

این مقاله در اولین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی به عنوان مقاله برگزیده انتخاب شده است که پس از تکمیل، داوری مجدد و اخذ پذیرش در این شماره از نشریه به چاپ می‌رسد.

شناسایی اشتباهات تناظریابی و تصحیح نسبی توابع رشنال در تصاویر استریو ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم RANSAC+RPC

نوراله تتر^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲، حسین عارفی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۵

چکیده

یکی از مهم‌ترین مراحل پردازش تصاویر ماهواره‌ای و بخصوص تصاویر استریو ماهواره‌ای بحث زمین مرجع‌سازی آن‌هاست. در حال حاضر اکثر شرکت‌های تولیدکننده تصاویر استریو ماهواره‌ای از توابع رشنال برای زمین مرجع‌سازی استفاده می‌کنند. اما از آنجا که تولید توابع رشنال برای هر تصویر به‌طور جداگانه انجام می‌گیرد، در عمل علاوه بر خطای مطلق این توابع، بین توابع رشنال این تصاویر یک نوع خطای نسبی نیز وجود دارد که برای اهداف برجسته‌بینی و استخراج مختصات سه‌بعدی به نظر می‌رسد که باید تصحیح شود. ایده‌ی مطرح برای تصحیح نسبی این توابع، استفاده از نقاط متناظر عکسی است. در حال حاضر اپراتورهای بینایی رایانه می‌توانند به‌صورت اتوماتیک نقاطی را استخراج و تناظریابی کنند؛ اما تناظریابی این نقاط با اشتباهاتی همراه هستند که بایستی از چرخه محاسبات تصحیح نسبی ضرایب توابع رشنال حذف شوند. در این تحقیق برای تصحیح نسبی توابع رشنال و همچنین حذف هم‌زمان اشتباهات تناظریابی، الگوریتم RANSAC+RPC پیشنهاد داده شده است. نتایج بدست آمده بر روی زوج تصاویر ماهواره‌ای GeoEye1 از منطقه شهری قم و تصاویر ماهواره‌ای IRS P5 از منطقه رودهن نشان می‌دهد اگرچه این استراتژی برای توجیه نسبی پایدار تصاویر ماهواره‌ای از موفقیت بالایی برخوردار است، اما میزان تاثیر تصحیحات روی نقاط سه‌بعدی بازسازی شده در حد زیر پیکسل است.

کلیدواژه‌ها: توابع رشنال، تصحیح نسبی توابع رشنال، تصاویر استریو ماهواره‌ای، RANSAC+RPC، شناسایی اشتباهات تناظریابی.

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

۱- مقدمه

زمین مرجع سازی یکی از مهم ترین مراحل پردازش های تصاویر ماهواره ای است؛ که با استفاده از مدل های فیزیکی و یا مدل های ریاضی انجام می گیرد. مدل های فیزیکی که عمدتاً بر اساس هندسه تصویربرداری، پارامترهای کالیبراسیون سنجنده و معادلات شرط هم خطی نوشته می شوند از دقت بالاتری برخوردار هستند. اما این مدل ها به دلایل اقتصادی، کاهش پیچیدگی و یا امنیتی در اختیار کاربران قرار نمی گیرند [۱].

مدل های دسته دوم که برای زمین مرجع سازی تصاویر ماهواره ای به کار گرفته می شوند، مدل های مبتنی بر توابع ریاضی هستند. یکی از معروف ترین و پرکاربردترین این توابع، توابع رشنال^۱ می باشد. توابع رشنال، توابع ریاضی هستند که ارتباط بین مختصات زمینی و عکسی را برقرار می کنند [۲]. امروزه به همراه تصاویر ماهواره ای، ضرایب این توابع در اختیار کاربر قرار داده می شوند. در حال حاضر کمتر سنجنده ای دیده می شود که از توابع رشنال برای زمین مرجع سازی تصاویر ماهواره ای استفاده نکند. دلیل اصلی استفاده از توابع رشنال را می توان سادگی و کاهش سطح دسترسی کاربر به پارامترهای فیزیکی سنجنده ها دانست [۱].

در زمین مرجع سازی تصاویر ماهواره ای با توابع رشنال، برای نوارهای با طول کمتر از ۵۰ کیلومتر، یک نوع خطای شیفت و دریفت گزارش شده است [۳، ۴ و ۵]. علاوه بر این، از آنجا که فرآیند تولید ضرایب توابع رشنال برای هر تصویر ماهواره ای جداگانه انجام می گیرد؛ در تصاویر استریو ماهواره ای یک نوع خطای شیفت و دریفت نسبی نیز وجود دارد [۶ و ۷]. چنانچه توابع رشنال به صورت مطلق تصحیح شوند،

نیازی به تصحیح نسبی این توابع در حالت تصاویر استریو نیست. اما در کاربردهایی نظیر جابجایی سنجی و یا برآورد حجم توده ذرات جابجا شده (که به تصحیح مطلق توابع رشنال نیازی نیست)؛ با توجه به مقدار خطای شیفت و دریفت نسبی بین توابع رشنال تصاویر به تنهایی نمی توان از آن ها استفاده کرد. یکی از راهکارهایی که در این گونه مسائل، می تواند برای هم مرجع سازی این تصاویر انجام بگیرد، استفاده همزمان از توابع رشنال و نقاط متناظر تصویری است [۶ و ۸].

برای اندازه گیری اتوماتیک نقاط متناظر عکسی در تصاویر ماهواره ای، الگوریتم های بینایی رایانه متعددی معرفی و توسعه داده شده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴]. اما در تمامی این الگوریتم ها اشتباهات^۲ تناظریابی وجود دارد که بایستی از چرخه ی تناظریابی حذف شوند. یکی از راهکارهای شناسایی و حذف اشتباهات تناظریابی، به کارگیری الگوریتم RANSAC با مدل های افاین^۳، پروژکتیو^۴ و یا هندسه اپی پولار (ماتریس اساسی) است [۱۵]. اما هندسه ی تصاویر ماهواره ای به گونه ای است که مدل های تبدیل سراسری نظیر افاین^۳، پروژکتیو^۴ و یا چندجمله ای ارتباط هندسی میان تصاویر (خصوصاً تصاویر بزرگ مقیاس با تغییرات ارتفاعی زیاد) را نمی توانند به طور کامل و با دقت بالا برقرار نمایند [۱۶]. به همین دلیل برای برقراری ارتباط دقیق بین تصاویر استریو ماهواره ای، علاوه بر نقاط متناظر عکسی، از توابع رشنال نیز استفاده شده است [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. اما در تمامی روش های پیشین، برای حذف اشتباهات تناظریابی از الگوریتم RANSAC و مدل ریاضیاتی توابع رشنال استفاده نشده است [۱۷]. علاوه بر این لازم به ذکر است، پیش از این برای تصحیح نسبی

^۲ Outliers^۳ Affine^۴ Projective^۱ Rational Polynomial Coefficient (RPC)

به طور معمول توابع رشنال در دو حالت مستقیم و معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ با توجه به هدف این مقاله مبنی بر تصحیح ضرایب توابع رشنال در حالت مستقیم، در ادامه تنها معادلات و روابط این حالت ارائه می‌شود.

منظور از توابع رشنال در حالت مستقیم؛ انتقال مختصات سه‌بعدی نقاط زمینی به مختصات دوبعدی عکسی است. در حال حاضر تمامی شرکت‌ها و سازمان‌ها این نوع از توابع رشنال را در اختیار کاربران قرار می‌دهند. فرم کلی این توابع در حالت مستقیم به صورت روابط (۱ و ۲) نوشته می‌شوند [۲].

$$l = \begin{bmatrix} ua^T \\ ub^T \end{bmatrix} l_s + l_0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$S = \begin{bmatrix} uc^T \\ ud^T \end{bmatrix} S_s + S_0 \quad \text{رابطه (۲)}$$

متغیرهای روابط (۱ و ۲) عبارت‌اند از:

$$V^2 U^2 W^2 UVW V^3 VU^2 VW^2 u = [1 V U W VU VW UW V^2 U U^3 UW^2 V^2 W U^2 W W^3] \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$a = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{20}] \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$b = [1 \ b_1 \ \dots \ b_{19}] \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$c = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{20}] \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$d = [1 \ d_1 \ \dots \ d_{19}] \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$V = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_s} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$U = \frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_s} \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$W = \frac{h - h_0}{h_s} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن‌ها؛ $l_0, S_0, h_0, \lambda_0, \varphi_0$ به ترتیب شیفیت عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، ارتفاع از روی دیتوم، سطر تصویر و ستون تصویر.

از روی دیتوم، سطر تصویر و ستون تصویر. $l_s, S_s, h_s, \lambda_s, \varphi_s$ به ترتیب مقیاس عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی، ارتفاع از روی

توابع رشنال از نقاط متناظر دستی که از صحت بالایی برخوردارند، استفاده شده است [۸].

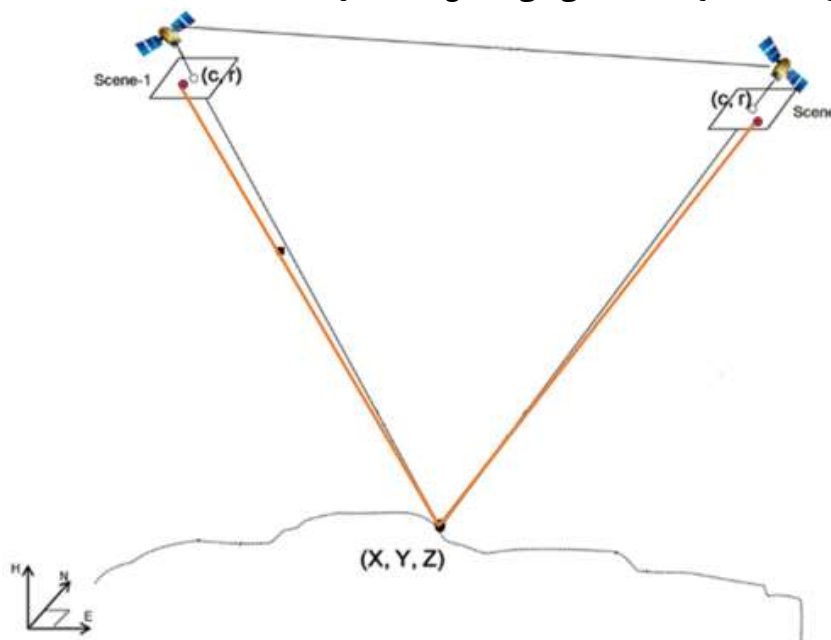
در این مقاله برای برقراری ارتباط دقیق بین تصاویر استریو ماهواره‌ای و به تبع آن شناسایی و حذف اشتباهات تناظریابی حاصل از تناظریابی اتوماتیک، الگوریتم $RANSAC+RPC$ پیشنهاد می‌شود. همچنین همزمان با شناسایی اشتباهات تناظریابی، فرآیند تصحیح نسبی توابع رشنال نیز انجام می‌گیرد. در ادامه پس از معرفی توابع رشنال، راهکار پیشنهادی جهت به‌کارگیری الگوریتم $RANSAC$ با توابع رشنال بیان می‌شود. سپس آزمایشات انجام گرفته روی تصاویر استریو ماهواره‌ای تشریح شده و در پایان ارزیابی نتایج به دست آمده، ارائه می‌شود.

۲- توابع رشنال

توابع رشنال، توابع ریاضی هستند که ارتباط بین مختصات زمینی و عکسی را برقرار می‌کنند [۲].

مختصات نرمالیزه شده‌ی نقطه‌ی زمینی. U, V, W به ترتیب عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع از روی دیتوم. l, s : مختصات عکسی (سطر و ستون).

داده شوند و سپس با استفاده از همین توابع رشنال، این نقطه شی‌ایی به فضای تصاویر انتقال داده شود، بین مختصات اولیه و مختصات محاسبه شده یک نوع خطایی به وجود می‌آید، که به آن خطای نسبی می‌گویند (شکل (۱)). در صورتی که این خطا (هم مطلق و هم نسبی) برای تمامی نقاط عکسی مقداری ثابت داشته باشد به آن شیفت گفته می‌شود. ولی اگر این مقدار خطا در نقاط مختلف دارای تغییرات غیرثابتی باشد، علاوه بر شیفت، دریفت نیز دارد.



شکل ۱: اثر خطای نسبی توابع رشنال در تصاویر استریو ماهواره‌ای

پرتوهای متناظر و همچنین شناسایی اشتباهات، ترفیع فضایی انجام می‌گیرد. بنابراین در گام دوم علاوه بر شناسایی اشتباهات تناظریابی، مقدار خطاهای شیفت و دریفت نسبی بین توابع رشنال محاسبه می‌شود.

در گام سوم مقدار تصحیح این خطا به توابع رشنال اعمال شده و توابع رشنال جدید برآورد می‌شوند. و در گام چهارم نیز ارزیابی نتایج و معنی‌دار بودن تصحیح نسبی توابع رشنال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

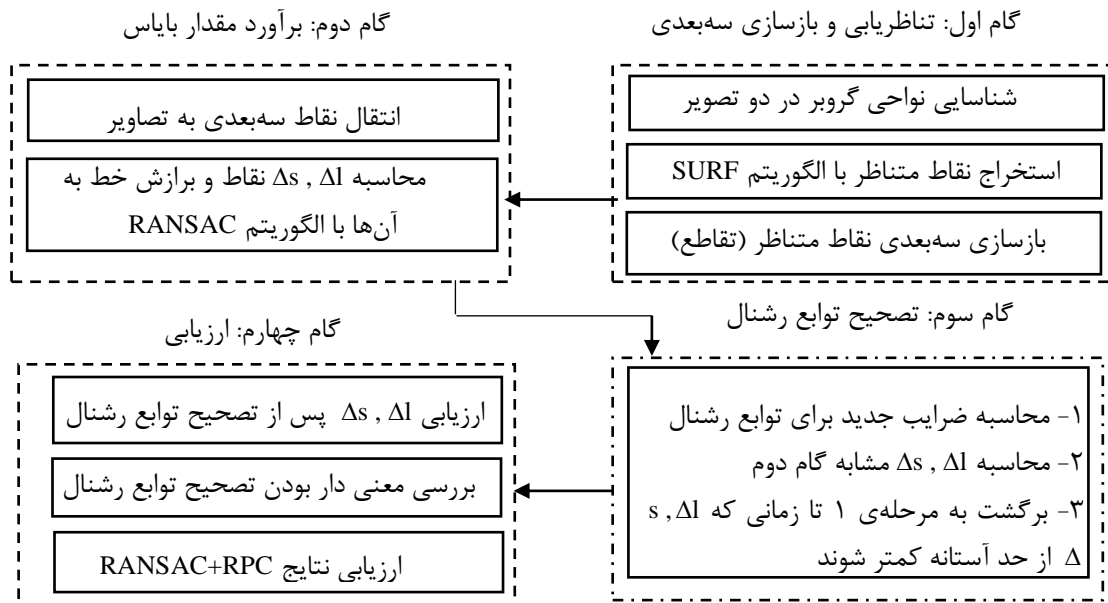
دیتوم، سطر تصویر و ستون تصویر.

به همراه توابع رشنال زمین مستقل، علاوه بر ۷۸ ضرایب a, b, c و d پارامترهای نرمالیزاسیون $l_0, S_0, h_0, \lambda_0, \varphi_0$ $l_s, S_s, h_s, \lambda_s, \varphi_s$ انیون در اختیار کاربر قرار داده می‌شوند.

اگر موقعیت شی‌ایی یک نقطه در سیستم مختصات مرجع، نسبت به موقعیت محاسبه شده همان نقطه با توابع رشنال دارای اختلاف بود، به آن خطای مطلق می‌گویند. اما در تصاویر استریو، اگر با استفاده از توابع رشنال دو نقطه متناظر، به فضای شی‌ایی تقاطع

۳- الگوریتم RANSAC+RPC

به منظور تصحیح نسبی توابع رشنال و شناسایی متناظرهای اشتباه در فرآیند تناظریابی و تصحیح توابع رشنال گام‌های ارائه شده در شکل (۲) مطرح می‌شوند. از آنجا که هدف از تصحیح توابع رشنال، انجام تقاطع فضایی صحیح بین نقاط متناظر عکسی است؛ در گام اول تناظریابی و بازسازی سه‌بعدی صورت می‌گیرد. پس از بازسازی سه‌بعدی نقاط، برای بررسی میزان تناظر



شکل ۲: مراحل روش پیشنهادی در الگوریتم RANSAC+RPC

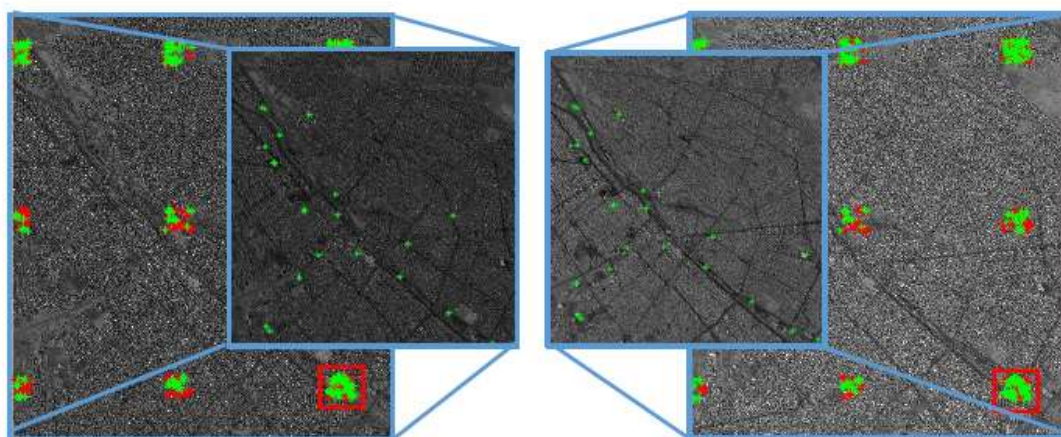
هرم تصاویر ساخته می‌شود (ساخت تصاویر با ابعاد $1/16, 1/8, 1/4, 1/2$ و $1/1$ از تصاویر اولیه)، سپس در بالاترین لایه هرم (لایه $1/16$) با الگوریتم SURF تناظریابی انجام می‌گیرد. در صورتی که تعداد نقاط متناظر شناسایی شده در بالاترین لایه هرم، کافی نبوده و یا تناظریابی از سطح اطمینان پایین‌تری برخوردار باشد، فرآیند تناظریابی (تا رسیدن به سطح اطمینان لازم) به لایه‌های پایینی هرم انتقال می‌یابد. این فرآیند در بدترین حالت ممکن از لایه $1/4$ تجاوز نکرده و معمولاً در همان لایه‌های $1/16$ یا $1/8$ تناظریابی با موفقیت انجام می‌گیرد. پس از شناسایی نقاط متناظر صحیح، با استفاده از یک مدل افاین نواحی گروبر متناظر شناسایی می‌شوند. تحقیقات نشان داده است، استفاده از یک مدل افاین کافی است [۲۰ و ۲۱].

۳-۱- گام اول: تناظریابی و بازسازی سه بعدی

همان‌طور که پیشتر گفته شد، هدف از تصحیح توابع رشنال؛ انجام تقاطع فضایی صحیح بین نقاط متناظر عکسی است. بنابراین بایستی یکسری نقاط گرهی در دو تصویر استریو شناسایی شود. برای استخراج اتوماتیک نقاط متناظر الگوریتم‌های زیادی وجود دارد [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳]؛ اما با توجه به عملکرد مناسب الگوریتم SURF، از این الگوریتم استفاده می‌شود. با توجه به اینکه اجرای الگوریتم‌های تناظریابی بر روی تصاویر با ابعاد بزرگ، زمان پردازشی بالایی را می‌طلبد، این فرآیند تنها برای نواحی خاصی مانند نواحی گروبر^۱ (هر ناحیه با ابعاد 400×400 پیکسل) انجام می‌گیرد. برای شناسایی نواحی گروبر متناظر، از استراتژی ایجاد هرم تصاویر و تناظریابی در لایه‌های بالایی آن، استفاده می‌شود (شکل (۳)).

اساس کار این استراتژی به این نحو است که ابتدا

¹ Gruber Area



شکل ۳: تناظریابی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از استراتژی هرم تصاویر

از لحاظ تئوری منحنی‌های متناظر اپی‌پولار را می‌توان با انتقال مختصات تصویری به فضای شی‌ایی و تغییر ارتفاع در مختصات شی‌ایی به‌دست آورد. برای توضیح بیشتر، با توجه به شکل (۴) چنانچه نقطه a به نقاط P_1 و P_2 در فضای شی‌ایی انتقال داده شده و سپس این نقاط با توابع رشنال به نقاط b_1 و b_2 در تصویر راست انتقال یابند و همچنین مشابه روند قبلی با نقاط b_1 و b_2 ، نقاط a_1 و a_2 در تصویر چپ به‌دست آیند؛ اثبات شده که این نقاط بر روی منحنی‌های متناظر اپی‌پولار قرار گرفته‌اند [۲۴] و [۲۵]. حال چنانچه به جای تغییر ارتفاع در مختصات شی‌ایی از نقاط با اختلاف ارتفاع متفاوت استفاده شود، با انتقال آن‌ها به فضای تصویر و مقایسه آن‌ها با مقدار تناظریابی شده، می‌توان معادله دیفرانسیل این منحنی‌ها را برآورد کرد. زیرا در صورتی که در بدترین حالت ممکن، هندسه اپی‌پولار در تصاویر استریو رفتاری مانند شبه هذلولی داشته باشد [۲۳]، روند اختلاف مقادیر سمپل به‌صورت یک خط خواهد بود؛ به دلیل اینکه از لحاظ ریاضی مشتق یک شبه هذلولی (در اینجا اختلاف مقادیر سمپل) به‌صورت خط خواهد بود.

پس از این مراحل با الگوریتم RANSAC به مقدار خطاهای محاسبه شده، یک خط برازش

پس از شناسایی نقاط متناظر، بر اساس رابطه‌های (۱) و (۲)، می‌توان یک دستگاه معادلات ایجاد کرد. بدین منظور پس از خطی کردن دستگاه معادلات فوق حول مجهولات (یا به عبارتی U, V, W) و حل آن به صورت کمترین مربعات، مختصات سه‌بعدی نقاط متناظر محاسبه می‌شود.

۳-۲- گام دوم: محاسبه مقدار خطا

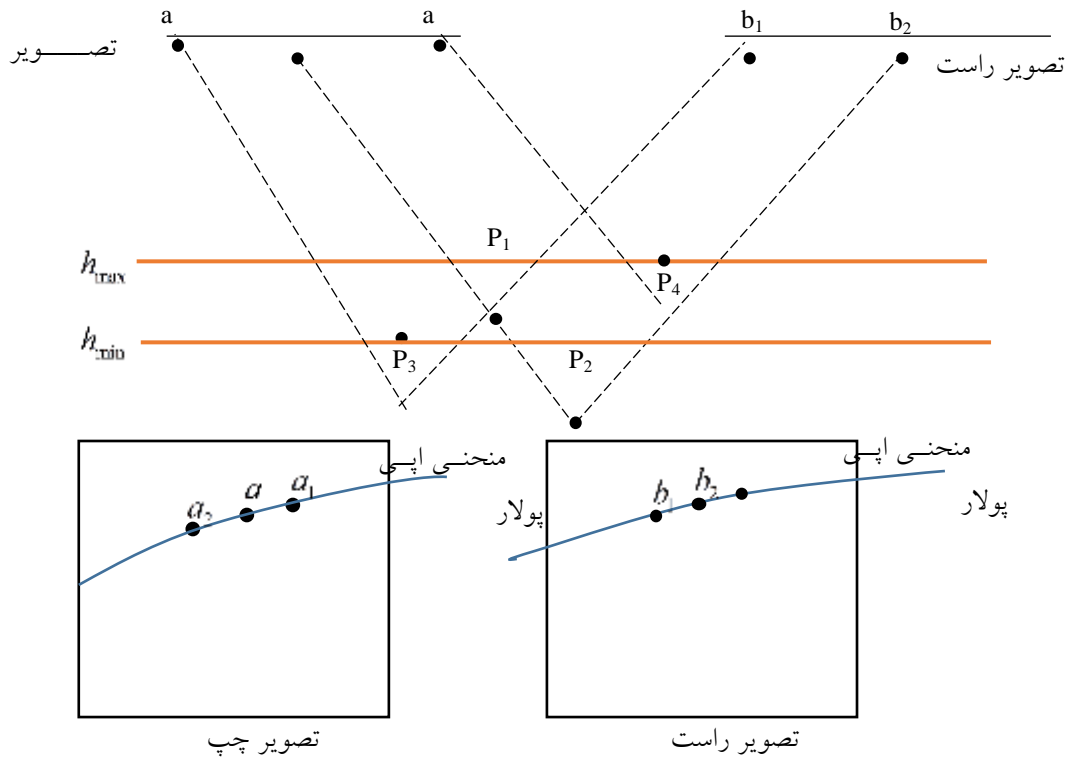
برای برآورد مقدار خطای توابع رشنال و شناسایی اشتباهات تناظریابی، مختصات شی‌ایی نقاط زمینی به کمک معادلات (۱) و (۲) به فضای تصویر انتقال داده می‌شود (شکل (۱)). از اختلاف مختصات محاسباتی با مختصات اولیه نقاط عکسی، یک خطای در حد چند پیکسلی به دست می‌آید که یا از خطای نسبی توابع رشنال ناشی می‌شود و یا اینکه مربوط به اشتباهات تناظریابی است. منظور از اشتباهات، نقاطی است که در راستای محور سمپل^۱ خطا دارند، زیرا اگر در راستای لاین^۲ هم خطایی وجود داشته باشد در مقدار ارتفاع حل می‌شود. این فرآیند به مانند این است که هندسه‌ی اپی‌پولار در تصاویر استریو ماهواره‌ای تخمین زده می‌شود [۲۲، ۲۳ و ۲۴].

¹ Sample

² Line

هندسه‌ی اپی‌پولار خطی بوده؛ اما اگر شیب خط غیر صفر باشد نشان‌دهنده‌ی این است که هندسه‌ی اپی‌پولار به صورت شبه هذلولی بوده است.

داده می‌شود؛ تا هم شیفت و هم دریافت نسبی (در صورت وجود) برآورد شود و هم اینکه اشتباهات تناظریابی شناسایی شوند. اگر شیب خط (برازش داده شده) صفر (و یا نزدیک به صفر) باشد،



شکل ۴: هندسه‌ی اپی‌پولار در تصاویر استریو ماهواره‌ای

به دست می‌آیند:

$$a_{new} = a - \frac{\Delta l}{l_s} b \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$c_{new} = c - \frac{\Delta S}{S_s} d \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

توابع رشنال جدید همان توابع رشنال قبلی هستند با این تفاوت که ضرایب به دست آمده از روابط (۱۳) و (۱۴) به جای ضرایب قبلی جایگزین می‌شوند. پس از این مراحل با توابع رشنال جدید، مقدار خطای به دست آمده از گام دوم، دوباره محاسبه می‌شود. اگر مقدار خطاها از حد آستانه (در اینجا کمتر از یک پیکسل) کمتر بود، توابع رشنال

۳-۳- گام سوم: تصحیح توابع رشنال

پس از برآورد مقدار خطای $\Delta S'$, $\Delta l'$, $\Delta S''$, $\Delta l''$ در هر دو تصویر، این مقادیر به روابط (۱) و (۲) اضافه می‌شوند.

$$\frac{l-l_0}{l_s} = \left[\frac{ua^T}{ub^T} \right] + \frac{\Delta l}{l_s} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\frac{S-S_0}{S_s} = \left[\frac{uc^T}{ud^T} \right] + \frac{\Delta S}{S_s} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) با یک طرفین-وسطین ساده می‌توان برای ضرایب a , c یکسری ضریب جدید که اصلاح شده‌اند محاسبه نمود. ضرایب جدید از روابط زیر

ارزیابی نتایج انجام می‌گیرد.

۴-۱- معرفی داده

در این تحقیق از یک جفت تصویر استریو ماهواره‌ای *GeoEye1* با پیکسل سایز زمینی ۰.۵ متر و یک جفت تصویر استریو ماهواره‌ای *IRS P5* با پیکسل سایز زمینی ۲.۵ متر استفاده شده است. تصاویر مربوط به *GeoEye1* از یک محدوده با بافت شهری و تصاویر *IRS P5* از یک محدوده با بافت کوهستانی، شهری و تپه‌ماهور اخذ شده‌اند (مشخصات این تصاویر در جدول (۱) نشان داده شده است).

جدول ۱: مشخصات داده‌های ورودی

| سنجنده | موقعیت | سال اخذ (میلادی) | ابعاد تصویر (پیکسل) |
|----------------|---------------|------------------|---------------------|
| <i>GeoEye1</i> | ایران، شهر قم | ۲۰۱۴ | ۱۷۰۰۰*۱۴۱۰۰ |
| <i>IRS P5</i> | ایران، رودهن | ۲۰۰۷ | ۱۲۰۰۰*۱۲۰۰۰ |

نقاط انتخابی (جهت برآزش خط) و تعداد تکرار تعیین شوند. در این تحقیق از حد آستانه ۰.۶ پیکسل و در هر تکرار از سه نقطه انتخابی استفاده شده است (دو نقطه کافی است، ولی برای پایداری بیشتر، سه نقطه به کار گرفته شده است). برای تعیین تعداد تکرار روش‌های مختلفی ارائه شده [۲۶]، اما در این تحقیق از تعداد تکرار برابر با نصف تعداد نقاط که در واقع یک روش تجربی بوده، بهره گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی بیشتر، مقایسه‌ای بین روش پیشنهادی با روش‌های *RANSAC+Affine* و *RANSAC+Projective* انجام گرفته است (جدول (۲)).

تصحیح شده‌اند؛ در غیر این صورت تا رسیدن به خطای کمتر از حد آستانه، مرحله بازسازی سه‌بعدی و گام‌های دوم و سوم تکرار می‌شوند.

۳-۴- گام چهارم: ارزیابی نتایج

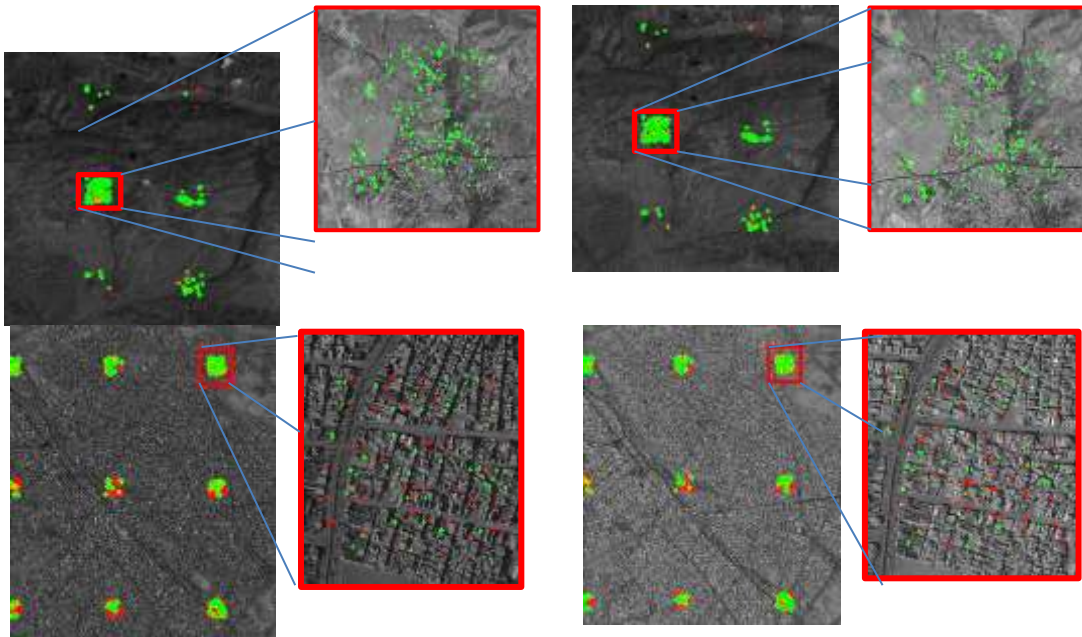
پس از تصحیح توابع رشنال با بررسی مقدار خطاهای $\Delta S', \Delta l', \Delta S'', \Delta l''$ ارزیابی نتایج صورت می‌گیرد. همچنین برای معنی‌دار بودن فرآیند انجام‌شده، مختصات سه‌بعدی نقاط قبل از تصحیح توابع رشنال و پس از تصحیح توابع رشنال با هم مقایسه می‌شود.

۴-۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش ابتدا داده‌های مورد استفاده معرفی شده، سپس گام‌های عملیاتی تشریح می‌شوند. در پایان نیز

۴-۲- گام‌های عملیاتی

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، پس از شناسایی نواحی گروبر، برای استخراج نقاط متناظر عکسی، اپراتور *SURF* به کار گرفته می‌شود. پس از استخراج نقاط متناظر، با استفاده از توابع رشنال و حل دستگاه معادلات به‌دست آمده از رابطه‌های (۱ و ۲)؛ مختصات سه‌بعدی این نقاط محاسبه می‌شود. برای محاسبه مقدار خطای نسبی توابع رشنال، مختصات سه‌بعدی محاسبه شده، با ترفیع فضایی به فضای عکسی انتقال می‌یابد. (نتیجه این گام در شکل (۵) ارائه شده است). در استفاده از الگوریتم *RANSAC* بایستی پارامترهای حد آستانه بافر، تعداد



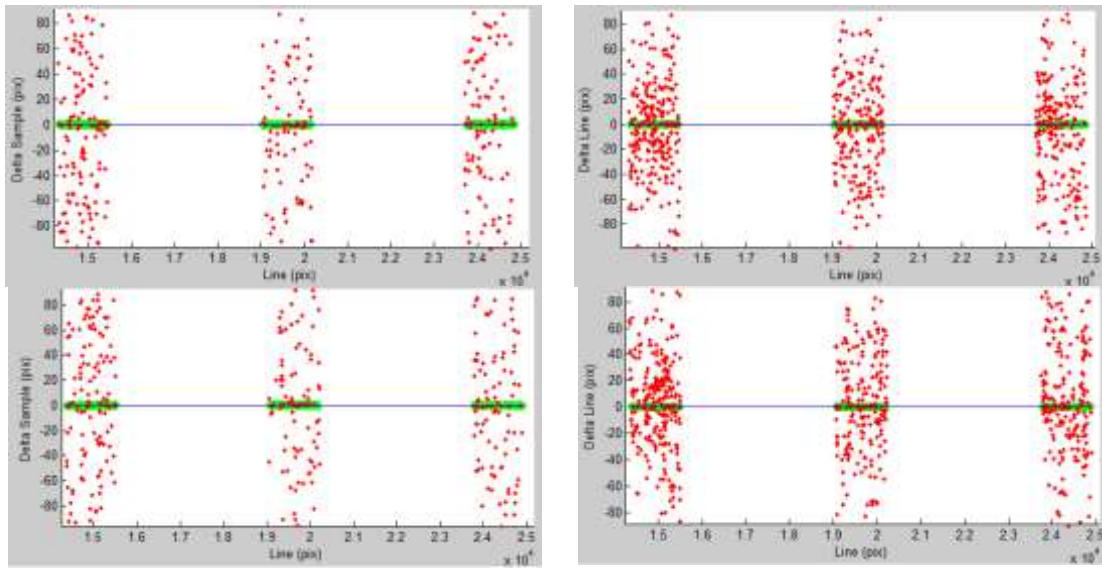
شکل ۵: استخراج نقاط متناظر با اپراتور SURF در تصاویر استریو سنجنده‌های IRS P5 (بالا) و GeoEye1 (پایین)؛ سمت - راست: تصویر جلونگر (تصویر با زاویه دید مایل)؛ سمت - چپ: تصویر عقب نگر (تصویر با زاویه دید تقریباً قائم)؛ نقاط قرمز رنگ: نقاط متناظر اشتباه؛ نقاط سبز رنگ: نقاط متناظر صحیح

جدول ۲: بررسی اثر پارامتر حد آستانه بر الگوریتم RANSAC+RPC و مقایسه آن با سایر الگوریتم‌ها

| تعداد نقاط متناظر صحیح | | | تعداد کل نقاط تناظریابی شده | حد آستانه (پیکسل) | سنجنده |
|------------------------|---------------|------------|-----------------------------|-------------------|---------|
| RANSAC+Projective | RANSAC+Affine | RANSAC+RPC | | | |
| ۵۴ | ۶۴ | ۷۱۴ | ۱۴۰۵ | ۰.۶ | GeoEye1 |
| ۱۳۲ | ۱۲۱ | ۷۳۹ | ۱۴۰۵ | ۰.۸ | |
| ۱۳۹ | ۱۳۳ | ۷۴۷ | ۱۴۰۵ | ۱ | |
| ۳۸ | ۳۶ | ۵۴۸ | ۷۱۵ | ۰.۶ | IRS P5 |
| ۶۱ | ۵۹ | ۶۲۰ | ۷۱۵ | ۰.۸ | |
| ۷۵ | ۷۷ | ۶۵۰ | ۷۱۵ | ۱ | |

RANSAC با مدل‌های سراسری افاین و پروژکتیو ارائه شده است.

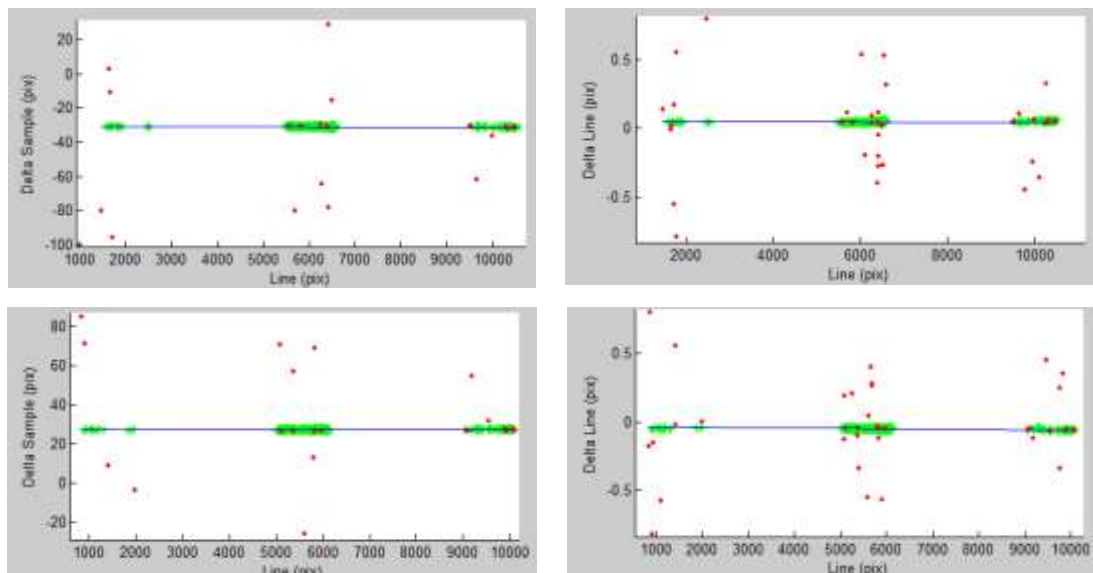
در این ارزیابی، پس از استخراج نقاط متناظر عکسی و انتخاب حد آستانه‌های ۰.۶، ۰.۸ و ۱ پیکسل؛ نتیجه اعمال الگوریتم RANSAC+RPC و الگوریتم



شکل ۶: مقدار خطاهای $\Delta S'$, $\Delta I'$, $\Delta S''$, $\Delta I''$ و برازش خط با الگوریتم RANSAC؛ بالا: مقادیر این خطاها در تصویر تقریباً قائم سنجنده GeoEye1؛ پایین: مقادیر این خطاها در تصویر با زاویه دید مایل سنجنده GeoEye1

نشان می‌دهند. همچنین نقاطی که مقدار ΔS آن‌ها در الگوریتم RANSAC دارای برچسب اشتباه باشد، به عنوان نقاط اشتباه معرفی می‌شوند. برای برازش خط و نتایج حاصل از این عملیات، برای تصاویر سنجنده GeoEye1 در شکل (۶) و برای تصاویر سنجنده IRS در شکل (۷) ارائه شده‌اند.

پس از فرآیند مراحل قبل، مقادیر $\Delta S'$, $\Delta I'$, $\Delta S''$, $\Delta I''$ محاسبه می‌شوند. برای حذف اثر ناشی از خطای توابع رشنال با الگوریتم RANSAC به این مقادیر یک خط برازش داده می‌شود. پارامترهای تعریف کننده خط، همان خطای شیفت و دریافت (در صورت وجود) توابع رشنال را



شکل ۷: مقدار خطاهای $\Delta S'$, $\Delta I'$, $\Delta S''$, $\Delta I''$ و برازش خط با الگوریتم RANSAC؛ بالا: مقادیر این خطاها در تصویر عقب‌نگر IRS P5؛ پایین: مقادیر این خطاها در تصویر جلونگر سنجنده IRS P5

۴-۳- ارزیابی نتایج

برای ارزیابی نتایج، ابتدا تأثیر تصحیح نسبی توابع رشنال مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار مقادیر خطاهای $\Delta S'$, $\Delta l'$, $\Delta S''$, $\Delta l''$ قبل و پس از تصحیح توابع رشنال محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از این عملیات در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: مقدار خطا قبل و پس از تصحیح توابع رشنال

| سنجنده | | | | قبل از تصحیح توابع رشنال (پیکسل) | | | | بعد از تصحیح توابع رشنال (پیکسل) | | | |
|---------|--|--|--|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| | | | | $\Delta S'$ | $\Delta l'$ | $\Delta S''$ | $\Delta l''$ | $\Delta S'$ | $\Delta l'$ | $\Delta S''$ | $\Delta l''$ |
| GeoEye1 | | | | ۰.۰۱۱ | ۰.۰۰۳ | -۰.۰۱۲ | -۰.۰۰۲ | ۰.۰۱۱ | ۰.۰۰۳ | -۰.۰۱۲ | -۰.۰۰۲ |
| IRS P5 | | | | -۰.۷۸۱ | ۰.۰۴۸ | ۰.۶۷۸ | -۰.۰۵۱ | -۳۰.۸۸ | ۰.۰۴۸ | ۲۷.۵۲ | -۰.۰۵۱ |

جدول (۳) نشان داد، در تصاویر فوق تنها خطای شیفت وجود داشته و برای تصحیح نسبی توابع رشنال، الگوریتم پیشنهادی از توانایی بالایی برخوردار است. در روش پیشنهادی برای اطمینان بیشتر، فرآیند تصحیح به صورت تکراری ارائه شده است؛ ولی در عمل با همان تکرار اول، مقدار خطاها به دقت زیر یک پیکسل می‌رسند. نکته‌ی مهم دیگری که می‌توان از نتایج به دست آورد این است که در راستای لاین هیچ‌گونه خطایی دیده نمی‌شود و تنها در راستای سمپل مقدار خطایی وجود دارد. دلیل این مسئله را می‌توان در هندسه‌ی تصویربرداری و هندسه‌ی اپی‌پولار دانست؛ زیرا در راستای لاین هرچه قدر هم خطا وجود داشته باشد، این خطا می‌تواند خودش را در مقدار پارالاکس (ارتفاع) مخفی کند.

ارزیابی ارائه شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که در تصاویر فوق حتی اگر تصحیح نسبی توابع رشنال انجام نگیرد، در مختصات نهایی اختلاف چشمگیری به وجود نمی‌آید. زیرا خطای متوسط در راستای محور X حداکثر ۱.۴۸ متر برای تصاویری است که پیکسل‌سایز زمینی آن ۲.۵ متر است که به معنی تصحیح خطاها در حد زیر پیکسل است. البته برای تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا اگر چنین خطایی وجود داشته باشد بهتر است که

پس از برآورد مقدار خطاهای $\Delta S'$, $\Delta l'$, $\Delta S''$, $\Delta l''$ به کمک روابط (۱۳ و ۱۴) و بر اساس آنچه در بخش ۳-۳ آمده است؛ ضرایب تصحیح‌شده‌ی توابع رشنال محاسبه می‌شوند.

یکی دیگر از آزمون‌هایی که انجام آن ضروری به نظر می‌رسد معنی‌دار بودن تصحیح توابع رشنال است. بدین منظور بین مختصات سه‌بعدی محاسبه‌شده با توابع رشنال قبل از تصحیح و بعد از تصحیح مقایسه‌ای انجام گرفته است. با توجه به اینکه نتیجه تقاطع با توابع رشنال، مختصات نقاط را در سیستم مختصات ژئودتیک می‌دهد؛ این مختصات به سیستم تصویر ترانسفور مرکاتور جهانی^۱ انتقال داده شده‌اند. نتایج حاصل از این آزمون، در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله هدف تصحیح نسبی توابع رشنال همراه با شناسایی اشتباهات تناظریابی در تصاویر استریو ماهواره‌ای بود که نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی تصاویر ماهواره‌های *GeoEye1* و *IRS P5* نشان از موفقیت این الگوریتم داشت. در این الگوریتم برای اتوماتیک کردن سطح اتوماسیون از الگوریتم‌های بینایی رایانه مانند *SURF* و *RANSAC* بهره گرفته شد.

نتایج ارائه شده در شکل‌های (۶ و ۷) و همچنین

¹ Universal Transverse Mercator (UTM)

(مورد استفاده در جابجایی سنجی و زمین لغزش)، این خطا وجود داشته و بایستی حذف شود [۸].

حل شود. همچنین بایستی این مطلب را مدنظر داشت که در کاربردهایی مانند محاسبه حجم توده خاک با استفاده از تصاویر اخذ شده در دو اپک متفاوت

جدول ۴: تأثیر تصحیح توابع رشنال بر مختصات زمینی نقاط

| $\Delta X (m)$ | $\Delta Y (m)$ | $\Delta Z (m)$ | مؤلفه | سنجنده |
|----------------|----------------|----------------|--------------|---------|
| ۰.۰۰۰ | ۰.۰۰۰ | ۰.۰۰۰ | میانگین | GeoEye1 |
| ۰.۰۰۰ | ۰.۰۰۰ | ۰.۰۰۰ | انحراف معیار | |
| -۱.۴۸۰ | ۰.۴۱۰ | ۰.۳۹۰ | میانگین | IRS P5 |
| ۰.۰۰۱ | ۰.۰۰۸ | ۰.۰۳۴ | انحراف معیار | |

و پروژکتیو زمانی جواب می‌دهد که؛ منطقه مورد مطالعه شامل دشت بوده و هندسه تصویربرداری یک هندسه پرسپکتیو باشد. علاوه بر این تعداد نقاط متناظر صحیحی که الگوریتم $RANSAC+RPC$ شناسایی می‌کند به مراتب (حدود ده برابر) بیش از سایر الگوریتم‌های $RANSAC+Affine$ و $RANSAC+Projective$ است. با توجه به بخش ۳-۲ و نتایج به دست آمده؛ الگوریتم $RANSAC+RPC$ در تصاویر ماهواره‌ای آرایه خطی معادل الگوریتم $RANSAC+F$ در تصاویر هندسه‌ی پرسپکتیو است. البته با این تفاوت که الگوریتم $RANSAC+RPC$ منحنی بودن هندسه‌ی اپی‌پولار در تصاویر استریو ماهواره‌ای را نیز در نظر می‌گیرد.

مهم‌ترین نتیجه تحقیق پیش رو را می‌توان به کارگیری الگوریتم نوین $RANSAC+RPC$ دانست که در آن برای توجیه نسبی پایدار تصاویر استریو ماهواره‌ای، از هندسه تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی اشتباهات تناظریابی استفاده شده است.

در مورد نتایج به دست آمده از تصاویر سنجنده $GeoEye1$ بایستی به این توجه داشت که در حال حاضر شرکت‌هایی که وظیفه تولید توابع رشنال برای تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا را بر عهده دارند، ادعا کرده‌اند که در مناطق شهری و یا مناطقی که از آن‌ها نقشه‌های زمین مرجعی در اختیار دارند، مقدار خطای مطلق توابع رشنال زیر ۲ متر می‌باشد. از این رو مقدار خطای نسبی به مراتب مقداری کمتر از آن است. تصاویر مربوط به سنجنده $GeoEye1$ نیز از این حیث مستثنی نیستند؛ زیرا این تصاویر از یک منطقه شهری اخذ شده‌اند. از آنجا که مقدار خطای نسبی توابع رشنال زیر ۰.۰۱۲ پیکسل بود؛ تصحیحی در این توابع انجام نگرفت.

نتایج به دست آمده در جدول (۲) نشان می‌دهد، الگوریتم $RANSAC+RPC$ نسبت به سایر الگوریتم‌های $RANSAC+Affine$ و $RANSAC+Projective$ از موفقیت بالایی برخوردار است. زیرا استفاده از مدل‌های سراسری افاین

مراجع

[1] F. D. Javan and A. Azizi, "Investigations on Applicability of Affine Transformation for Geo-Referencing of Cartosat-1 imageries," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 1, p. 11, 2011.

[2] J. Grodecki and G. Dial, "Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 69, pp. 59-68, 2003.

- [3] C. V. Tao and Y. Hu, "A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 67, pp. 1347-1358, 2001.
- [4] C. S. Fraser and H. B. Hanley, "Bias compensation in rational functions for IKONOS satellite imagery," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, pp. 53-57, 2003.
- [5] A. Alizadeh, S. Kahazaie, H. Arefi, and A. Jamshidzadeh, "Automated bias compensation of RPCs of IRS-P5 Satellite Images Using DEM," *Journal of Geospatial Information Technology*, vol. 2, p. 16, 2014.
- [6] A. Azizi, A. Hadilou, M. Shankayi, and M. Aslani, "The Effect of Shift and Drift Errors in 3D Coordinates Extracted from IRS P5 Imagery," *Geospatial Engineering Journal*, vol. 4, p. 9, 2013.
- [7] C. Li, Y. Shen, B. Li, G. Qiao, S. Liu, W. Wang, et al., "An improved geopositioning model of QuickBird high resolution satellite imagery by compensating spatial correlated errors," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 96, pp. 12-19, 2014.
- [8] R. Negadi, "Determination and Evaluation of The Landslide Volumetric Displacement Using IRS P5 Satellite Images Without GCPs," MS.C, University of Tehran, 2016.
- [9] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [10] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Speeded-up robust features (SURF)," *Computer vision and image understanding*, vol. 110, pp. 346-359, 2008.
- [11] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, and H. Ebadi, "Mutual Information Similarity Measure for Scale and Rotation Invariant Image Matching," *Journal of Geomatics Science and Technology*, vol. 1, p. 14, 2011.
- [12] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, and H. Ebadi, "Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 4516-4527, 2011.
- [13] S. Badrloo, M. Mokhtarzade, and M. J. Valdan Zoj, "Matching of Remote Sensing Images based on Projective Transformation and Using Hopfield Neural Network," *Geospatial Engineering Journal*, vol. 6, p. 12, 2015.
- [14] A. A. Goshtasby, *Image registration: Principles, tools and methods*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [15] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381-395, 1981.
- [16] R. Gupta and R. Hartley, "Linear pushbroom cameras," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 963-975, 1997.
- [17] J. Oh, C. Lee, Y. Eo, and J. Bethel, "Automated georegistration of high-resolution satellite imagery using a RPC model with airborne lidar information," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 78, pp. 1045-1056, 2012.
- [18] F. Hu, M. Wang, and D. Li, "A novel epipolarity model of satellite stereo-imagery based on virtual horizontal plane of object-space," in *International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis*, 2008, pp. 72851D-72851D-8.
- [19] J.-H. Oh, S.-W. Shin, and K.-O. Kim, "Direct epipolar image generation from IKONOS stereo imagery based on RPC and parallel projection model," *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 22, pp. 451-456, 2006.
- [20] M. F. Morgan, "Epipolar resampling of linear array scanner scenes," Ph.D., University of Calgary, Canada, 2004.
- [21] H. Afsharnia, "Digital Elevation Model Generation from High Resolution Satellite

- Imagery using Constrained Least Squares Image Matching," M.Sc., Department of Surveying and Geomatics Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, 2010.
- [22] N. Tatar, M. Saadatseresht, H. Arefi, and A. Hadavand, "QUASI-EPIPOLAR RESAMPLING OF HIGH RESOLUTION SATELLITE STEREO IMAGERY FOR SEMI GLOBAL MATCHING," presented at the Sensors and models in Photogrammetry and Remote Sensing (3rd SMPR), Kish Island, Iran, 2015.
- [23] M. Wang, F. Hu, and J. Li, "Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66, pp. 347-355, 2011.
- [24] M. Wang, F. Hu, and J. Li, "Epipolar arrangement of satellite imagery by projection trajectory simplification," The Photogrammetric Record, vol. 25, pp. 422-436, 2010.
- [25] J. Oh, "Novel Approach to Epipolar Resampling of HRSI and Satellite Stereo Imagery-based Georeferencing of Aerial Images," Ph.D, The Ohio State University, The Ohio State, USA, 2011.
- [26] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple view geometry in computer vision: Cambridge university press, 2003.



Outlier Detection and Relative RPC Modification of Satellite Stereo Images Using RANSAC+RPC Algorithm

Norrallah Tatar ^{*1}, Mohamad Saadateseresh ², Hossein Arefi ³

1- M.sc student of Photogrammetry in School of Surveying and Spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Associated professor in School of Surveying and Spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- Assistant professor in School of Surveying and Spatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

Satellite image providers usually present Rational Polynomial Coefficients (RPCs) as a user friendly solution for georeferencing of images. As RPCs are determined independently for each image scene, there are both absolute and relative georeferencing biases will in stereo scenes. Relative orientation of a stereo scene needs some conjugate image points. Speeded up robust features (SURF) operator is a powerful computer vision algorithm for image feature extraction and matching. Usually some of the features are not actually matched and are outliers. In this paper RANSAC+RPC algorithm is employed to simultaneously detect these outliers and modify the relative bias of RPCs. Our experiments on GeoEye-1 over Qom city and IRS-P5 over Rudehen district, both in central Iran, demonstrated the capability of our proposed algorithm. Though the RPC modification was done robustly for relative orientation of stereo scenes, yet improvement in the reconstructed 3D coordinates are in the range of sub-pixel accuracy. Our experiments demonstrate that the relative RPC shift and drift error will not cause any accuracy improvement in 3D reconstruction problem.

Key words: Rational Polynomial Coefficients (RPC), RPC Modification, Satellite Stereo Imagery, RANSAC+RPC, Outlier Detection.