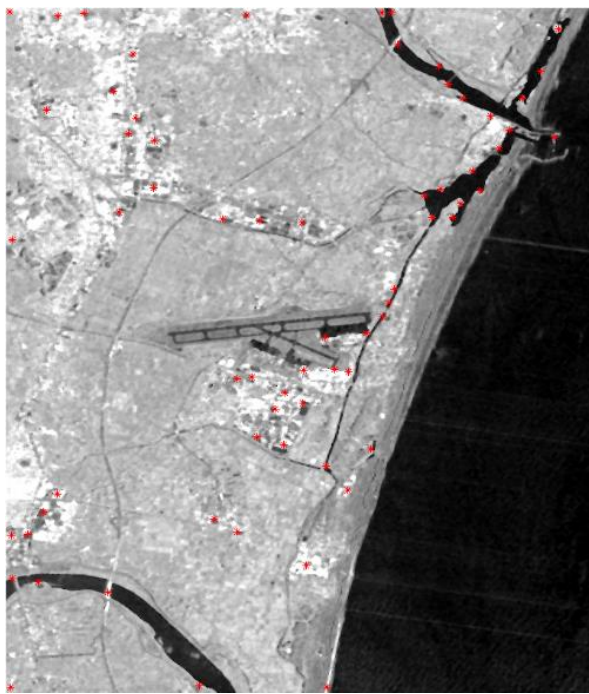


الف

شکل ۸: الف: گوشه‌های استخراج شده در تصویر قبل از وقوع زلزله بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره رادارست ۲ از منطقه سندای ژاپن، ب: گوشه‌های استخراج شده در تصویر بعد از وقوع زلزله بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن



ب

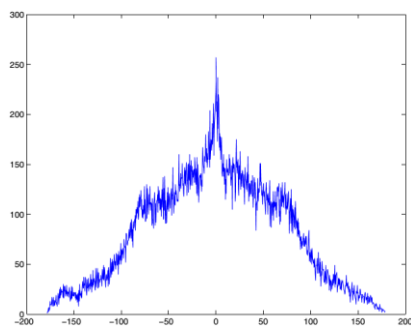


الف

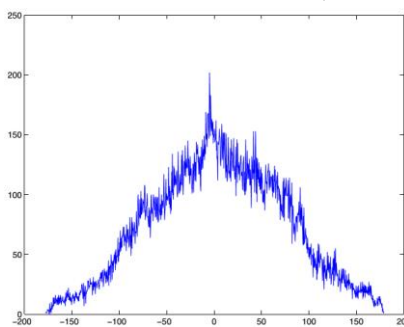
شکل ۹: الف: گوشه‌های استخراج شده در تصویر قبل از وقوع زلزله بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن، ب: گوشه‌های استخراج شده در تصویر بعد از وقوع زلزله بعد از اعمال عملگر هریس مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن

مربوط به مناطق ساختمانی است. شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشترین مقدار تکرار مربوط به هر سه مجموعه داده را نشان می‌دهند.

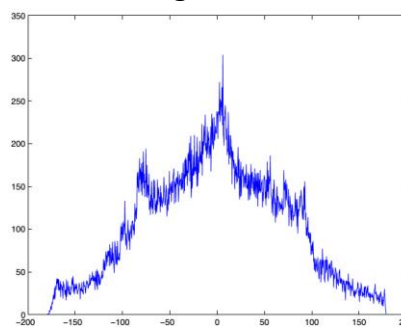
همانطور که در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹)، دیده می‌شود، الگوریتم استخراج گوشه هریس با وجود سطح نویز بالا در این سه مجموعه داده راداری، کارایی و دقت بالایی در استخراج نقاط گوشه دارد. بیشترین تعداد نقاط استخراج شده در منطقه سندی ژاپن



شکل ۱۲: هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشترین مقدار تکرار مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندی ژاپن



شکل ۱۱: هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشترین مقدار تکرار مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندی ژاپن



شکل ۱۰: هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشترین مقدار تکرار مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان

بین دو تصویر اصلی و فرعی تعیین می‌شوند. مقادیر پارامترهای مقیاس، دوران و انتقال بین دو تصویر اصلی و فرعی مربوط به هر سه مجموعه داده، در جدول (۱) نشان داده شده است.

با بررسی نمودارهای بدست آمده در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲)، می‌توان دریافت که با انتخاب هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشینه مقدار تکرار، پارامترهای دورانی و مقیاسی

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مقیاس، دوران و انتقال بین دو تصویر اصلی و فرعی

منطقه مورد مطالعه	مقیاس	دوران	انتقال در جهت محور x	انتقال در جهت محور y
ماهواره رادارست-۲ منطقه باتالا هندوستان	۱.۲۲۹۲	۲۴.۵۰	۱۹۵	۱۸۶
ماهواره رادارست-۲ منطقه سندی ژاپن	۱.۱۹۰۹	۲۲.۵۰	۵۴۰	۸۱۱
ماهواره تراسار-ایکس منطقه سندی ژاپن	۰.۶۱۶۸	۷.۸۰۰۰	۳۱۷	۳۶۱

نسبت به تصویر اصلی مربوط به هر سه مجموعه داده را نشان می‌دهند.

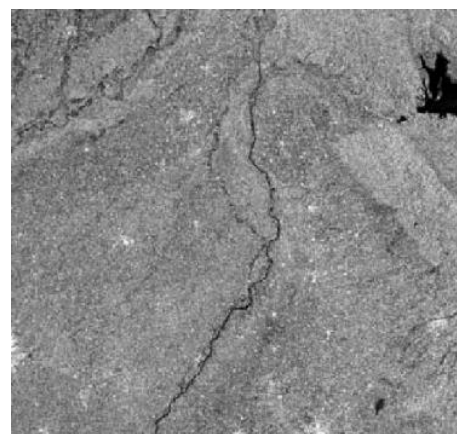
با اعمال پارامترهای محاسبه شده به تصویر فرعی، این تصویر نسبت به تصویر اصلی ثبت می‌شود. شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) تصویر فرعی ثبت شده



شکل ۱۵: تصویر ثبت شده بعد از تغییر نسبت به تصویر قبل از تغییر مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن



شکل ۱۴: تصویر ثبت شده بعد از تغییر نسبت به تصویر قبل از تغییر مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن



شکل ۱۳: تصویر ثبت شده فرعی نسبت به تصویر اصلی مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان

مربعات خطا^۳ برای نقاط متناظر گوشه در تصاویر اصلی و فرعی به‌عنوان معیار ارزیابی دقت ثبت هندسی تصاویر راداری نسبت به یکدیگر در نظر گرفته شد. همچنین، به‌منظور مقایسه کارایی و دقت ثبت هندسی روش پیشنهادی با روش‌های متداول ثبت هندسی متقابل تصاویر رادار با دریاچه مصنوعی، روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه^۴ بر روی هر سه مجموعه داده پیاده‌سازی شد. این روش که توسط میجرینگ و آنشر در سال ۲۰۰۳ ارائه شد، در اکثر نرم افزارهای رایج پردازش تصاویر راداری جهت ثبت هندسی متقابل این تصاویر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۸]. در جداول (۲)، (۳) و (۴)، به ترتیب مختصات نقاط متناظر گوشه در تصاویر اصلی و فرعی برای مجموعه داده‌های ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن و ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن به همراه

با مقایسه تصاویر فرعی ثبت شده بدست آمده (شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵)) با تصاویر اصلی نشان داده شده در شکل‌های (۴-الف، ۵-الف و ۶-الف) می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی بخوبی توانسته است که پارامترهای کانفورمال^۱ بین دو تصویر اصلی و فرعی را با وجود تمامی محدودیت‌های موجود در تصاویر راداری (نویز و ...) استخراج نماید. به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی الگوریتم پیشنهادی در ثبت خودکار تصاویر راداری برای هریک از این سه مجموعه داده، در مرحله اول با انجام عمل تناظریابی، موقعیت متناظر نقاط گوشه موجود در تصویر اصلی، در تصویر فرعی تعیین گردید. در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای تبدیل کانفورمال بدست آمده از الگوریتم پیشنهادی و اعمال تبدیل معکوس^۲ به این نقاط موجود در تصویر فرعی، موقعیت پیکسلی معادل آن نقاط در تصویر اصلی محاسبه شد. با محاسبه مجذور میانگین

3 Root Mean Square Error (RMSE)
4 Cubic Convolution Interpolation (CCI)

1 Conformal Parameters
2 Inverse Transformation

مقادیر اندازه بردار باقیمانده برای هریک از نقاط متناظر و مجذور میانگین مربعات خطا مربوط به روش پیشنهادی و روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲: مختصات نقاط متناظر گوشه در تصاویر اصلی و فرعی به همراه مقادیر اندازه بردار باقیمانده برای هریک از نقاط متناظر و مجذور میانگین مربعات خطا مربوط به روش پیشنهادی و روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
1	251	18	485	78	0.24	0.14
2	138	19	359	137	0.22	0.20
3	321	20	564	45	0.32	0.31
4	21	22	230	200	0.38	0.15
5	24	68	257	250	0.14	0.56
6	108	80	357	220	0.34	0.13
7	462	80	753	40	0.33	0.15
8	363	88	646	99	0.08	0.11
9	420	93	712	76	0.06	0.15
10	151	97	413	218	0.25	0.29
11	191	100	460	200	0.48	0.21
12	89	107	349	260	0.17	0.62
13	265	128	557	194	0.29	0.29
14	19	168	302	364	0.11	0.12
15	332	168	652	205	0.38	0.60
16	170	170	472	289	0.13	0.65
17	461	178	801	150	0.25	0.29
18	246	201	573	285	0.35	0.07
19	126	213	445	360	0.45	0.17
20	405	213	757	218	0.48	0.27
21	75	220	391	394	0.27	0.40
22	194	233	531	348	0.07	0.17
23	466	266	852	246	0.07	0.40
24	331	267	701	316	0.13	0.47
25	16	274	353	484	0.42	0.15
26	67	282	414	467	0.13	0.08
27	170	286	531	419	0.41	0.20
28	257	296	633	386	0.12	0.21
29	429	304	830	307	0.46	0.28

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
30	466	343	891	332	0.17	0.34
31	303	346	710	419	0.10	0.06
32	369	359	791	399	0.13	0.17
33	255	381	674	482	0.31	0.53
34	18	384	411	606	0.24	0.02
35	457	414	917	416	0.18	0.62
36	240	451	693	568	0.42	0.49
37	107	467	553	654	0.29	0.33
38	397	491	889	533	0.27	0.39
39	17	492	465	728	0.46	0.16
40	206	492	676	631	0.14	0.31
41	354	492	842	556	0.38	0.64
42	464	494	966	502	0.38	0.36
مجدور میانگین مربعات خطا					0.29	0.34

جدول ۳: مختصات نقاط متناظر گوشه در تصاویر اصلی و فرعی به همراه مقادیر اندازه بردار باقیمانده برای هریک از نقاط متناظر و مجدور میانگین مربعات خطا مربوط به روش پیشنهادی و روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
1	1018	35	1676	386	0.36	0.58
2	26	36	585	839	0.23	0.31
3	684	36	1309	539	0.63	0.07
4	1622	38	2342	114	0.58	0.20
5	648	39	1271	559	0.37	0.11
6	1315	51	2010	268	0.41	0.21
7	1925	74	2692	15	0.39	0.33
8	300	92	912	776	0.14	0.39
9	1512	112	2255	245	0.20	0.34
10	31	113	626	921	0.31	0.65
11	1152	114	1859	411	0.15	0.38
12	589	117	1241	671	0.56	0.70
13	94	161	717	945	0.13	0.47
14	894	163	1598	583	0.15	0.71

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
15	101	165	726	947	0.11	0.18
16	1810	248	2644	259	0.15	0.50
17	643	260	1366	804	0.29	0.21
18	1696	268	2528	333	0.21	0.50
19	265	285	961	1004	0.62	0.51
20	153	291	841	1061	0.29	0.05
21	94	298	779	1096	0.12	0.19
22	362	310	1080	987	0.60	0.17
23	41	312	727	1136	0.65	0.49
24	544	337	1292	934	0.29	0.63
25	32	418	766	1256	0.07	0.26
26	2082	437	3030	343	0.17	0.58
27	341	503	1144	1209	0.27	0.50
28	623	534	1469	1115	0.40	0.00
29	1571	534	2512	683	0.17	0.45
30	2081	609	3107	533	0.40	0.29
31	334	618	1189	1339	0.47	0.68
32	651	622	1540	1199	0.15	0.00
33	898	629	1815	1094	0.08	0.34
34	34	638	868	1497	0.20	0.31
35	1294	645	2258	931	0.21	0.34
36	1974	676	3020	655	0.28	0.57
37	1223	680	2196	1002	0.34	0.24
38	668	711	1599	1289	0.06	0.58
39	890	726	1850	1204	0.17	0.35
40	2081	762	3177	701	0.53	0.03
41	1673	766	2730	891	0.02	0.13
42	1458	815	2516	1043	0.62	0.53
43	1028	858	2062	1287	0.49	0.35
44	1366	872	2440	1148	0.33	0.11
45	852	937	1904	1454	0.39	0.25
46	743	938	1785	1504	0.16	0.45
47	104	953	1089	1812	0.31	0.14
48	94	958	1080	1822	0.64	0.55
49	29	990	1023	1887	0.36	0.18
50	645	1038	1723	1659	0.35	0.68
51	281	1068	1336	1858	0.15	0.20
52	541	1068	1622	1740	0.33	0.57

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیایی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
53	427	1198	1556	1934	0.42	0.14
54	29	1216	1126	2136	0.45	0.21
55	233	1239	1361	2068	0.26	0.07
56	41	1334	1193	2260	0.24	0.43
مجدور میانگین مربعات خطا					0.35	0.40

جدول ۴: مختصات نقاط متناظر گوشه در تصاویر اصلی و فرعی به همراه مقادیر اندازه بردار باقیمانده برای هریک از نقاط متناظر و مجدور میانگین مربعات خطا مربوط به روش پیشنهادی و روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیایی همگشت مبنای درجه ۳ مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندی ژاپن

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیایی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
1	14	15	327	369	0.39	0.23
2	2361	16	1761	173	0.31	0.04
3	1833	19	1439	219	0.49	0.66
4	807	22	812	307	0.47	0.21
5	1981	24	1530	210	0.22	0.38
6	1829	76	1441	254	0.32	0.60
7	1993	112	1544	263	0.01	0.31
8	1751	131	1398	294	0.73	0.64
9	355	144	546	419	0.12	0.34
10	1689	178	1364	328	0.08	0.59
11	28	182	349	470	0.28	0.61
12	20	273	352	526	0.15	0.38
13	2030	357	1587	409	0.36	0.02
14	291	373	526	565	0.25	0.29
15	711	396	785	543	0.70	0.37
16	438	427	620	585	0.68	0.24
17	161	443	452	618	0.04	0.17
18	382	451	588	605	0.55	0.71
19	627	516	743	624	0.20	0.37
20	462	518	643	639	0.31	0.77
21	2355	675	1813	576	0.41	0.34
22	1775	725	1462	655	0.70	0.67
23	733	754	828	760	0.31	0.35

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
24	1288	806	1172	746	0.73	0.70
25	1819	807	1496	702	0.22	0.66
26	26	838	403	871	0.52	0.33
27	1283	858	1173	778	0.49	0.19
28	1489	876	1300	772	0.40	0.69
29	740	883	843	839	0.52	0.83
30	1395	939	1248	818	0.49	0.28
31	1516	967	1324	825	0.13	0.58
32	1338	972	1216	843	0.09	0.38
33	747	1032	860	929	0.74	0.72
34	1374	1034	1243	878	0.13	0.67
35	1258	1037	1173	889	0.02	0.15
36	1936	1046	1588	838	0.42	0.75
37	1145	1113	1110	945	0.65	0.86
38	1592	1116	1383	910	0.50	0.45
39	2362	1119	1854	847	0.14	0.77
40	1256	1145	1180	956	0.27	0.51
41	1675	1191	1440	949	0.34	0.13
42	1264	1194	1189	985	0.73	0.17
43	1129	1257	1112	1035	0.12	0.35
44	1532	1273	1360	1011	0.63	0.65
45	17	1311	437	1161	0.48	0.72
46	1072	1314	1082	1074	0.28	0.69
47	1026	1335	1056	1091	0.14	0.28
48	16	1344	439	1181	0.32	0.46
49	978	1353	1028	1106	0.36	0.08
50	127	1366	509	1185	0.09	0.10
51	652	1457	837	1197	0.44	0.12
52	727	1485	886	1208	0.17	0.59
53	204	1509	568	1266	0.28	0.43
54	630	1516	829	1235	0.43	0.16
55	267	1543	609	1282	0.19	0.43
56	727	1556	892	1251	0.22	0.13
57	680	1584	865	1272	0.46	0.05
58	313	1592	642	1308	0.20	0.74
59	567	1625	800	1307	0.61	0.49
60	636	1653	844	1318	0.73	0.81

شماره نقطه	مولفه x نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر اصلی (پیکسل)	مولفه x نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	مولفه y نقطه در تصویر فرعی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش پیشنهادی (پیکسل)	اندازه بردار باقیمانده مربوط به روش درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ (پیکسل)
61	377	1689	689	1362	0.54	0.61
62	487	1718	758	1370	0.25	0.51
63	426	1756	724	1398	0.43	0.71
64	314	1799	659	1434	0.08	0.76
65	222	1863	609	1481	0.67	0.86
66	450	1910	752	1491	0.65	0.00
67	74	1925	523	1531	0.61	0.75
مجذور میانگین مربعات خطا					0.43	0.52

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک الگوریتم ثبت تغییرات خودکار جهت تخمین پارامترهای دوران، مقیاس و انتقال دو بعدی بین دو تصویر اصلی و فرعی راداری با دریچه مصنوعی پیشنهاد و پیاده‌سازی شد. به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی، از سه مجموعه داده راداری در دو منطقه مطالعاتی مربوط به ماهواره‌های رادارست-۲ و تراسار-ایکس، استفاده شد. همانطور که دیده شد، برخلاف سایر الگوریتم‌های مرسوم، در این الگوریتم نیازی به اعمال روش‌های تطابق تصاویر^۱ نیست و با وجود سطح نویز بالای تصاویر راداری مورد استفاده، کارایی الگوریتم پیشنهادی بخوبی نشان داده شد. از طرفی دیگر، فرآیند انتخاب نقاط متناظر در تصاویر اصلی و فرعی بطور خودکار با هزینه محاسباتی بسیار پایینی انجام شد. در این روش، مجموعه‌ای از قطعه‌ها با مرکزیت گوشه‌ها در تصویر ایجاد می‌شوند. زاویه بین این تصاویر با استفاده از روش بردارهای ویژه محاسبه می‌گردد. با محاسبه اختلاف جهت بین هریک از قطعه‌های موجود در تصاویر اصلی و فرعی، و با یک روند رای‌دهی، یک هیستوگرام زاویه‌ای

مجذور میانگین مربعات خطا حاصل از روش پیشنهادی در فرآیند ثبت هندسی متقابل تصاویر راداری اصلی و فرعی نسبت به یکدیگر، برای مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن و مجموعه داده مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن به ترتیب ۰.۲۹، ۰.۳۵ و ۰.۴۳ بدست آمد. این درحالیست که مجذور میانگین مربعات خطا بدست آمده از روش ثبت هندسی متقابل مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳ برای مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه باتالای هندوستان، مجموعه داده مربوط به ماهواره رادارست-۲ از منطقه سندای ژاپن و مجموعه داده مربوط به ماهواره تراسار-ایکس از منطقه سندای ژاپن به ترتیب ۰.۳۴، ۰.۴۰ و ۰.۵۲ می‌باشد. با بررسی نتایج نشان داده شده در جداول (۲)، (۳) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش متداول ثبت هندسی مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳، دقت بالاتری در ثبت هندسی متقابل تصاویر راداری به‌دست می‌دهد.

1 Image Matching

روش پیشنهادی ثبت هندسی متقابل، برای هر دو نوع تصویر راداری و مناطق مطالعاتی مختلف کارایی و دقت بالایی داشته و وابستگی به نوع تصویر راداری با درجه مصنوعی ندارد. مهمترین دستاورد این الگوریتم خودکار بودن کلیه فرآیند ثبت هندسی بوده و نیازی به کاربر ماهر ندارد. همچنین ارزیابی دقت مقایسه‌ای روش پیشنهادی و روش مبتنی بر درونیابی همگشت مبنای درجه ۳، نشان از دقت و کارایی بالایی روش پیشنهادی دارد. به عنوان تحقیقات آتی، می‌توان این الگوریتم را به منظور ثبت هندسی خودکار تصاویر نوری سنجش از دوری و تصاویر برد کوتاه توسعه داد.

تشکیل می‌شود. زاویه بین دو تصویر نیز، با تعیین اختلاف زاویه‌ای متناظر با بیشترین مقدار تکرار در این هیستوگرام بدست می‌آید. برای تعیین پارامتر مقیاس نیز، ابعاد قطعه‌ها در تصاویر تغییر داده شده، تا جایی که قطعه‌های متناظر در دو تصویر اصلی و فرعی، یک صحنه را پوشش دهند. ابعاد مختلف قطعه‌های موجود در تصاویر، منجر به تشکیل هیستوگرام زاویه‌ای متفاوتی می‌شود. با انتخاب هیستوگرام زاویه‌ای متناظر با بیشینه مقدار تکرار، مقیاس بین دو تصویر، بدست می‌آید. نتایج بدست آمده ثابت کرد که می‌توان از این الگوریتم برای ثبت تصاویر راداری که اختلاف دورانی و مقیاسی بزرگی دارند، بهره برد. نتایج تجربی نشان داد که

مراجع

- [1] S. Kumar, K. Arya, V. Rishiwal, and P. Joglekar, "Robust image registration technique for SAR images," in *Industrial and Information Systems, First International Conference on*, India, 2006, pp. 519–524.
- [2] W. Sun, J. Song, X. Gu, and L. Zhang, "An improved InSAR image registration algorithm," in *2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA)*, Wuhan, China, 2010, vol. 2, pp. 522–525.
- [3] B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli, and C. Zoppetti, "Nonparametric Change Detection in Multitemporal SAR Images Based on Mean-Shift Clustering," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 4, pp. 2022–2031, Apr. 2013.
- [4] D. Danudirdjo and A. Hirose, "Local Subpixel Coregistration of Interferometric Synthetic Aperture Radar Images Based on Fractal Models," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 7, pp. 4292–4301, Jul. 2013.
- [5] I. M. Scott, T. F. Cootes, and C. J. Taylor, "Improving Appearance Model Matching Using Local Image Structure," in *Information Processing in Medical Imaging*, C. Taylor and J. A. Noble, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 258–269.
- [6] F. Serafino, "SAR image coregistration based on isolated point scatterers," *Geosci. Remote Sens. Lett. IEEE*, vol. 3, no. 3, pp. 354–358, 2006.
- [7] N. Yague-Martinez, M. Eineder, R. Brcic, H. Breit, and T. Fritz, "TanDEM-X Mission: SAR Image Coregistration Aspects," in *2010 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*, Aachen, Germany, 2010, pp. 1–4.
- [8] G. Gupta, "Feature-Based Aerial Image Registration and Mosaicing," Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2006.
- [9] Q. Zheng and R. Chellappa, "A computational vision approach to image registration," *Image Process. IEEE Trans. On*, vol. 2, no. 3, pp. 311–326, 1993.
- [10] L. Zhang, W. Xu, and C. Chang, "Genetic algorithm for affine point pattern matching," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 24, no. 1, pp. 9–19, 2003.
- [11] C. Shekhar, V. Govindu, and R. Chellappa, "Multisensor image registration by feature consensus," *Pattern Recognit.*, vol. 32, no. 1, pp. 39–52, 1999.
- [12] J.-W. Hsieh, H.-Y. M. Liao, K.-C. Fan, M.-T. Ko, and Y.-P. Hung, "Image registration using a new edge-based approach," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 67, no. 2, pp. 112–130, 1997.

- [13] L. G. Brown, "A survey of image registration techniques," *ACM Comput. Surv. CSUR*, vol. 24, no. 4, pp. 325–376, 1992.
- [14] T. Wang, S. Jonsson, and R. F. Hanssen, "Improved SAR Image Coregistration Using Pixel-Offset Series," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 11, no. 9, pp. 1465–1469, Sep. 2014.
- [15] R. Natsuaki and A. Hirose, "SPEC Method #x2014; A Fine Coregistration Method for SAR Interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 1, pp. 28–37, Jan. 2011.
- [16] Y. Tang, C. Wang, H. Zhang, and Y. He, "An auto-registration method for space-borne SAR images based on FFT-shift theory and correlation analysis in multi-scale scheme," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, Melbourne, Australia, 2013, pp. 3550–3553.
- [17] W. Zou and Z. Li, "Extraction of interest points by Harris interest operator for synthetic aperture radar image coregistration," *IET Image Process.*, vol. 7, no. 5, pp. 500–513, Jul. 2013.
- [18] R. Scheiber and A. Moreira, "Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity," *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On*, vol. 38, no. 5, pp. 2179–2191, 2000.
- [19] S. Ganugapati and C. Moloney, "A ratio edge detector for speckled images based on maximum strength edge pruning," in *Image Processing, 1995. Proceedings., International Conference on*, Washington, DC, USA, 1995, vol. 2, pp. 165–168.
- [20] S. Suri, P. Schwind, J. Uhl, and P. Reinartz, "Modifications in the SIFT operator for effective SAR image matching," *Int. J. Image Data Fusion*, vol. 1, no. 3, pp. 243–256, 2010.
- [21] D. Zhang and L. Yu, "A High-precision co-registration method for InSAR image processing," *J. REMOTE Sens.-BEIJING-*, vol. 11, no. 4, p. 563, 2007.
- [22] A. Goshtasby, G. C. Stockman, and C. V. Page, "A region-based approach to digital image registration with subpixel accuracy," *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On*, no. 3, pp. 390–399, 1986.
- [23] Y. Xiong and F. Quek, "Automatic Aerial Image Registration Without Correspondence," in *Computer Vision Systems, 2006 ICVS'06. IEEE International Conference on*, Manhattan, New York City, USA, 2006, pp. 25–25.
- [24] Z. Li and J. Bethel, "Image coregistration in SAR interferometry," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 37, pp. 433–438, 2008.
- [25] B. Vijaya Kumar and E. Pochapsky, "Signal-to-noise ratio considerations in modified matched spatial filters," *JOSA A*, vol. 3, no. 6, pp. 777–786, 1986.
- [26] Z. Li, Z. Bao, and Z. Suo, "A joint image coregistration, phase noise suppression, and phase unwrapping method based on subspace projection for multibaseline InSAR systems," *Geosci. Remote Sens. IEEE Trans. On*, vol. 45, no. 3, pp. 584–591, 2007.
- [27] B. Zitova and J. Flusser, "Image registration methods: a survey," *Image Vis. Comput.*, vol. 21, no. 11, pp. 977–1000, 2003.
- [28] E. Meijering and M. Unser, "A note on cubic convolution interpolation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 12, no. LIB-ARTICLE-2003–008, pp. 477–479, 2003.



An Automatic Algorithm based on Angular Histogram for Corregistartion of Synthetic Aperture Radar Images

Reza Shah-Hosseini^{*1}, Mostafa Esmaili², Abdoreza Safari³, Said Homayouni⁴, Jalal Amini³, Hamid EzzatAbadiPour⁵

- 1- PhD student of Remote Sensing in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
2- PhD student of Geodesy in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
3- Associate Professor in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran
4- Assistant Professor in Department of Geography, University of Ottawa
5- Lecturer in Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Abstract

Coregistration of optical and radar imageries is a major pre-processing step in many remote sensing applications including change detection and interferometric processing. Specially, the coregistration faced more difficulties in radar imageries due to the high noise level and intense spatial-temporal decorrelation. Hence, non-automatic coregistration methods are much more time consuming and inefficient. Because, the probable geometrical and temporal (signal-target interaction) differences between two acquisitions (i.e. master and slave) caused spectral shifts between corresponding pixels. In this case, using grid points as a tie in the coregistration process drastically reduces the reliability of the process while use of the corner points in the images could solve the problem. To resolve this problem, an automatic algorithm based on angular histogram was proposed for coregistration of Synthetic Aperture Radar (SAR) imageries that have taken in different height, time and situation. This method automatically extracted the corners from the slave and master images and used these points as nodal points. However, unlike conventional methods, there is no need to perform the image matching process. The coregistration RMSE value for three case studies related to the Radarsat-2 imageries of Batala area, India, Radarsat-2 imageries of Sendai region, Japan and TerraSAR-X imageries in Sendai region, were 0.29, 0.35 and 0.43, respectively. Comparison of the proposed coregistration method with cubic convolution (CCI) interpolation based coregistration method showed that the accuracy of the proposed method was improved to 5%, 5% and 9% for three datasets, respectively. The results indicated high efficiency and accuracy of the proposed algorithm. Moreover, the proposed algorithm illustrates the high performance in the case that the angle and scale between the master and slave images are relatively large.

Key words: Corregistartion, Synthetic Aperture Radar, Feature based Method, Harris Operator, Cross-Correlation