

مثلث‌بندی هوایی بر اساس تصاویر رقومی، GPS/IMU و پارامترهای بهینه شده سلف کالیبراسیون توسط الگوریتم ژنتیک

سعید صادقیان^۱

اصغر میلان^۲

حامد احمدی مسینه^۳

روح الله کریمی^۴

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۱۱

چکیده

در فرایند تهیه نقشه به روش فتوگرامتری استفاده از داده‌های GPS/IMU در مثلث‌بندی موجب افزایش استحکام بلوک فتوگرامتری و کاهش تعداد نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای سرشکنی بلوک گردیده است. خطاهای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده در مثلث‌بندی، دقت مثلث‌بندی را کاهش داده، استفاده از نقاط کنترل زمینی را حتی با وجود داده‌های GPS/IMU ضروری می‌سازد. بنابراین با کاهش میزان خطای سیستماتیک بر روی داده‌ها می‌توان شاهد افزایش دقت مثلث‌بندی و کاهش تعداد نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای سرشکنی بلوک و هم چنین نوارهای پرواز متقاطع بود.

در این پژوهش نقش پارامترهای سلف کالیبراسیون مانند پارامترهای حذف خطای سیستماتیک داده‌های GPS/IMU برای هر نوار و پارامترهای حذف خطای سیستماتیک سنجنده تصویربرداری به منظور افزایش دقت مثلث‌بندی و کاهش تعداد نقاط کنترل زمینی و کاهش نوارهای پرواز متقاطع مورد نیاز برای سرشکنی بلوک مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین می‌گردد، سپس پارامترهای بهینه تعیین شده، در سرشکنی بلوک به روش باندل مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور حل مشکل ناپایداری معادلات از روش تخمین مؤلفه واریانس استفاده شده است. این روش قادر است علاوه بر پایدارسازی مسئله، ماتریس وزن بهینه را در هنگام سرشکنی تعیین نماید. در این پژوهش از تصاویر دوربین رقومی UltraCam استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون و کاهش میزان خطای داده‌های مورد استفاده در فرایند سرشکنی، تعداد نقاط کنترل و تعداد نوارهای پرواز متقاطع برای سرشکنی بلوک کاهش می‌یابد به گونه‌ای که بدون استفاده از نقاط کنترل و با استفاده از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون، بیشترین میزان خطای RMSE بر روی نقاط چک زمینی، ۰/۱۴۳ متر می‌باشد در حالی که اگر از این پارامترها استفاده نشود در صورت وجود یا عدم وجود نوارهای پرواز متقاطع ماکزیمم خطای RMSE، در حدود یک متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مثلث‌بندی هوایی، GPS/IMU، خطاهای سیستماتیک، تخمین مؤلفه واریانس، الگوریتم ژنتیک، سلف کالیبراسیون.

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول) sa_sadeghian@sbu.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی Milan@gtc.ac.ir

۳- کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشگاه تفرش hamedahmadimasine@gmail.com

۴- استادیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه تفرش rkirimy@ut.ac.ir

۱- مقدمه

مشابه نقاط کنترل عمل نموده و بلوک را به خوبی تحت کنترل درمی‌آورد. در چنین حالتی انتظار می‌رود که نیاز به نقاط کنترل زمینی به حداقل ممکن کاهش یابد (نشریه دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری، ۱۳۸۱، ص. ۲۵). یکی از عوامل مؤثر بر دقت مثلث‌بندی، خطاهای سیستماتیک موجود بر روی داده‌های مورد استفاده می‌باشد خطاهای سیستماتیک موجب می‌گردد که در صورت استفاده از داده‌های GPS/IMU در فرآیند مثلث‌بندی هم چنان وجود نقاط کنترل زمینی الزامی باشد (Heipke et al., 2004).

در صورتی که بتوان خطای سیستماتیک داده‌ها را کاهش داد می‌توان انتظار داشت که دقت مثلث‌بندی افزایش یافته و تعداد نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای سرشکنی بلوک و تعداد نوارهای پرواز متقاطع^۵ که به منظور حذف خطای سیستماتیک داده‌های GPS، استفاده می‌شود کاهش یابد (نشریه ۱۱۹-۲، ۱۳۸۱، ص. ۲۵). کاهش تعداد نقاط کنترل لازم، در کاهش هزینه‌های تهیه نقشه به روش فتوگرامتری مؤثر بوده و برای مناطق دوراز دسترس نیز حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به این که در مثلث‌بندی هوایی با استفاده از داده‌های GPS/IMU از روش باندا استفاده می‌شود و این روش نسبت به خطاهای سیستماتیک مشاهدات فتوگرامتری حساس می‌باشد (نشریه دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری، ۱۳۸۱، ص. ۲۵). حذف خطاهای سیستماتیک موجب افزایش دقت مثلث‌بندی هوایی می‌گردد. متداول ترین روش برای حذف خطای سیستماتیک سنجنده تصویربرداری، روش سلف کالیبراسیون^۶ می‌باشد که در این روش پارامترهای اضافی به معادلات شرط هم خطی^۷ اضافه می‌گردد و موجب می‌شود تا مدل ریاضی مورد استفاده (شرط هم خطی) با مدل فیزیکی در لحظه تصویربرداری منطبق گردد (Cramer, 2004). علاوه بر این می‌توان از پارامترهای اضافی برای حذف خطای سیستماتیک موجود بر روی داده‌های GPS/IMU نیز استفاده نمود. بنابراین معادلات شرط هم

استفاده از سنجنده‌های تصویربرداری رقومی^۱ و تعیین پارامترهای توجیه خارجی^۲ تصاویر با استفاده از سنجنده‌های GPS/IMU^۳ باعث ایجاد تحولی عظیم در زمینه فتوگرامتری هوایی گردیده است. سنجنده‌های تصویربرداری رقومی به طور قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش حجم پردازش داده‌ها، به منظور تولید اطلاعات مورد نیاز کاربران در حوزه‌های مختلف گردیده است. همچنین تعیین مستقیم پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با استفاده از ترکیب سیستم‌های ناوبری^۴ (GPS/IMU) روش‌های توجیه سنجنده را متحول ساخته است (Ip et al., 2007, Shen, 2015, Chio, 2016, Forlani et al., 2019). استفاده از داده‌های GPS/IMU در مثلث بندی هوایی موجب شده تا مثلث بندی هوایی^۵ از حالت مرسوم و سنتی به مثلث بندی مدرن تبدیل شود. در اواخر سال ۱۹۹۰ استفاده از داده‌های حاصل از ترکیب GPS/IMU توسط کشورهای آمریکا، آلمان و کانادا در فتوگرامتری هوایی شروع شد و همزمان با تصویربرداری، پارامترهای موقعیت و وضعیت سنجنده ثبت می‌گردید (Yuan, 2008).

ایجاد یک شبکه از نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای انجام مثلث بندی اغلب کاری دشوار و زمان بر می‌باشد (Micheletti et al. 2015, Immerzeel et al., 2014, Kraaijenbrink et al., 2015). بر این اساس یکی از کارهای تحقیقی در گروه‌های فتوگرامتری و سنجنش از دور بررسی روش‌هایی بوده است که نتیجه آن باعث کاهش تعداد نقاط کنترل مورد نیاز مرحله مثلث بندی بوده است. استفاده از داده‌های GPS/IMU در مثلث بندی هوایی موجب افزایش استحکام بلوک فتوگرامتری می‌گردد و موجب می‌شود نقاط کنترل مورد نیاز برای سرشکنی بلوک به طور معنی داری کاهش یابد (Yuana et al., 2009, Elsharkawy and Habib, 2016, He et al., 2019).

1- Digital Imaging Sensor

2- Exterior Orientation (EO)

3- Global Positioning System/Inertial Measurement Unit

4- Navigation Sytems

5- Cross Strip

6- Self Calibration

7- Colinearity Equation

به نسل بعد منتقل می‌شوند که به آن فرزند نخبه^۱ می‌گویند. جمعیت حاضر با فرزندان جایگزین می‌شوند و نسل بعدی شکل می‌گیرد (کیا، ۱۳۸۸).

در زمینه استفاده از داده‌های GPS/IMU و پارامترهای سلف کالیبراسیون در فرآیند مثلبندی تاکنون بررسی‌های مختلفی صورت گرفته است (Blazquez and Colomina, 2010, Cramer and Stallmann, 2003, Wegmann, 2002, Jacobsen and Wegmann, 2001, Forlani, and Pinto, 2002) [Cramer, 197, Koch, and Kusche, 2002, Yildiz and Oturanc, 2014, Shi et al., 2017] در تحقیقات انجام شده لزوم انجام مثلبندی به منظور تصحیح داده‌های GPS/IMU اولیه مورد تأکید قرار گرفته و توصیه به استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون شده است. پارامترهای سلف کالیبراسیون مورد استفاده شامل پارامترهای حذف خطای سنجنده تصویربرداری و حذف خطای داده‌های GPS/IMU می‌باشد که به منظور حذف خطای داده‌های GPS/IMU از پارامترهای شیف و دریافت استفاده گردیده است. به دلیل وجود کورولیشن بین فاصله کانونی و Z_{GPS} لازم است تنها یکی از این پارامترها به منظور حذف خطاهای سیستماتیک مورد استفاده قرارگیرد (Wegmann, 2002). بدیهی است انتخاب مناسب از پارامترهای سلف کالیبراسیون برای انجام فرآیند سرشکنی در دقت نهایی پردازش تأثیر بسزایی خواهد داشت. براساس داشته‌ها در پژوهش حاضر تعیین بهینه پارامترهای سلف کالیبراسیون با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

به منظور انجام مثلبندی هوایی و بررسی نقش پارامترهای سلف کالیبراسیون در کاهش تعداد نقاط کنترل و تعداد نوارهای پرواز متقاطع، از تصاویر دوربین UltraCam-Xp استفاده شده است که در سال ۸۹ توسط سازمان نقشه‌برداری کشور از یک منطقه در استان فارس اخذ شده است. بلوک مورد نظر شامل ۵۸ تصویر در چهارنوار موازی و دو نوار

خطی که معادلات اساسی در سرشکنی بلوک به روش باندل می‌باشد به گونه‌ای گسترش می‌یابد که شامل پارامترهای حذف خطای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده در فرآیند مثلبندی گردد (Guo et al., 2006). با استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون در معادلات شرط هم خطی دقت مثلبندی افزایش یافته و در واقع می‌توان اینگونه بیان نمود که خطای تعیین مختصات زمینی نقاط کنترل عکسی کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان مسئله تعیین پارامترهای سلف کالیبراسیون را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفت. یکی از الگوریتم‌های مطرح برای حل مسائل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک می‌باشد که کار خود را با استفاده از یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی شروع می‌کند و با استفاده از عملگرهایی مانند تلفیق^۲، جهش^۳ و انتخاب موجب تکامل راه‌حل‌ها می‌گردد. بنابراین می‌توان از الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از الگوریتم‌های هوش محاسباتی، در تعیین پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون استفاده نمود. الگوریتم با تولید یک جمعیت آغازین تصادفی کار خود را آغاز می‌کند. در ادامه یک ترتیب از جمعیت‌های جدید را ایجاد می‌کند (نسل‌ها) و در هر گام، الگوریتم از افراد (کروموزوم^۴) موجود در نسل حاضر برای تولید نسل بعدی استفاده می‌کند. برای تولید نسل جدید به هر عضو از جمعیت حاضر یک امتیاز اختصاص می‌دهد. این کار با محاسبه مقدار شایستگی هر یک از افراد حاضر در جمعیت انجام می‌شود. امتیازهای شایستگی به دست آمده به کمک مقیاس بندی، به محدوده قابل استفاده‌تری از مقادیر تبدیل می‌شوند. والدین براساس میزان شایستگی‌های اختصاص یافته به افراد انتخاب می‌شوند در واقع از افراد شایسته‌تر به عنوان والدین استفاده می‌شود. فرزندان با ایجاد تغییرات تصادفی روی یکی از والدین (جهش) و یا ترکیب بردارهای مربوط به هر دوی والدین (تلفیق) تولید می‌شوند. همچنین افرادی از جمعیت حاضر با بهترین میزان شایستگی به طور مستقیم

1-crossover

2-Mutation

3- Chromosome

4-Elite

$$\varphi = \varphi + d\varphi + (t - t_0) * b\varphi$$

$$\kappa = \kappa + d\kappa + (t - t_0) * b\kappa$$

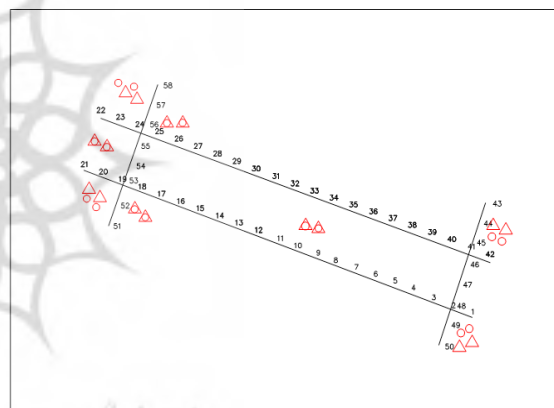
(۱)

پارامترهای شیفت $d\kappa \ d\varphi \ d\omega \ dZ_0 \ dY_0 \ dX_0$ و پارامترهای دریافت $b\kappa \ b\varphi \ b\omega \ bZ_0 \ bY_0 \ bX_0$ سنجنده بوده و به عنوان مجهولات در تصحیح داده‌های GPS/IMU می‌باشند. در سیستم‌های تجاری که تنظیم اولیه در آنها به خوبی انجام شده است در نظر گرفتن سه شیفت موقعیت و وضعیت کافی است و نیازی به در نظر گرفتن پارامترهای دریافت برای مدل کردن تأثیر زمان نمی‌باشد (خوش‌الهام، و همکاران، ۱۳۸۶، همایش ژئوماتیک ۱۶).

با توجه به اینکه مثلث‌بندی با روش باندل نسبت به خطاهای سیستماتیک مشاهدات حساس می‌باشد (نشریه دستورالعمل‌های همسان‌نقشه‌برداری ۱۱۹-۲، ۱۳۸۱)، می‌توان با حذف خطاهای سیستماتیک با استفاده از معادلاتی مانند افاین دقت این روش را بالا برد. همچنین برای محاسبه مقادیر اولیه مختصات نقاط گرهی به منظور استفاده در سرشکنی می‌توان از تقاطع فضایی استفاده نمود. مسئله دیگری که باید مورد توجه قرار بگیرد مشکل ناپایداری مسئله در هنگام سرشکنی بلوک می‌باشد. که در این تحقیق به منظور پایداری مسئله از روش تخمین مؤلفه واریانس^۱ استفاده گردیده است. این روش علاوه بر محاسبه پارامتر پایداری و تأثیر آن در هنگام سرشکنی بلوک، قادر است تا وزن بهینه را در حین سرشکنی محاسبه و اعمال نماید بنابراین با استفاده از این روش سه عملیات سرشکنی، پایداری و تعیین ماتریس وزن بهینه هم‌زمان انجام می‌گیرد (Koch, and Kusche, 2002). مراحل انجام سرشکنی با استفاده از این روش، در نگاره ۲ نمایش داده شده است.

L_x و L_i به ترتیب بردار مشاهده نوع i ام و برآورد اولیه از مجهولات، P_x و P_i به ترتیب ماتریس وزن مربوط به مشاهده نوع i ام و مجهولات، \hat{v} بردار تصحیح مشاهدات و \hat{x} برآورد مجهولات می‌باشد که در مدل پارامتریک خطی

مقاطع می‌باشد. نقاط کنترل موجود در سطح بلوک شامل ۸ نقطه کنترل مسطحاتی ۸ نقطه کنترل ارتفاعی و ۸ نقطه کنترل کامل می‌باشد که در نگاره ۱ نشان داده شده است. هر تصوبردارای ابعاد 11310×17310 پیکسل، ابعاد پیکسل تصاویر ۶ میکرون، فاصله کانونی ۱۰۵۰۰۰ میکرون، میزان پوشش طولی ۷۰ درصد، میزان پوشش عرضی تصاویر ۳۰ درصد و ارتفاع متوسط منطقه ۷۶۰ متر می‌باشد. با توجه به فاصله کانونی، ارتفاع پرواز و ابعاد پیکسل تصویری، قدرت تفکیک زمینی در حدود ۱۲ سانتی متر می‌باشد. هر تصویر محدوده‌ای به طول $2077/2$ متر و عرض $1357/2$ متر را بر روی زمین پوشش می‌دهد. میزان خطای IMU، ۰/۰۵ درجه و میزان خطای GPS، ۰/۰۳ متر می‌باشد.



نگاره ۱: اندکس عکسی بلوک منطقه فارس

به منظور اصلاح داده‌های GPS/IMU از معادلات (۱) استفاده می‌شود. این معادلات که معروف به روش شیفت و دریافت می‌باشد در سال ۱۹۹۴ توسط Ackerman مطرح گردید. به منظور حذف خطاهای سیستماتیک داده‌های GPS/IMU این معادلات به معادلات شرط هم خطی اضافه و موجب گسترش معادلات می‌گردد (Jacobsen, and Weomann, 2002)

$$X_0 = X_0 + dX_0 + (t - t_0) * bX_0$$

$$Y_0 = Y_0 + dY_0 + (t - t_0) * bY_0$$

$$Z_0 = Z_0 + dZ_0 + (t - t_0) * bZ_0$$

$$\omega = \omega + d\omega + (t - t_0) * b\omega$$

پارامترهای بهینه لازم است یک کروموزوم به اندازه تعداد پارامترهای سلف کالیبراسیون مورد استفاده، طراحی گردد. برای مثال در صورتی که از شش پارامتر معادلات افاین و ده پارامتر برای تصحیح داده‌های GPS/IMU برای دو نوار و یک پارامتر تصحیح فاصله کانونی استفاده شود کروموزوم دارای هفده ژن می‌باشد. هر ژن از کروموزوم به عنوان یک پارامتر از پارامترهای سلف کالیبراسیون می‌باشد.

پس از مشخص شدن کروموزوم، برای تعیین میزان شایستگی هر کروموزوم لازم است یک تابع شایستگی تعیین گردد. به منظور تعیین تابع شایستگی ابتدا معادلات تصحیح خطاهای سیستماتیک مطابق با پارامترهای در نظر گرفته شده در کروموزوم، به معادلات شرط هم خطی اضافه می‌شود. پارامتر تصحیح فاصله کانونی و پارامترهای معادله افاین برای کل بلوک ثابت می‌باشد اما پارامترهای تصحیح داده‌های GPS/IMU برای هر نوار به صورت جداگانه استفاده می‌شود. سپس توابع rx و ry در معادلات (۶) به عنوان تابع شایستگی در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود تا به ازای مینیمم شدن آن تابع با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون تعیین شود. سپس با استفاده از یک نقطه کنترل کامل وسط بلوک که درشش تصویر دیده می‌شود تابع هدف مینیمم و پارامترهای بهینه تعیین می‌گردد. با توجه به این که الگوریتم ژنتیک قادر به حل توابع به صورت غیرخطی می‌باشد در این حالت نیاز به خطی سازی معادلات نمی‌باشد. کروموزوم‌های موجود در نسل اول به صورت تصادفی و به صورت یکنواخت تولید می‌شوند و تعداد کروموزوم‌های استفاده شده در هر نسل پنجاه عدد می‌باشد.

$$\begin{aligned} X_0 &= X_{GPS} + a_1 & X_0 &= X_{GPS} + a_6 \\ Y_0 &= Y_{GPS} + a_2 & Y_0 &= Y_{GPS} + a_7 \\ \omega_0 &= \omega_{IMU} + a_3 & \omega_0 &= \omega_{IMU} + a_8 \\ \Phi_0 &= \Phi_{IMU} + a_4 & \Phi_0 &= \Phi_{IMU} + a_9 \\ K_0 &= K_{IMU} + a_5 & K_0 &= K_{IMU} + a_{10} \end{aligned}$$

(۵)

با استفاده از روش کمترین مربعات مطابق با فرمول (۲) برآورد می‌گردد.

$$\hat{x} = (A_1^T P_1 A_1 + \dots + A_n^T P_n A_n + P_x)^{-1} * (A_1^T P_1 L_1 + \dots + A_n^T P_n L_n + P_x L_x) \quad (۲)$$

برآورد مؤلفه واریانس مشاهده نوع i ام $\hat{\sigma}_x^2$ برآورد مؤلفه واریانس مجهولات می‌باشد که طبق فرمول (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_i^2 &= \frac{\hat{v}_i^T P_i \hat{v}_i}{r_i} \\ \hat{\sigma}_x^2 &= \frac{\hat{v}_x^T P_x \hat{v}_x}{r_x} \\ r_i &= m_i - \text{Trace}(A_i^T P_i A_i \cdot N^{-1}) \\ r_x &= u - \text{Trace}(P_x \cdot N^{-1}) \end{aligned} \quad (۳)$$

m_i تعداد مشاهدات نوع i ام، u تعداد مجهولات A_i و ماتریس ضرایب مجهولات برای مشاهدات نوع i ام می‌باشد و N مطابق با فرمول (۴) محاسبه می‌گردد.

$$N = \sum_{i=1}^n A_i^T P_i A_i + P_x \quad (۴)$$

روابط مربوط به سرشکنی بلوک به روش باندل با استفاده از روش تخمین مؤلفه واریانس، در نرم‌افزار Matlab ورژن ۶.۷ پیاده سازی گردیده است. در این روش لازم است یک ماتریس وزن اولیه به عنوان P و P_x در نظر گرفت شود. ماتریس وزن اولیه P، ماتریس وزن یکه در نظر گرفته شده است و به منظور تعیین ماتریس وزن اولیه P_x از مقادیر ۰/۰۵ درجه، ۰/۰۳ متر و ۰/۲ و ۱ متر به عنوان انحراف معیار اولیه به ترتیب برای GPS، IMU، و مختصات نقاط گرهی در صورت وجود یا عدم وجود پارامترهای اضافی استفاده شده است. به منظور یافتن پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون از Toolbox بهینه سازی نرم‌افزار Matlab ورژن ۶،۷ بر مبنای الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای یافتن

حالت اول: سرشکنی بلوک بدون نقطه کنترل و با استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون شامل معادلات افاین و بدون استفاده از داده‌های مربوط به نوارهای پرواز متقاطع. در این سرشکنی از هفده پارامتر شامل شش پارامتر افاین، چهار پارامتر تصحیح X_{GPS} و Y_{GPS} برای نوار اول و دوم و شش پارامتر تصحیح زوایای ω ، ϕ ، K برای نوار اول و دوم و یک پارامتر تصحیح فاصله کانونی که مقادیر بهینه آن توسط الگوریتم ژنتیک تعیین شده است، استفاده می‌گردد.

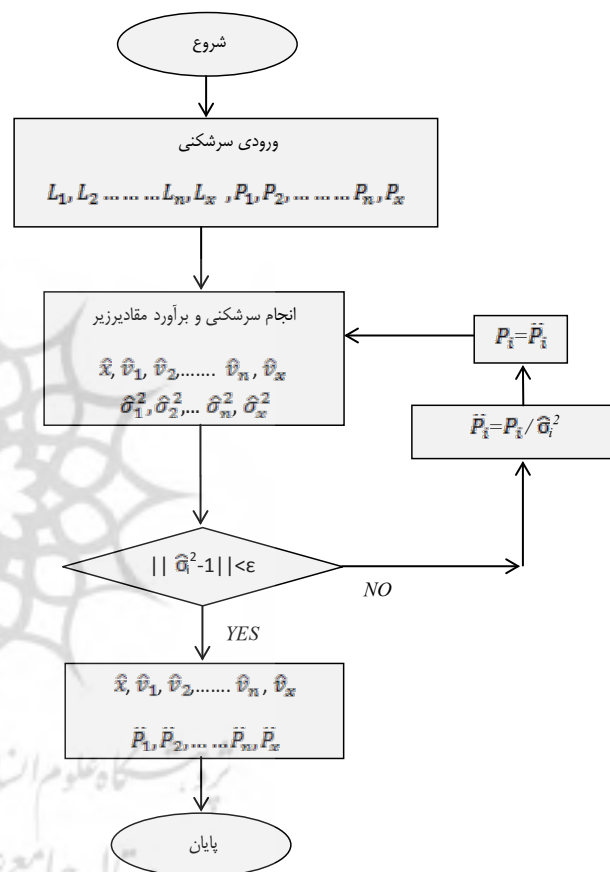
حالت دوم: سرشکنی بلوک بدون استفاده از پارامترهای اضافی و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی در حالتی که نوارهای پرواز متقاطع وجود ندارد. در این بررسی از پارامترهای اضافی به منظور حذف خطاهای سیستماتیک استفاده نشده است تا بتوان میزان تأثیر پارامترهای اضافی در سرشکنی بلوک را بررسی نمود.

حالت سوم: سرشکنی بلوک بدون استفاده از پارامترهای اضافی و بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی در حالتی که نوارهای پرواز متقاطع وجود دارد. در این بررسی، نقش نوارهای پرواز متقاطع در سرشکنی بلوک و تأثیر آن بر میزان خطای مختصات نقاط چک زمینی بررسی گردیده است. پس از انجام سرشکنی و تعیین پارامترهای توجیه خارجی تصاویر، با استفاده از تقاطع فضایی، میزان خطای موجود بر روی شانزده نقطه چک ارتفاعی و مسطحاتی زمینی محاسبه می‌گردد که نتایج آن در جدول ۱، نشان داده شده است.

$$rx = -(f + \Delta f) \frac{m11(X-X0)+m12(Y-Y0)+m13(Z-Z0)}{m31(X-X0)+m32(Y-Y0)+m33(Z-Z0)} - x + \Delta x$$

$$ry = -(f + \Delta f) \frac{m21(X-X0)+m22(Y-Y0)+m23(Z-Z0)}{m31(X-X0)+m32(Y-Y0)+m33(Z-Z0)} - y + \Delta y$$

(۶)



نگاره ۲: مراحل سرشکنی با استفاده از روش تخمین مؤلفه واریانس

خطای مجاز مثلث‌بندی در دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری جلد دوم (نشریه ۲-۱۱۹، ۱۳۸۱) به صورت ذیل بیان شده است:

سرشکنی بلوک در سه حالت زیر انجام گرفته است:

جدول ۱: میزان خطا برای سه حالت سرشکنی و مقایسه با حد مجاز

روش	ماکزیمم خطای x (m)	ماکزیمم خطای y (m)	ماکزیمم خطای z (m)	حد مجاز خطا (m)	RMSE x (m)	RMSE y (m)	RMSE z (m)	حد مجاز RMSE (m)
حالت اول	۰/۲۵۳	۰/۲۱۴	۰/۲۰۸	۱/۲	۰/۱۴۳	۰/۱۲۲	۰/۱۰۶	۰/۶
حالت دوم	۱/۴۵۴	۰/۸۸۴	۱/۴۴۶	۱/۲	۱/۰۹۰	۰/۵۰۰	۱/۰۲۸	۰/۶
حالت سوم	۱/۶۴۶	۰/۹۵۶	۱/۰۴۶	۱/۲	۱/۱۳۷	۰/۵۸۰	۰/۷۷۹	۰/۶

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

مثلث‌بندی هوایی براساس تصاویر رقومی ... / ۷۷

- سرشکنی بلوک بدون استفاده از پارامترهای اضافی، با استفاده از نوارهای پرواز متقاطع.

- سرشکنی بلوک بدون استفاده از پارامترهای اضافی، بدون استفاده از نوارهای پرواز متقاطع.

پارامترهای اضافی مورد استفاده شامل شش پارامتر افاین، چهار پارامتر شیفت X_{GPS} و Y_{GPS} برای نوار اول و دوم و شش پارامتر تصحیح زوایای ω ، ϕ و κ برای نوار اول و دوم و یک پارامتر تصحیح فاصله کانونی و در مجموع هفده پارامتری باشد (جدول ۲). با مقایسه اعداد جدول ۳ می‌توان به نتایج ذیل دست یافت:

- برتری مثلث‌بندی درحالتی که از پارامترهای اضافی استفاده می‌شود نسبت به حالتی که از پارامترهای اضافی استفاده نمی‌شود، با افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی هم چنان محسوس می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای حاصل از ژنیک

مقادیر	پارامترها
-2.11749130454721e-07	پارامتر اول افاین
-3.45753977483868e-08	پارامتر دوم افاین
-7.41406609749905e-08	پارامتر سوم افاین
-7.68384763387009e-08	پارامتر چهارم افاین
-2.86940655229153e-05	پارامتر پنجم افاین
0.000296572429045900	پارامتر ششم افاین
-0.0364800567865632	پارامتر شیفت X_{GPS} نوار اول (متر)
0.0202539835637070	پارامتر شیفت Y_{GPS} نوار اول (متر)
0.00914694878583185	پارامتر شیفت X_{GPS} نوار دوم (متر)
-0.00122824627953139	پارامتر شیفت Y_{GPS} نوار دوم (متر)
-0.00278443816178908	پارامتر ω نوار اول (رادیان)
0.00309164125307338	پارامتر ϕ نوار اول (رادیان)
-0.00135090723621628	پارامتر κ نوار اول (رادیان)
0.00300519195161864	پارامتر ω نوار دوم (رادیان)
-0.00306954683291366	پارامتر ϕ نوار دوم (رادیان)
-0.00165822665800693	پارامتر κ نوار دوم (رادیان)
-53.1140305223799	پارامتر تصحیح فاصله کانونی (میکرون)

- خطاهای RMSE برای نقاط کنترل زمینی نباید از ۳۰ میکرون در مقیاس عکس تجاوز نماید.

- هیچ یک از خطاهای باقیمانده برای نقاط کنترل زمینی نباید از ۶۰ میکرون در مقیاس عکس تجاوز نماید.

باتوجه به این که مقیاس تصاویر مورد استفاده ۱:۲۰۰۰ می‌باشد بنابراین ماکزیمم خطای RMSE، ۶۰ سانتی متر و ماکزیمم خطاهای باقیمانده ۱/۲ متر می‌باشد. زمانی که از پارامترهای اضافی به منظور حذف خطاهای سیستماتیک استفاده گردد ماکزیمم خطای موجود بر روی نقاط چک در حد مجاز می‌باشد ولی در صورت عدم استفاده از پارامترهای اضافی ماکزیمم خطای مسطحاتی و ارتفاعی حتی با وجود نوارهای پرواز متقاطع در حد مجاز نمی‌باشد. علاوه بر ماکزیمم خطای مسطحاتی و ارتفاعی موجود بر روی نقاط کنترل زمینی، معیار دیگر به منظور ارزیابی دقت هندسی مثلث بندی، میزان خطای RMSE بر روی مختصات مسطحاتی و ارتفاعی نقاط چک زمینی می‌باشد. در این حالت نیز در صورت استفاده از پارامترهای اضافی، میزان خطای RMSE بسیار کمتر از حد مجاز می‌باشد در حالی که میزان خطای RMSE بر روی مختصات مسطحاتی و ارتفاعی در صورت عدم استفاده از پارامترهای اضافی، حتی با وجود نوارهای پرواز متقاطع در حد مجاز نمی‌باشد اما درحالتی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده شده است میزان خطای RMSE بر روی مؤلفه ارتفاعی کمتر از حالتی می‌باشد که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده نشده است. با توجه به این که سرشکنی بلوک در مقایسه قبل بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی انجام شده است به منظور مقایسه سه حالت سرشکنی با استفاده از نقاط کنترل زمینی، به ترتیب از صفر تا پنج نقطه کنترل در چهار گوشه بلوک و وسط بلوک در سرشکنی تأثیر داده شده است. در این پژوهش تعداد یازده نقطه چک به صورت ثابت در تمام بررسی‌ها استفاده شده است. سرشکنی بلوک در سه حالت انجام شده است که عبارتند از:

- سرشکنی بلوک با استفاده از پارامترهای اضافی، بدون نقطه کنترل زمینی و بدون استفاده از نوارهای پرواز متقاطع.

جدول ۳: میزان خطای RMSE برای سه حالت سرشکنی با افزایش تعداد نقاط کنترل

مثث بندی بدون استفاده از پارامترهای اضافی، بدون نوار پرواز متقاطع	مثث بندی بدون استفاده از پارامترهای اضافی، با نوارهای پرواز متقاطع	مثث بندی با استفاده از پارامترهای اضافی، بدون نوار پرواز متقاطع	
۰	۰	۰	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۰	۰	۰	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۱/۰۸۲	۱/۱۲۴	۰/۱۳۰	RMSE _x (m)
۰/۵۰۲	۰/۵۶۷	۰/۱۲۳	RMSE _y (m)
۰/۹۸۱	۰/۷۵۲	۰/۱۱۴	RMSE _z (m)
۱	۱	۱	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۱	۱	۱	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۰/۱۳۵	۰/۱۳۷	۰/۱۱۲	RMSE _x (m)
۰/۴۰۱	۰/۳۶۷	۰/۰۹۳	RMSE _y (m)
۰/۸۹۲	۰/۷۶۹	۰/۰۶۴	RMSE _z (m)
۲	۲	۲	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۲	۲	۲	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۰/۱۶۴	۰/۲۲۵	۰/۱۱۲	RMSE _x (m)
۰/۲۱۹	۰/۱۵۴	۰/۰۷۷	RMSE _y (m)
۰/۸۱۰	۰/۵۸۴	۰/۰۵۸	RMSE _z (m)
۳	۳	۳	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۳	۳	۳	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۰/۱۴۳	۰/۱۹۱	۰/۱۰۴	RMSE _x (m)
۰/۱۷۱	۰/۱۹۷	۰/۰۸۴	RMSE _y (m)
۰/۷۸۹	۰/۵۴۵	۰/۰۷۶	RMSE _z (m)
۴	۴	۴	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۴	۴	۴	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۰/۱۲۹	۰/۱۵۸	۰/۱۰۴	RMSE _x (m)
۰/۰۸۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	RMSE _y (m)
۰/۶۹۱	۰/۴۳۴	۰/۰۸۲	RMSE _z (m)
۵	۵	۵	تعداد نقاط کنترل مسطحاتی
۵	۵	۵	تعداد نقاط کنترل ارتفاعی
۰/۱۲۱	۰/۱۵۰	۰/۰۹۹	RMSE _x (m)
۰/۰۷۲	۰/۰۶۹	۰/۰۷۸	RMSE _y (m)
۰/۵۱۲	۰/۳۱۴	۰/۰۶۷	RMSE _z (m)

پرواز، مشترک می‌باشند استفاده شده است. در سرشکنی بلوک با استفاده از نرم‌افزار Match-AT از ۸ نقطه کنترل مسطحاتی و ۸ نقطه کنترل ارتفاعی و ۸ نقطه کنترل کامل و نوارهای پرواز متقاطع استفاده شده است ولی در سرشکنی بلوک با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار Matlab هیچ گونه نقطه کنترلی استفاده نشده است و از نوارهای پرواز متقاطع نیز استفاده نشده است و تنها از پارامترهای اضافی برای حذف خطای سیستماتیک، استفاده شده است. میزان اختلاف مختصات نقاط گرهی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. میزان اختلاف بر روی مختصات ارتفاعی و مسطحاتی (مثلث بندی با استفاده از پارامترهای اضافی)

مثلث بندی با استفاده از پارامترهای اضافی	اختلاف مختصات
۰/۱۷۳	ماکزیمم اختلاف در مختصات X (متر)
۰/۱۳۳	ماکزیمم اختلاف در مختصات Y (متر)
۰/۳۱۱	ماکزیمم اختلاف در مختصات Z (متر)
۰/۰۹۷	RMSE _x (m)
۰/۰۵۹	RMSE _y (m)
۰/۱۹۰	RMSE _z (m)

در مقایسه قبلی از پارامترهای اضافی در سرشکنی بلوک استفاده شده است به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترها در ارزیابی دیگر، برای سرشکنی بلوک در نرم‌افزار Matlab از پارامترهای اضافی استفاده نمی‌شود در واقع سرشکنی بلوک بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی و بدون استفاده از نوارهای پرواز متقاطع و بدون استفاده از پارامترهای اضافی انجام می‌گیرد و پس از انجام سرشکنی میزان اختلاف مختصات زمینی نقاط گرهی محاسبه شده در نرم‌افزار Matlab و نرم‌افزار Match-AT بررسی می‌گردد. همان‌طور که از اعداد ۴ جدول مشخص می‌باشد در صورت عدم استفاده از پارامترهای بهینه در سرشکنی بلوک میزان اختلاف مختصات با آنچه توسط نرم‌افزار Match-AT محاسبه شده است بسیار بیشتر از حالتی می‌باشد که از پارامترها استفاده شده

- افزایش تعداد نقاط کنترل، موجب افزایش دقت سرشکنی و کاهش میزان خطا بر روی نقاط چک زمینی گردیده است. - در صورت استفاده از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون در سرشکنی بلوک علاوه بر این که می‌توان از نوارهای پرواز متقاطع استفاده نکرد، تعداد نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای سرشکنی بلوک نیز به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. - در صورتی که از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون در سرشکنی بلوک استفاده نشود، استفاده از نوارهای پرواز متقاطع می‌تواند میزان خطا بر روی نقاط چک زمینی را کاهش دهد.

- در صورتی که از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون و نوارهای پرواز متقاطع استفاده نشود به منظور کاهش میزان خطای موجود بر روی نقاط چک، لزوم افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی محسوس تر می‌باشد.

- در صورت عدم استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون، افزایش نقاط کنترل نمی‌تواند برتری مثلث‌بندی در حالتی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده می‌شود رانسبیت به حالتی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده نمی‌شود، از بین ببرد.

- در صورت استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون میزان خطای مسطحاتی و ارتفاعی در مقایسه با یکدیگر، اختلاف زیادی ندارد اما در صورت عدم استفاده از پارامترهای اضافی میزان این اختلاف زیاد است و در صورت عدم استفاده از نوارهای پرواز متقاطع، میزان این اختلاف چشمگیرتر است.

به منظور مقایسه نتایج سرشکنی، با نرم‌افزار Match-AT، پس از این که سرشکنی بلوک با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم‌افزار Matlab انجام گرفت و مختصات زمینی نقاط گرهی تعیین گردید، مختصات زمینی نقاط گرهی تعیین شده با مختصات زمینی نقاط گرهی که توسط نرم‌افزار Match-AT تعیین شده است، مقایسه می‌گردد. به منظور مقایسه مختصات زمینی نقاط گرهی، از ۱۰۱ نقطه گرهی که در بلوک در صورت وجود یا عدم وجود نوارهای

به گونه‌ای که در صورت عدم استفاده از پارامترهای بهینه ماکزیمم اختلاف تا یک متر نیز وجود دارد در حالی که اگر از پارامترهای بهینه استفاده گردد ماکزیمم اختلاف ۳۱ سانتی متر می‌باشد.

است به گونه‌ای که در صورت عدم استفاده از پارامترهای بهینه ماکزیمم اختلاف تا یک متر نیز وجود دارد در حالی که اگر از پارامترهای بهینه استفاده گردد ماکزیمم اختلاف ۳۱ سانتی متر می‌باشد.

جدول ۶: میزان اختلاف بر روی مختصات ارتفاعی و مسطحاتی (مثلث بندی با استفاده از نوارهای پرواز متقاطع)

مختصات	مثلت بندی بدون استفاده از پارامترهای اضافی، با استفاده از نوارهای پرواز متقاطع
ماکزیمم اختلاف در مختصات X (متر)	۱/۳۷۹
ماکزیمم اختلاف در مختصات Y (متر)	۰/۷۹۶
ماکزیمم اختلاف در مختصات Z (متر)	۰/۸۸۸
RMSE _x (m)	۰/۶۱۲
RMSE _y (m)	۰/۲۸۵
RMSE _z (m)	۰/۳۰۷

جدول ۵: میزان اختلاف بر روی مختصات ارتفاعی و مسطحاتی (مثلث بندی بدون پارامترهای اضافی)

مختصات	مثلت بندی بدون استفاده از پارامترهای اضافی، بدون استفاده از نوارهای پرواز متقاطع
ماکزیمم اختلاف در مختصات X (متر)	۱/۲۴۷
ماکزیمم اختلاف در مختصات Y (متر)	۰/۸۲۴
ماکزیمم اختلاف در مختصات Z (متر)	۱/۰۹۹
RMSE _x (m)	۰/۶۱۰
RMSE _y (m)	۰/۲۸۹
RMSE _z (m)	۰/۴۲۷

۳- نتیجه گیری

الگوریتم ژنتیک قابلیت تعیین پارامترهای بهینه سلف کالبراسیون را دارا می‌باشد. با توجه به قابلیت الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی توابع غیرخطی، در تعیین پارامترها نیاز به خطی سازی معادلات نمی‌باشد که این امر خود موجب کاهش میزان محاسبات خطی سازی می‌گردد.

روش تخمین مؤلفه وایانس می‌تواند در ترکیب با سرشکنی بلوک به روش باندل به منظور پایدارسازی معادلات و تعیین وتأثیر ماتریس وزن بهینه، مورد استفاده قرار گرفته و سه عملیات سرشکنی، پایدارسازی و تعیین ماتریس وزن بهینه همزمان انجام گیرد.

حتی در صورت وجود داده‌های GPS/IMU نیز وجود نقاط کنترل زمینی برای سرشکنی بلوک ضروری می‌باشد.

استفاده از داده‌های GPS/IMU در سرشکنی بلوک تعداد

در بررسی دیگر از نوارهای پرواز متقاطع نیز در سرشکنی بلوک استفاده شده است. در واقع سرشکنی بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی و بدون استفاده از پارامترهای اضافی و با استفاده از نوارهای پرواز متقاطع انجام می‌شود و میزان اختلاف مختصات زمینی نقاط گرهی محاسبه شده در نرم‌افزار Matlab و نرم‌افزار Match-AT بررسی می‌گردد. همان طور که از اعداد جدول ۶ مشخص می‌باشد میزان اختلاف مختصات، زمانی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده می‌شود به خصوص بر روی مؤلفه ارتفاعی (در مقایسه با اعداد جدول ۴) کمتر می‌باشد و می‌توان نتیجه گرفت که در صورت عدم استفاده از پارامترهای اضافی بهینه، حتی با وجود نوارهای پرواز متقاطع در سرشکنی بلوک میزان اختلاف مختصات با آنچه توسط نرم‌افزار Match-AT محاسبه شده است بسیار بیشتر از حالتی می‌باشد که از پارامترها استفاده شده است

افزایش نقاط کنترل نمی‌تواند برتری مثلث‌بندی در حالتی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده می‌شود رانسبت به حالتی که از نوارهای پرواز متقاطع استفاده نمی‌شود، از بین ببرد.

- در صورت استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون میزان خطای مسطحاتی و ارتفاعی در مقایسه با یکدیگر، اختلاف زیادی ندارد اما در صورت عدم استفاده از پارامترهای اضافی میزان این اختلاف زیاد است و در صورت عدم استفاده از نوارهای پرواز متقاطع، میزان این اختلاف چشمگیرتر است.

- بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی در صورت استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون در سرشکنی بلوک بیشترین میزان خطای RMSE بروی نقاط چک زمینی، ۰/۱۴۳ می‌باشد در صورتی که اگر از این پارامترها استفاده نشود در صورت وجود یا عدم وجود نوارهای پرواز متقاطع میزان ماکزیمم خطای RMSE، در حدود ۱ متر می‌باشد.

- در صورت استفاده از پارامترهای بهینه، اختلاف مختصات زمینی نقاط گرهی که با استفاده از برنامه سرشکنی نوشته شده در نرم‌افزار Matlab محاسبه می‌شود. با مختصات زمینی نقاط گرهی که توسط نرم‌افزار Match-AT محاسبه می‌شود اندک می‌باشد، به گونه‌ای که ماکزیمم این اختلاف در حدود ۳۱ سانتی متر است.

در صورتی که از پارامترهای اضافی استفاده نشود میزان اختلاف مختصات زمینی نقاط گرهی افزایش می‌یابد اما می‌توان با استفاده از نوارهای پرواز متقاطع میزان این اختلاف را کاهش داد.

۴-پیشنهادات

- ارزیابی سایر الگوریتم‌های هوش محاسباتی به منظور یافتن پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون و مقایسه آن با الگوریتم ژنتیک.
- از سایر روش‌های پایدارسازی در سرشکنی بلوک استفاده و توانایی آنها در پایدار سازی معادلات در سرشکنی به روش باندل بررسی گردد.

نقاط کنترل زمینی مورد نیاز را کاهش می‌دهد.

- استفاده از نوارهای پرواز متقاطع، در حذف خطای سیستماتیک داده‌های GPS و کاهش میزان خطای نقاط چک زمینی مؤثر می‌باشد.

- استفاده از پارامترهای اضافی قادر به حذف خطای سیستماتیک داده‌های GPS/IMU می‌باشد.

- در صورت استفاده از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون و حذف خطای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده در مثلث بندی، تعداد نقاط کنترل مورد نیاز برای سرشکنی بلوک کاهش می‌یابد و به دقت‌های قابل قبول می‌توان دست یافت. در صورت استفاده از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون و حذف خطای سیستماتیک داده‌های مورد استفاده در مثلث بندی، تعداد نوارهای پرواز متقاطع لازم کاهش می‌یابد به گونه‌ای که می‌توان بدون نوارهای پرواز متقاطع نیز سرشکنی بلوک را انجام داده و به دقت‌های قابل قبول دست یافت.

- ضرورت افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی مورد نیاز برای کاهش میزان خطا، در بلوکی که فاقد نوار پرواز متقاطع و فاقد پارامترهای تصحیح کننده داده ها می‌باشد، محسوس - تر می‌باشد.

-افزایش تعداد نقاط کنترل، موجب افزایش دقت سرشکنی و کاهش میزان خطا بر روی نقاط چک زمینی در صورت وجود یا عدم وجود پارامترهای اضافی می‌گردد و در صورتی که از پارامترهای اضافی استفاده گردد کاهش میزان خطا محسوس نمی‌باشد.

- با افزایش تعداد نقاط کنترل زمینی هم‌چنان برتری مثلث‌بندی در حالتی که از پارامترهای اضافی استفاده می‌شود نسبت به حالتی که از پارامترهای اضافی استفاده نمی‌شود، محسوس می‌باشد.

- در صورتی که از پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون در سرشکنی بلوک استفاده نشود، استفاده از نوارهای پرواز متقاطع می‌تواند میزان خطا بر روی نقاط چک زمینی را کاهش دهد.

- در صورت عدم استفاده از پارامترهای سلف کالیبراسیون،

Photogrammetry and Geoinformation, University of Hannover, Germany.

8-Cramer, M., 2002, Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation, Institute for Photogrammetry (ifp), Stuttgart, pp.161-172.

9-Elsharkawy, Ahmed S., and Ayman F. Habib. 2016. "Error Analysis for the Airborne Direct Georeferencing Technique." The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic

10- Forlani, G., and L. Pinto, 2002, Integrated INS/DGPS Systems Calibration And Combined Block Adjustment, Proceedings of the OEEPE Workshop: Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Geoinformation, University of Hannover, Germany, pp.85-96.

11- Gianfranco, F., Fabrizio, D., Umberto, M. d. C. and Riccardo, R., 2019, Indirect UAV Strip Georeferencing by On-Board GNSS Data under Poor Satellite Coverage, Journal of Sensors.

12- Guo, D., L. Wu, J. Wang, and X. Zheng, 2006, Use the GPS/IMU new technology for photogrammetric application, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, IEEE International Conference.

13- Haiqing, H., Ting C., Huaien, Z. and Shengxiang, H., 2019, Ground Control Point-Free Unmanned Aerial Vehicle-Based Photogrammetry for Volume Estimation of Stockpiles Carried on Barges, Journal of remote sensing.

14- Heipke, C., K. Jacobsen, and H. Wegmann, 2004, Integrated Sensor Orientation, Proceedings of the OEEPE Workshop: Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Geoinformation, University of Hannover, Germany.

15- Ip, A., N. El-Sheimy, and M. Mostafa, 2007, Performance Analysis of Integrated Sensor Orientation, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 73, No. 1, pp.089-097.

16- Immerzeel, W. W., Kraaijenbrink, P. D. A., Shea, J. M., Shrestha, A. B., Pellicciotti, F., Bierkens, M. F. P. and de Jong, S. M., 2014. High-resolution monitoring

• نقش پارامترهای بهینه سلف کالیبراسیون در افزایش دقت

مثلث‌بندی برای دو منطقه مسطح و کوهستانی مقایسه گردد.

• با توجه به این که تصاویر دوربین رقومی UltraCam از چند زیر تصویر تشکیل می‌شود، در فرآیند سلف کالیبراسیون از زیر تصاویر دوربین نیز استفاده گردد.

• با توجه به این که در پژوهش حاضر از تصاویر دوربین UltraCam-Xp استفاده شده می‌توان در بررسی‌های دیگر از سایر تصاویر دوربین UltraCam مانند UltraCam-D نیز استفاده نمود.

• علاوه بر دوربین‌های رقومی از دوربین‌های آنالوگ که داده‌های GPS/IMU برای آن وجود دارد استفاده گردد.

منابع و مآخذ

۱- خوش‌الهام، سعادت سرشت، میلان لک؛ کوروش، محمد، اصغر؛ ۱۳۸۶، کالیبراسیون سیستم تلفیقی GPS/INS و توجیه مستقیم دوربین هوایی، همایش ژئوماتیک ۸۶، سازمان نقشه‌برداری کشور.

۲- کیا، سید مصطفی؛ ۱۳۸۸، الگوریتم‌های ژنتیک در Matlab (ص ۸۴-۱۶۵)، انتشارات کیان رایانه سبز، ۱۹۲ صفحه.

۳- نشریه شماره ۲-۱۱۹ دستورالعمل‌های همسان نقشه‌برداری. جلد دوم، نقشه‌برداری هوایی (کلیات). (ص ۲۵-۴۵).

4- Blazquez, M. and M., Colomina, 2010, On the Role Of Self-Calibration Functions In Integrated Sensor Orientation, Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2010, EuroSDR and ISPRS.

5-Chio, S.-H., 2016. VBS RTK GPS-assisted self-calibration bundle adjustment for aerial triangulation of fixed-wing UAS images for updating topographic maps. Bol Cienc Geod. 22, 665-684. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000400038>.

6- Cramer, M., 1997, GPS/INS Integration, Institute for Photogrammetry (ifp), Stuttgart.

7- Cramer, M. and D., Stallmann, 2003, On The Use Of GPS/Inertial Exterior Orientation Parameters In Airborne Photogrammetry, Proceedings of the OEEPE Workshop: Integrate Sensor Orientation, Institute for

the accuracy of point in photogrammetry, International Journal of aerospace and mechanical engineering, VO1:8, No:9 , pp.677-680

- of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. Remote Sensing of Environment, 150: 93–103.
- 17- Jacobsen, K., and H. Wegmann, 2001, Dependency and Problems of Direct Sensor Orientation, Proceedings of the OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Geoinformation, University of Hannover , Germany.
- 18- Koch, K.R., and J. Kusche, 2002, Regularization of geopotential determination from satellite data by variance components, Journal of Geodesy, Vol.76, pp.259-268.
- 19- Kraaijenbrink, P. D. A., Shea, J. M., Pellicciotti, F., de Jong, S. M. and Immerzeel, W. W., 2016. Object based analysis of unmanned aerial vehicle imagery to map and characterise surface features on a debriscovered glacier. Remote Sensing of Environment, 186: 581–595
- 20- Micheletti, N., Lane, S. N. and Chandler, J. H., 2015. Application of archival aerial photogrammetry to quantify climate forcing of Alpine landscapes. The Photogrammetric Record, 30(150): 143–165.
- 21- Sandau, R., 2010, Digital Airborne Camera, Introduction and Technology, pp. 107-130.
- 22- Shi, J. B., Yuan, X. X., Cai, Y. and Wang, G. J., 2017. GPS real time precise point positioning for aerial triangulation. GPS Solutions, 21(2): 405–414
- 23- Shen, X. (2015). Accurate direct georeferencing of aerial imagery in national coordinates. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105, 13-18. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.008>
- 24- Wegmann, H., 2002, Image Orientation by Combined (A) AT with GPS and IMU, Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale, IAPRS, Comm. I, Vol. 34, part 1, Denver, Colorado, USA.
- 25- Yuan, X., 2008, A novel method of systematic error compensation for a position and orientation system, Progress in Natural Science, Vol. 18, Issue 8,10, pp. 953-963.
- 26- Yuana, X., J. Fua, H. Suna and C. Tothb, 2009, The application of GPS precise point positioning technology in aerialtriangulation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 64, Issue 6, pp.541-550.
- 27- Yildiz, F. and S.Y. Oturanc, 2014, An investigation of direct and indirect geo-referencing techniques on



پروہشگاہ علوم انسانی و مطالعات فرہنگی
پرتال جامع علوم انسانی