

ارائه روشی خودکار جهت محاسبه تقریبی المانهای توجیه خارجی و مختصات نقاط گرهی تصاویر هوایی پهپاد به منظور تشکیل دقیق بلوک فتوگرامتری

امین نورمحمد*^۱، محمدسعادت سرشت^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده فنی - دانشگاه تهران
a.nourmohamad@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده فنی - دانشگاه تهران
msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۲، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۳)

چکیده

در یک دهه اخیر استفاده از سیستم‌های فتوگرامتری پهپاد کم هزینه برای اخذ تصاویر پوشش دار و رسیدن به اهداف عمده فتوگرامتری که تهیه نقشه از یک منطقه می‌باشد رونق بسیاری پیدا کرده است که دلیل این توجه ویژه، مزایای فتوگرامتری پهپاد در کاهش هزینه، سرعت بالا و نیاز کمتر به افراد متخصص و تجهیزات خاص نسبت به فتوگرامتری هوایی سرنشین دار و نقشه برداری زمینی است. به دلیل وجود تعدادی از عوامل، نظیر به کارگیری دوربین‌های رقومی غیرمتریک در این سیستم‌ها و همچنین ناپایداری این سیستم‌ها در برابر شرایط محیطی و جوی، تصاویر اخذ شده به وسیله این سیستم‌ها دارای مشکلاتی نظیر دوران‌های خارج از حد نرمال و تغییر مقیاس قابل توجه می‌باشند. با توجه به اینکه نرم افزارهای فتوگرامتری، براساس خصوصیات تصاویر اخذ شده از دوربین‌های متریک طراحی شده‌اند قادر به پردازش خودکار تصاویر اخذ شده از سیستم‌های فتوگرامتری پهپاد کم هزینه نیستند و این مشکل موجب ایجاد یک گپ بزرگ بین مرحله اخذ تصاویر و محاسبات دقیق مثلث بندی هوایی شده است. در این تحقیق هدف، برطرف کردن گپ ایجاد شده از طریق پردازش خودکار تصاویر اخذ شده از سیستم‌های فتوگرامتری پهپاد کم هزینه و آماده سازی داده ورودی به نرم افزارهای فتوگرامتری جهت مثلث بندی هوایی دقیق بوده است. در این راستا استخراج و تناظریابی دقیق عوارض نقطه‌ای که مستقل از تغییرات مقیاس و دوران باشند بر روی ۱۱۶ تصویر اخذ شده از یک منطقه تپه ماهوری به وسیله پهپاد کم هزینه، با به کارگیری الگوریتم‌های SIFT (Scale Invariant Feature Transform) و هندسه اپیپولار انجام شد. بر اساس تقاطع پروژکتیو و به کارگیری الگوریتم کوانترنیون واحد، هم مرجع سازی تصاویر و بازسازی مختصات سه بعدی نقاط گرهی در یک سیستم مختصات مرجع اختیاری انجام شد و به همراه آن‌ها پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در زمان تصویربرداری در این سیستم مختصات بدست آمدند. در نهایت تمامی این خروجی‌ها به صورت فرمت PATB به نرم افزار فتوگرامتری (LPS (Leica Photogrammetry Suite) برده شدند و با یک سرشکنی دسته پرتوی دقیق در محیط نرم افزار LPS، مثلث بندی هوایی دقیق انجام شد و به عنوان نمونه، مدل سه بعدی از زوج تصاویر جهت تبدیل تصاویر به نقشه سه بعدی، مدل ارتفاعی رقومی زمین و ارتوفتوموزاییک از بخشی از منطقه بدست آمد.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری پهپاد کم هزینه، SIFT، هندسه اپی‌پولار، تقاطع پروژکتیو، کوانترنیون واحد، بازسازی سه بعدی، سرشکنی دسته پرتو

۱- مقدمه

به طور کلی فتوگرامتری پهپاد^۱ به وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین گفته می‌شود که مجهز به سکوی پرواز، سنجنده‌های فتوگرامتری و بخش ناوبری پرواز می‌باشند [۱]. در سال‌های اخیر به علت نیاز به تصویربرداری از نواحی غیر قابل دسترس که نیاز به پرواز در ارتفاعات پائین می‌باشد و همچنین صرفه جویی در زمان و هزینه و عدم نیاز به محدودیت‌های فیزیولوژیکی، به کارگیری فتوگرامتری پهپاد کم هزینه رواج زیادی پیدا کرده است [۱]، [۲]. از سوی دیگر فتوگرامتری پهپاد کم‌هزینه به علت وزن پائین سیستم، به کارگیری سنسورهای غیرمتریک ارزان قیمت و کنترل از راه دور سیستم، قابلیت اخذ تصاویر با کیفیت بالا و پوشش‌های منظم نظیر تصاویر اخذ شده از سیستم‌های فتوگرامتری هوایی سرنشین دار را ندارد و تصاویر اخذ شده از این سیستم‌ها دارای اعوجاجات هندسی قابل توجه، دوران‌های خارج از حد نرمال، تغییرات مقیاس و کشیدگی تصویری می‌باشند [۳]، [۴]. در سال‌های اخیر برای تناظریابی این تصاویر به منظور پردازش‌های فتوگرامتری، از الگوریتم‌های عارضه مبنای بسیاری [۵]، [۶] و [۷] که نسبت به مشکلات این تصاویر مستقل هستند استفاده شده است. یکی از بهترین الگوریتم‌های استخراج و تناظریابی عارضه از این تصاویر الگوریتم SIFT^۲ [۸] بوده است که علاوه بر اینکه مستقل از تغییرات دورانی و مقیاس و تا حدودی کشیدگی تصاویر، عوارض نقطه‌ای را در تصاویر استخراج و تناظریابی می‌کند، دارای دقت بالاتری هم نسبت به الگوریتم‌های مشابه نظیر Harris [۹]، SURF^۳ [۱۰] و PCA-SIFT^۴ [۱۱] می‌باشد. همچنین به منظور بازسازی هندسه این تصاویر در لحظه تصویربرداری برای دوربین‌های غیرمتریک، مطالعات بسیاری بر مبنای استفاده از مدل ریاضی هندسه اپیپولار^۵ برای نقاط متناظر انجام شده است که علاوه بر استخراج هندسه تصاویر یا به عبارتی پارامترهای توجیه خارجی تصاویر در لحظه تصویربرداری،

ساختار سه بعدی نقاط تناظریابی شده را هم استخراج می‌کنند [۱۲]، [۱۳].

در یک دهه گذشته، به علت مزایای فتوگرامتری پهپاد کم هزینه، پردازش بر روی تصاویر اخذ شده از سیستم‌های پهپاد، مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۱، L. Barazzeti در زمینه استخراج موقعیت و وضعیت دوربین در هنگام اخذ تصاویر، تحقیقات گسترده‌ای را برای تصاویر مختلف برد کوتاه و همچنین تصاویر اخذ شده از سیستم‌های فتوگرامتری پهپاد کم هزینه انجام داد که توانست با به کارگیری الگوریتم عارضه مبنای SIFT و تکنیک‌های بازسازی ساختار سه بعدی مبتنی بر هندسه اپیپولار، پارامترهای توجیه خارجی^۶ دوربین در حین تصویربرداری را به همراه ساختار سه بعدی منطقه مورد تصویربرداری استخراج کند [۱۴].

[۱۵]. در همین سال Chun Sun Zhang، تکنیکی برای بازسازی ساختار سه بعدی تصاویر پهپاد بر مبنای استخراج خودکار عوارض در تصاویر و انجام سرشکنی دسته پرتوی نقاط گرهی ارائه کرد [۱۶]. همچنین در همین سال Zhi Wang، با تکنیک‌های مبتنی بر بازسازی ساختار سه بعدی و با به کارگیری الگوریتم‌های عارضه مبنای تصاویر اخذ شده از سیستم میکرو فتوگرامتری پهپاد مجهز به دوربین رقومی غیرمتریک با رزولوشن بالا را پردازش خودکار کرد و از تصاویر فوق تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین^۷ نمود [۱۷]. در سال ۲۰۱۲ نیز، Jan Xiong و Xiao تحقیقات عمده‌ای در زمینه بازسازی ساختار سه بعدی تصاویر اخذ شده در فتوگرامتری برد کوتاه و فتوگرامتری پهپاد با به کارگیری پارامترهای کالیبراسیون دوربین، اپراتورهای عارضه مبنای استخراج عوارض، مدل ریاضی هندسه اپیپولار و تکنیک‌های مثلث بندی هوایی نقاط متناظر تصاویر انجام داد [۱۸]، [۱۹]. در همین سال Zi Ming Xiaong، یک روش کاملا خودکار برای استخراج ساختار سه بعدی منطقه تصویربرداری شده از سیستم‌های پهپاد کم هزینه را ارائه داد [۲۰]، که در آن بر اساس اپراتورهای SIFT و Harris، استخراج و تناظریابی عوارض صورت پذیرفت. او در این روش بر اساس اطلاعات کالیبراسیون دوربین و مدل Perspective

Projection [۱۳] و تکنیک‌های سرشکنی دسته پرتو،

^۱ Unmanned Aerial Vehicle(UAV)

^۲ Scale Invariant Feature Transform

^۳ Speeded-Up Robust Features

^۴ Principle Component Analysis

^۵ Epipolar Geometry

^۶ Exterior Orientation

^۷ Digital Terrain Model(DTM)

توجیه نسبی و توجیه مطلق شده) جهت تبدیل به نقشه استخراج شدند و همچنین به منظور قابلیت تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین و ارتوموزائیک از این تصاویر، به عنوان نمونه مدل ارتفاعی رقومی و ارتوفتوموزائیک از بخشی از منطقه تولید شدند.

در ادامه مبانی تئوری روش پیشنهادی برای تشکیل بلوک فتوگرامتری از تصاویر اخذ شده با پهپاد شامل الگوریتم SIFT، هندسه اپیپولار، الگوریتم RANSAC و نحوه اعمال آن به مدل ریاضی ماتریس بنیادی به همراه اصول هم مرجع سازی تصاویر در این تحقیق تشریح می-شود. سپس پیاده سازی این الگوریتمها در عمل روی ۱۱۶ تصویر هوایی اخذ شده با فتوگرامتری پهپاد کم هزینه که مجهز به دوربین رقومی غیرمتریک و سامانه ناوبری تقریبی (منظور از این سامانه، سامانه ای با قابلیت حفظ تعادل موقعیت و وضعیت پهپاد است که قابلیت کنترل و هدایت پهپاد در جهت دهی در مسیر طراحی پرواز را ندارد و این امر توسط اپراتور پرواز انجام می پذیرد) است ارائه شده و نتایج مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- استخراج و تناظریابی نقاط گرهی

مزیت اصلی روش پیشنهادی در این تحقیق، قابلیت محاسبه مقادیر تقریبی المانهای توجیه خارجی تصاویر و مختصات زمینی نقاط گرهی در تصاویر با تیلت بالا و با تغییرات مقیاس بالا به صورت خودکار جهت استفاده در معادلات دسته اشعه در نرم افزارهای متداول فتوگرامتری جهت مثلث بندی هوایی دقیق است. نقاط گرهی استخراج شده در این روش از نظر تعداد، تراکم و دقت تناظریابی با توجه به تغییر مقیاس و تیلت بالای تصاویر از کیفیت بالاتری نیز نسبت به نرم افزارهای متداول فتوگرامتری برخوردار است. دلیل کیفیت بالاتر استخراج و تناظریابی نقاط گرهی در این روش نسبت به نرم افزارهای متداول فتوگرامتری در این است که نرم افزارهای متداول فتوگرامتری بر اساس تصاویر اخذ شده با تیلت کم و تغییر مقیاس پائین که در فتوگرامتری هوایی سرنشین دار اخذ می شوند طراحی شده اند و به علت عدم استفاده از الگوریتمهای عارضه مبناء، قابلیت استخراج و تناظریابی نقاط گرهی در تصاویر با تیلت بالا و مقیاس های متفاوت را ندارند.

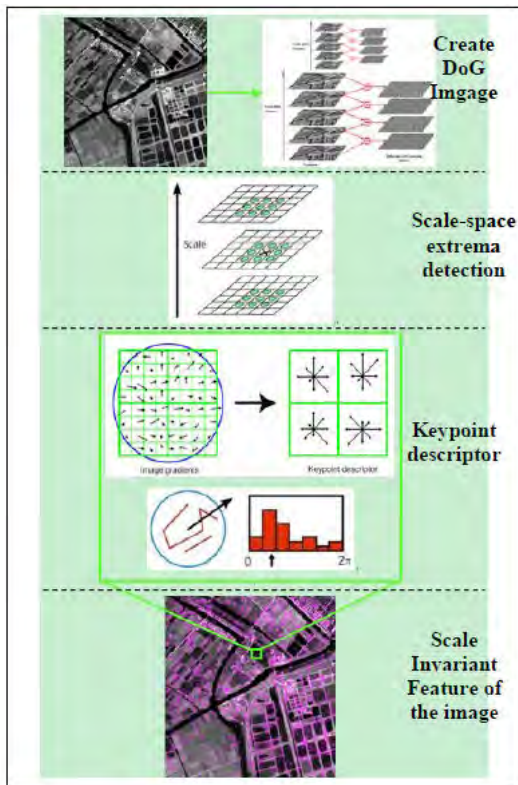
بازسازی ساختار سه بعدی منطقه را بدون در دسترس بودن اطلاعات GPS/IMU و به صورت آزاد انجام داد. از دیگر تحقیقاتی که در این زمینه در سال های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۲ انجام شده است می توان به تحقیقات A.Irschara در زمینه بازسازی ساختار سه بعدی تصاویر اخذ شده از سیستم های پهپاد به صورت خودکار اشاره کرد که با به کارگیری پردازش های موازی برای افزایش سرعت، نتایج حاصل از بازسازی خودکار خود را با بازسازی نیمه خودکار در نرم افزار Photomodeler مقایسه کرد و نتایج نشان داد که از نقطه نظر سرعت و دقت، بازسازی منطقه بهبود چشمگیری داشت [۲۱].

در این تحقیق، به منظور محاسبه مقادیر تقریبی المانهای توجیه خارجی تصاویر و مختصات زمینی نقاط گرهی به صورت خودکار جهت استفاده در معادلات دسته اشعه در نرم افزارهای متداول فتوگرامتری جهت مثلث بندی هوایی دقیق تصاویر اخذ شده از فتوگرامتری پهپاد کم هزینه بدون نیاز به اندازه گیری نقاط گرهی در تصاویر به صورت دستی که هدف اصلی این مقاله بوده است، مراحل زیر انجام شده است:

در ابتدا استخراج و تناظریابی نقاط گرهی تمامی تصاویر بر مبنای الگوریتم عارضه مبنای SIFT انجام شده است، با استفاده از اعمال الگوریتم RANSAC^۱ [۲۲] به مدل ریاضی ماتریس بنیادی^۲ [۲۳]، علاوه بر حذف بلاندرهای موجود در نقاط گرهی، هندسه ی تصاویر مجاور و پوشش دار نسبت به هم استخراج شده است. سپس مختصات سه بعدی نقاط متناظر با استفاده از هندسه نسبی تصاویر و تقاطع پروژکتیو [۱۲]، در سیستم مختصات محلی هر تصویر محاسبه شده است. در مرحله بعد ایر نقاط گرهی مربوط به هر تصویر با استفاده از اعمال متوالی الگوریتم کوانترنیون واحد [۲۴] در یک سیستم مختصات مرجع اختیاری، هم مرجع سازی شده اند. به این ترتیب تا اینجا، هندسه نسبی تصاویر در لحظه تصویربرداری در یک سیستم مختصات مرجع محاسبه شده اند. در نهایت بلوک تقریبی تصاویر فوق به نرم افزار موجود فتوگرامتری (LPS) معرفی شد و در یک فرآیند مثلث بندی هوایی دسته پرتو هندسه تصاویر با دقت بالایی محاسبه و برآورد گردید. در نتیجه مدل های سه بعدی تصاویر متناظر (مدل های

۱ RANSAC

۲ Fundamental Matrix



شکل ۱- مراحل کلی الگوریتم SIFT [۸]

۲-۲- الگوریتم RANSAC

این الگوریتم یک الگوریتم با راه حل تکراری است برای تخمین پارامترهای یک مدل ریاضی از یک سری داده-های مشاهداتی که ممکن است حاوی داده‌های اشتباه هم باشند. این الگوریتم به صورت رندم حداقل تعداد داده‌های ممکن برای تخمین مدل مربوطه را انتخاب و پارامترهای مربوط به مدل را تخمین می‌زند، بعد از آن تمامی داده‌ها را در مدل تخمین زده قرار می‌دهد و بر اساس یک حد آستانه داده‌هایی که با مدل فوق همخوانی ندارند را به عنوان داده اشتباه کنار می‌گذارد. این روند آنقدر تکرار می‌شود که بهترین مدل با تعداد بیشترین داده درست بدست بیاید. به این ترتیب بهترین مدل ممکن انتخاب و داده‌های اشتباه به عنوان بلاندر از محاسبات حذف می‌شوند.

$$\left(1 - (1 - e)^s\right)^N = 1 - p \quad (1)$$

$$N = \log(1 - p) / \log\left(1 - (1 - e)^s\right) \quad (2)$$

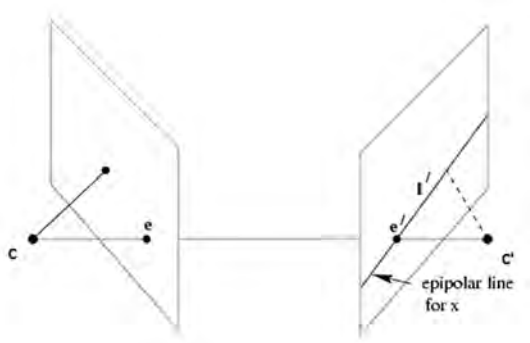
تمامی این مزایا مدیون بکارگیری الگوریتم دقیق و پایدار استخراج عارضه و تناظریابی نقاط گرهی SIFT و همچنین الگوریتم پایدار RANSAC+F^۱ در شناسایی و حذف نقاط متناظر اشتباه می‌باشد. در ادامه این الگوریتم-ها تشریح می‌شوند.

۲-۱- الگوریتم SIFT

این روش یکی از روش‌های عارضه مبنا در استخراج و تناظریابی عوارض نقطه‌ای در تصویر است. در این روش موقعیت‌هایی از تصویر که مستقل از مقیاس و دوران هستند با ایجاد فضای مقیاس استخراج می‌شوند و تناظریابی عوارض استخراج شده بر اساس فاصله اقلیدسی بین توصیفگرهای مربوط به هر عارضه انجام می‌گیرد. در مرحله استخراج عوارض در الگوریتم SIFT علاوه بر موقعیت هر عارضه، دو پارامتر مقیاس و جهت هم برای هر عارضه استخراج می‌شود که به موجب آن، عوارض استخراج شده مستقل از مقیاس و دوران خواهد بود. بعد از استخراج عوارض بر مبنای مقیاس و جهت هر عارضه برای هر عارضه یک توصیفگر ایجاد می‌شود به گونه‌ای که معیار مشابهت مورد استفاده برای تناظریابی فاصله‌ی اقلیدسی میان توصیفگرهای عوارض دو تصویر می‌باشد. عوارضی که کمترین میزان فاصله‌ی اقلیدسی مابین توصیفگرهای آن‌ها وجود دارد به عنوان عوارض متناظر انتخاب می‌شوند [۸].

در شکل ۱ مراحل استخراج عارضه و تشکیل توصیفگر SIFT آورده شده است.

^۱ RANSAC fit to Fundamental Matrix



شکل ۳- هندسه اپیپولار [۱۲]

۲-۳-۱- ماتریس اساسی^۴

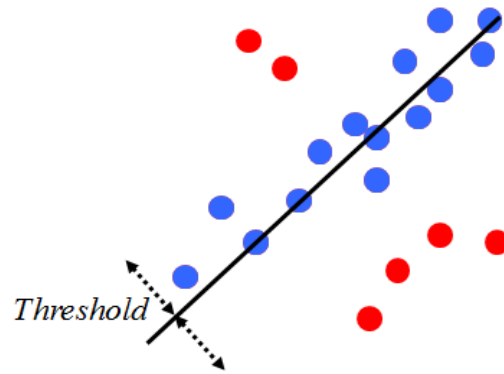
شکل ریاضی هندسه اپیپولار بین مختصات هموزن^۵ دو تصویر در سیستم مختصات کالیبره شده با ساختار متریک^۶ [۱۲] از طریق ماتریس اساسی بیان می شود. رابطه ۳ بیانگر رابطه ریاضی هندسه اپیپولار می باشد، به گونه ای که P مختصات هموزن نقاط در سیستم مختصات کالیبره شده تصویر اول، P' مختصات هموزن نقاط در سیستم مختصات کالیبره شده تصویر دوم و E همان ماتریس اساسی می باشد. همچنین حاصلضرب خارجی E و P بیانگر خط اپیپولار در تصویر دوم است که P' باید روی این خط قرار بگیرد تا هندسه اپیپولار برقرار باشد.

$$p'^T E p = 0 \quad (3)$$

۲-۳-۲- ماتریس بنیادی

شکل کلی تر رابطه ماتریس اساسی در سیستم مختصات غیر کالیبره شده با ساختار پروژکتیو^۷ [۱۲] بین مختصات هموزن نقاط متناظر دو تصویر برقرار است که ماتریس بنیادی نام دارد. این ماتریس یک ماتریس ۳*۳ از مرتبه ۲ می باشد که از طریق ماتریس کالیبراسیون مربوط به دوربین در دو لحظه تصویربرداری (M و M') و جایگذاری رابطه ۴ در رابطه ۳ قابل تبدیل به ماتریس اساسی می باشد. رابطه ۸ بیانگر رابطه ماتریس بنیادی و شکل ۴ بیانگر هندسه اپیپولار با در نظر گرفتن پارامترهای ماتریس اساسی و ماتریس بنیادی می باشند.

رابطه ۱ شرط اتمام تکرار در روند حل تکراری الگوریتم RANSAC می باشد و به ترتیب در روابط فوق، S تعداد حداقل داده های ورودی مورد نیاز برای تخمین پارامترهای مدل ریاضی، N تعداد کل داده های ورودی، $(1-e)^S$ بیانگر احتمال درست بودن تمامی داده S داده و P بیانگر حدآستانه برای انتخاب داده های درست است. شکل ۲ نشان دهنده چگونگی حذف بلاندرها در الگوریتم RANSAC می باشد.



شکل ۲- چگونگی حذف بلاندرها در الگوریتم RANSAC [۲۲]

۲-۳-۳- هندسه اپیپولار

برای تصاویر استرئو که از دو ایستگاه متفاوت از یک منظر مشترک اخذ شده اند، هندسه دو دوربین نسبت به هم در هنگام اخذ تصاویر، از طریق هندسه اپیپولار بیان می شود به گونه ای که همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است صفحه ای که از امتداد CC' (باز بین دو تصویر) و یک نقطه روی تصویر می گذرد، صفحه اپیپولار^۱ آن نقطه خواهد بود. در صورتی که صفحات اپیپولار دو نقطه در دو تصویر استرئو منطبق بر هم باشند، هندسه اپیپولار برقرار خواهد بود. در این صورت هر نقطه در هر تصویر، یک خط در تصویر متناظر خود تولید می کند که این خط به نام خط اپیپولار^۲ شناخته می شود. تمامی خطوط اپیپولار در هر تصویر یکدیگر را در نقطه حاصل از تلاقی باز هوایی دو تصویر و صفحه تصویر به نام نقطه e یا همان نقطه اپیپول^۳ تصویر قطع می کنند.

^۴ Essential Matrix

^۵ Homogeneous Coordinate

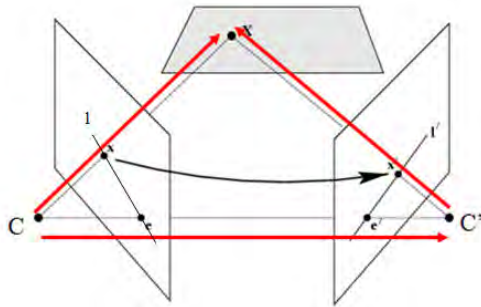
^۶ Metric Reconstruction

^۷ Projective Reconstruction

^۱ Epipolar Plane

^۲ Epipolar Line

^۳ Epipole



شکل ۴- پارامترهای ریاضی هندسه اپی‌پولار [۱۳]

$$M = \begin{pmatrix} f_{sx} & s & o_x \\ 0 & f_{sy} & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (۴)$$

که در این رابطه f فاصله کانونی دوربین، s_x و s_y پارامترهای مربوط به غیر مربعی بودن پیکسل، s پارامتر عمود نبودن محورها و (o_x, o_y) مختصات مرکز تصویر می‌باشند.

$$p' = M^{-1}x', \quad p = M^{-1}x \quad (۵)$$

از طریق جایگذاری P' و P در رابطه ۳ رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$(M^{-1}x')^T E (M^{-1}x) = 0 \quad (۶)$$

از طریق اعمال ضرب داخلی در رابطه ۶ رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$x'^T M^{-T} E M^{-1}x = 0 \quad (۷)$$

رابطه ۷ ارتباط بین ماتریس اساسی و ماتریس بنیادی را بیان می‌کند که از طریق ماتریس بنیادی F در رابطه ۸ بیان شده است.

$$x'^T Fx = 0 \quad (۸)$$

در رابطه فوق x مختصات هموزن نقاط در سیستم مختصات کالیبره نشده تصویر اول، x' مختصات هموزن نقاط در سیستم مختصات کالیبره نشده تصویر دوم و F همان ماتریس بنیادی می‌باشد. در این تحقیق پارامترهای F به صورت خطی و بر اساس الگوریتم ۸ نقطه نرمالیزه شده [۲۵] بدست آمده‌اند.

در صورت برقراری رابطه ۸، هندسه اپی‌پولار برقرار و نقاط در دو تصویر متناظر خواهند بود. شکل ۴ پارامترهای ریاضی ماتریس بنیادی F و خطوط اپی‌پولار در دو تصویر $(l$ و $l')$ و نقاط اپیپول دو تصویر $(e$ و $e')$ را نشان می‌دهد.

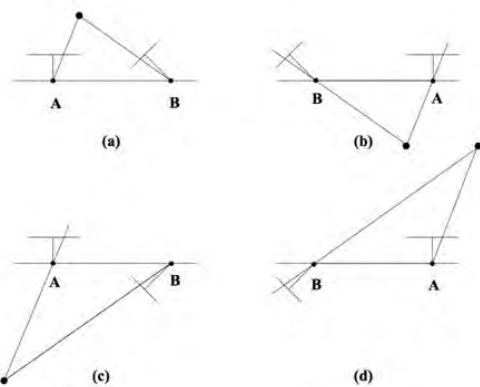
۴-۲- الگوریتم RANSAC+F

همانطور که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد الگوریتم RANSAC به منظور حذف داده‌های اشتباه نسبت به یک مدل ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق به منظور برآورده شدن دو هدف از الگوریتم RANSAC استفاده شده است به طوری که با فیت کردن این الگوریتم به مدل ریاضی ماتریس بنیادی (الگوریتم RANSAC+F)، علاوه بر حذف نقاط متناظر اشتباه که در راستای خطوط اپیپولار متناظر در تصویر دوم قرار ندارند، هندسه اپیپولار بین دو تصویر هم از طریق برآورد ماتریس بنیادی بهینه حاصل از تکرارهای الگوریتم RANSAC بدست آمد. پارامترهای الگوریتم RANSAC در این روش عبارتند از:

$$(S = 8, (1-P) = 0.95, \text{ تکرار} = 1000 = \text{ماکزیمم تکرار})$$

به این ترتیب برای هر دو تصویر متناظر با حداقل نقاط متناظر مورد نیاز الگوریتم RANSAC+F، هندسه اپیپولار با ساختار پروژکتیو بین دو تصویر متناظر استخراج می‌شود و برای استخراج هندسه اپیپولار با ساختار متریک کافی است با اختیار داشتن ماتریس کالیبراسیون دوربین در دو لحظه تصویربرداری، ماتریس بنیادی را به ماتریس اساسی تبدیل کرد و آن را به عناصر انتقالی و دورانی نسبی تجزیه کرد [۲۶]. در شکل ۵ نمونه‌ای از حذف نقاط متناظر اشتباه که در راستای خطوط اپیپولار نیستند آورده شده است.

لحظه تصویربرداری (A و B) و نقطه شیء ای حاصل از تقاطع در هر ۴ حالت ممکن نشان داده شده است.



شکل ۶- راه حل های ممکن از تجزیه ماتریس اساسی [۱۳]

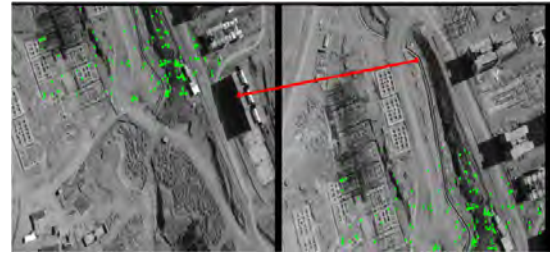
تنها راه حل ممکن از میان ۴ راه حل فوق که بازسازی سه بعدی نقاط در روبروی هر دو تصویر شکل می گیرد و در واقع حالت واقعی تصویربرداری را نشان می دهد همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است حالت a می باشد [۱۳]، [۱۹]. در حالات دیگر در حالت b بازسازی سه بعدی نقاط در پشت هر دو تصویر شکل گرفته است و در حالات c و d هم بازسازی سه بعدی نقاط به صورت معکوس شکل گرفته است که قابل قبول نمی باشند. به منظور یافتن حالت واقعی دو دوربین کافی است با استفاده از پارامترهای موقعیت و وضعیت در هر ۴ حالت فوق، بازسازی سه بعدی نقاط انجام شود. در این صورت، حالتی که در آن بیشترین تعداد نقاط در رابطه ۱۴ صدق کنند، موقعیت و وضعیت واقعی دو تصویر نسبت به هم (حالت a) خواهد بود. در این تحقیق بازسازی سه بعدی نقاط بین دو تصویر متناظر بر اساس معادلات تقاطع پروژکتیو^۳ انجام شد که روابط مربوط به این معادلات در روابط ۱۰ الی ۱۳ آمده است.

$$P1 = M[I | 0] \quad (10)$$

$$P2 = M[R | T] \quad (11)$$

$$x = \frac{P11X + P12Y + P13Z + P14}{P31X + P32Y + P33Z + P34} \quad (12)$$

$$y = \frac{P21X + P22Y + P23Z + P24}{P31X + P32Y + P33Z + P34} \quad (13)$$



شکل ۵- حذف نقاط متناظر اشتباه (به عنوان نمونه نقاط قرمز رنگ دو سر پاره خط قرمز که به اشتباه متناظر شناخته شده اند) با به کارگیری الگوریتم RANSAC+F

۳- بازسازی سه بعدی بلوک فتوگرامتری^۱

در این بخش به بازسازی ساختار سه بعدی از منطقه تصویربرداری شده و همچنین تعیین پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در لحظات تصویربرداری، بدون اطلاعات کمکی و تنها از روی اطلاعات مربوط به کالیبراسیون دوربین و همچنین مختصات دو بعدی نقاط تصویری متناظر پرداخته خواهد شد.

۳-۱- برآورد پارامترهای توجیه نسبی تصاویر پوشش دار

پس از استخراج نقاط گرهی تصویری با الگوریتم SIFT و تناظریابی پایدار آنها با الگوریتم RANSAC+F ماتریس های بنیادی بین هر دو تصویر پوشش دار بدست آمده است. با معلوم بودن پارامترهای کالیبراسیون دوربین (M) می توان از روی ماتریس بنیادی (F) طبق رابطه زیر ماتریس اساسی را برآورد نمود.

$$E = M^T F M \quad (9)$$

اکنون می توان پارامترهای توجیه نسبی را از تجزیه ماتریس اساسی بدست آورد. برای این منظور در این تحقیق با استفاده از روش SVD^۲ [۲۷]، ماتریس اساسی به ۴ حالت ممکن برای موقعیت و وضعیت دو تصویر نسبت به هم در لحظه تصویربرداری تجزیه شده است که تنها یکی از این ۴ راه حل، هندسه واقعی میان دو تصویر در لحظه تصویربرداری خواهد بود. شکل ۶ بیانگر این ۴ حالت می باشد که در آنها موقعیت مرکز عدسی در دو

^۳ Projective Intersection

^۱ Structure From Motion(SFM)

^۲ Singular Value Decomposition

اولیه ندارد و روشی ساده و سریع است. کواترنیون یک تعمیم از اعداد مختلط می‌باشد که ترکیبی از یک بخش اسکالر q_0 و سه بخش موهومی (q_1, q_2, q_3) می‌باشد. معادلات کواترنیون واحد به همراه معادلات تبدیل دو سیستم مختصات سه بعدی به ترتیب در روابط ۱۵ و ۱۶ آورده شده‌اند.

$$q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3 \quad (15)$$

$$y = \lambda Rx + T \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، y مختصات سه بعدی نقاط در سیستم مختصات مرجع، x مختصات سه بعدی نقاط در سیستم مختصات انتقال یافته و λ و R و T به ترتیب پارامترهای مقیاس و دوران و انتقال بین دو سیستم مختصات می‌باشند.

این روش ابتدا با بردن مختصات x و y به مرکز ثقل، انتقال T را حل می‌کند، سپس با تشکیل ماتریس $P_{4 \times 4}$ از روی مقادیر مختصاتی انتقال یافته به مرکز ثقل طبق رابطه ۱۷ و نسبت دادن بردار ویژه^۱ متناظر با بزرگترین مقادیر ویژه ماتریس P به کواترنیون‌های واحد، ماتریس دوران اورتونرمال R را از روی کواترنیون‌های واحد تشکیل می‌دهد که در رابطه ۱۹ آورده شده است.

$$P = \begin{bmatrix} S_{xx} + S_{yy} + S_{zz} & S_{yz} - S_{zy} & S_{zx} - S_{xz} & S_{xy} - S_{yx} \\ S_{yz} - S_{zy} & S_{xx} - S_{yy} - S_{zz} & S_{yx} + S_{xy} & S_{zx} + S_{xz} \\ S_{zx} - S_{xz} & S_{yx} + S_{xy} & -S_{xx} + S_{yy} - S_{zz} & S_{yz} + S_{zy} \\ S_{xy} - S_{yx} & S_{zx} + S_{xz} & S_{yz} + S_{zy} & -S_{xx} - S_{yy} + S_{zz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در این رابطه S_{ab} بیانگر مجموع حاصلضرب مختصات نقاط متناظر می‌باشد.

$$S_{ab} = \sum_{i=1}^n x'_{ia} y'_{ib} \quad (18)$$

در رابطه ۱۸، (x', y') به ترتیب مقادیر مختصاتی انتقال یافته به مرکز ثقل در سیستم مختصات مرجع و انتقال یافته بوده و n تعداد نقاط متناظر می‌باشد.

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_2q_1 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_3q_1 - q_0q_2) & 2(q_3q_2 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

I ماتریس یکه، M ماتریس کالیبراسیون، R ماتریس وضعیت تصویر دوم نسبت به تصویر مرجع، T بردار انتقال تصویر دوم نسبت به تصویر مرجع و P_1 و P_2 به ترتیب ماتریس‌های پروژکتیو تصویر مرجع و تصویر دوم می‌باشند. از آنجا که در این تحقیق، P_1 و P_2 از تجزیه ماتریس اساسی بدست آمده‌اند ماتریس M هم یک ماتریس یکه خواهد بود. روابط ۱۲ و ۱۳ برای هر نقطه متناظر در هر تصویر صادق خواهد بود که در مجموع برای هر نقطه ۴ معادله و ۳ مجهول خواهیم داشت. این معادلات برای تمامی ۴ حالت بدست آمده از تجزیه ماتریس اساسی حل می‌شوند و بنابر اینکه کدام حالت همخوانی بیشتری با شرط موجود در رابطه ۱۴ داشته باشد حالت بهینه و واقعی دوربین در دو لحظه تصویربرداری انتخاب می‌شود [۱۹].

$$(X - C) \cdot R(3,:) > 0 \quad (14)$$

در این شرط X مختصات سه بعدی نقطه، C مختصات سه بعدی مرکز تصویر و R ماتریس دوران نسبی تصویر دوم نسبت به تصویر مرجع می‌باشد.

۳-۲- بازسازی ابر نقاط گرهی هر تصویر به صورت محلی

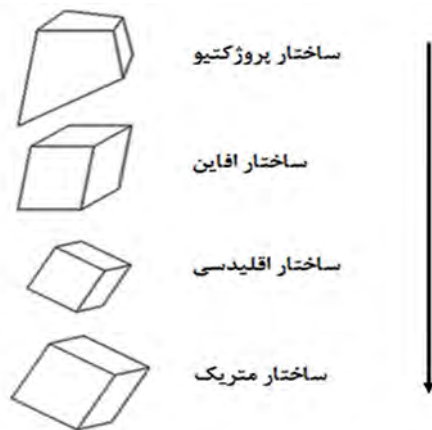
بعد از انتخاب موقعیت و وضعیت بهینه برای تمامی دو تصویر متناظر موجود در بلوک، بازسازی ساختار سه بعدی برای هر تصویر در سیستم مختصات مرکزی آن براساس تصویری که بیشترین نقطه مشترک با تصویر فوق را دارا می‌باشد انجام می‌گیرد و برای تمامی تصاویر، بازسازی سه بعدی نقاط در سیستم مختصات محلی آن تصویر بر اساس تقاطع پروژکتیو که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت انجام می‌گیرد.

در مرحله بعد بایستی ابر نقاط گرهی تصاویر را در یک سیستم مختصات یکسان هم مرجع سازی نمود. برای این منظور از الگوریتم کواترنیون واحد استفاده شده است.

۳-۲-۱- الگوریتم کواترنیون واحد

این الگوریتم یک روش closed-form جهت برقراری ارتباط بین دو سیستم مختصات است که برای حل حداقل نیاز به سه نقطه غیر واقع بر یک خط دارد. این روش برخلاف روش‌های کمترین مربعات نیاز به تکرار و مقادیر

^۱ Eigenvector



شکل ۷- ساختارهای هندسی قابل بازسازی [۱۳]

در شکل ۸ تناظریابی تصاویر فوق و حذف بلاندرها از نقاط متناظر نمایش داده شده است و بعد از حذف بلاندرها برای کمتر شدن زمان محاسبات بعدی در بازسازی سه بعدی منطقه، در یک شبکه 20×20 ، بهترین نقاط متناظر بر اساس بیشترین شباهت توصیفگرهایشان (توصیفگرهای حاصل از اعمال الگوریتم SIFT)، در هر شبکه به عنوان نقطه نماینده آن شبکه انتخاب شدند. بر مبنای روش پیشنهادی عنوان شده در بخش ۳، علاوه بر بازسازی سه بعدی تمامی نقاط گرهی متناظر در یک سیستم مختصات مرجع، پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در لحظات تصویر برداری نیز نسبت به همان سیستم مختصات مرجع برآورد شدند.

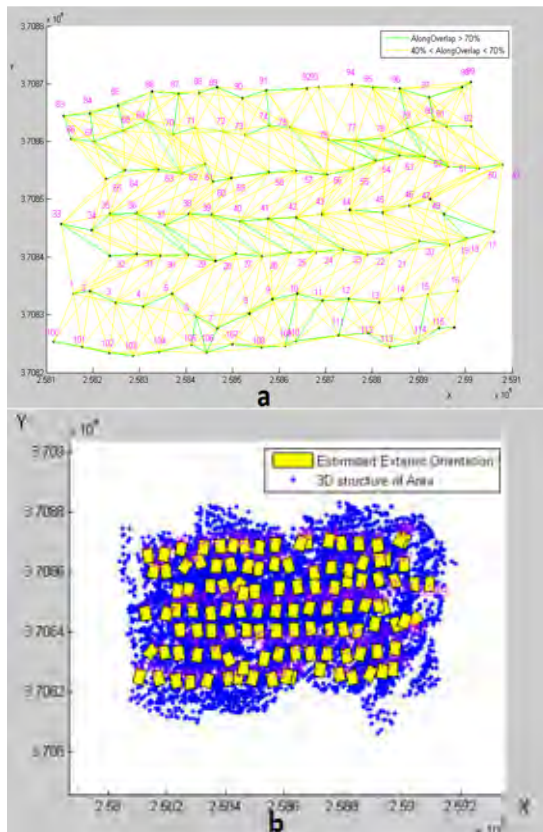
۳-۳- هم مرجع سازی ابر نقاط گرهی جهت بازسازی اولیه بلوک فتوگرامتری

در این بخش با استفاده از الگوریتم کواترنیون واحد، تمامی تصاویر به یک سیستم مختصات مرجع انتقال داده می‌شوند به گونه‌ای که تصویری که بیشترین تعداد نقطه در سیستم‌های مختصات محلی را دارد به عنوان تصویر مرجع و سیستم مختصات مرکزی آن تصویر به عنوان سیستم مختصات مرجع در نظر گرفته می‌شود و طی یک روند افزایشی نقاط موجود در تصاویری که بیشترین اشتراک را با ابر نقاط موجود دارا می‌باشند از طریق الگوریتم کواترنیون واحد به این نقاط اضافه می‌شوند و در نهایت علاوه بر استخراج ساختار سه بعدی منطقه تصویربرداری شده در یک سیستم مختصات مرجع و واحد، پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در تمامی لحظات تصویربرداری هم نسبت به سیستم مختصات مرجع برآورد می‌شوند.

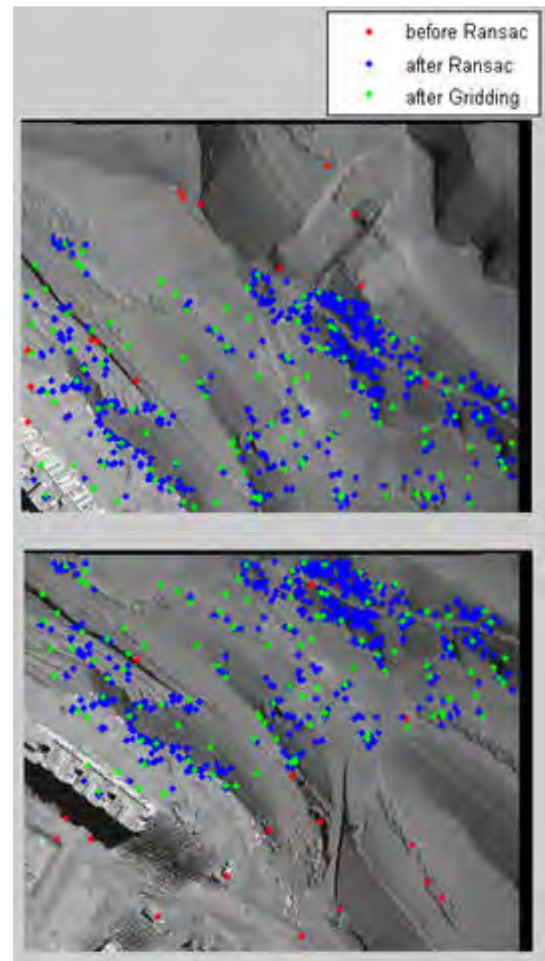
۴- پیاده سازی و نتایج آن

داده‌های ورودی برای انجام این تحقیق، پارامترهای کالیبراسیون دوربین رقومی غیرمتریک نصب شده بر روی سکوی پرواز سیستم فتوگرامتری پهپاد کم هزینه و تعداد ۱۱۶ تصویر اخذ شده به وسیله این سیستم بوده است. اطلاعات GPS/IMU در اختیار نبوده است. همچنین ارتفاع تقریبی پرواز ۲۰۰ متر و فاصله کانونی دوربین ۵ میلی متر بوده است.

در روند این پیاده سازی خودکار، بر مبنای الگوریتم SIFT تمامی تصاویر پوشش دار تناظریابی شدند و بلاندرهای موجود در تناظریابی با به کارگیری الگوریتم RANSAC+F حذف و دقت تناظریابی بالا برده شد و ماتریس بنیادی تمامی دو تصویرهای متناظر محاسبه شد. با استفاده از ماتریس کالیبراسیون دوربین، ماتریس اساسی برای تمامی تصاویر متناظر محاسبه شد و ساختار پروژکتیو به ساختار متریک تبدیل شد. شکل ۷ بیانگر روند تبدیل ساختار پروژکتیو به ساختار متریک می‌باشد که با تصحیحات افاین و مقیاس این تبدیل صورت می‌پذیرد.



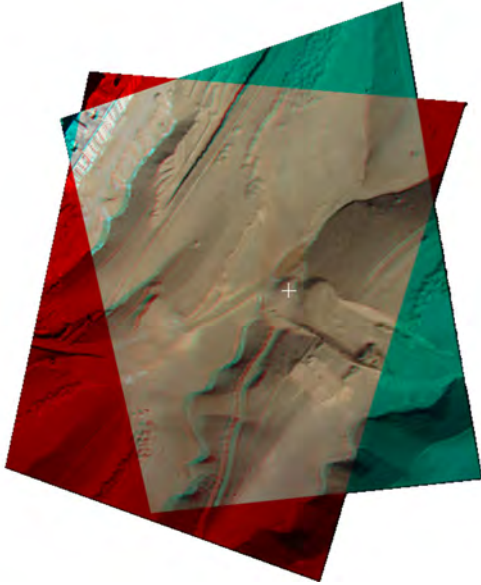
شکل ۹- (a) توپولوژی بین ۱۱۶ تصویر بر مبنای اندازه باز بین تصاویر در ۷ نوار پرواز. (b) موقعیت دوربین در لحظات تصویربرداری برای ۱۱۶ تصویر به همراه نقاط بازسازی شده از نقاط گرهی از دید بالا



شکل ۸- تناظرایی دو تصویر پوشش دار بر مبنای الگوریتم SIFT- نقاط قرمز نقاط حذف شده پس از اعمال الگوریتم RANSAC- نقاط سبز بهترین نقطه در هر شبکه بر اساس بیشترین شباهت توصیفگرهایشان با پراکندگی مناسب

نتایج حاصل از بازسازی سه بعدی نقاط برای ۱۱۶ تصویر اخذ شده و پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در لحظات تصویربرداری و همچنین توپولوژی بین تصاویر (ارتباط بین تصاویر از نظر میزان پوشش طولی بین تصاویر مرتبط) بر مبنای پوشش و یا عدم پوشش تصاویر در شکل شماره ۹ آورده شده‌اند.

لازم به ذکر است که به علت به کارگیری ماتریس کالبراسیون، ساختار سه بعدی بازسازی شده کاملاً یک ساختار متریک بدست آمد [۱۳] و نیازی به اعمال تصحیحات افاین و تغییر مقیاس نبود. بلوک بازسازی شده به علت حل تدریجی و اضافه شدن مرحله به مرحله تصاویر به سیستم مختصات مرجع، یک بلوک تقریبی با خطا در هندسه تصاویر بدست آمد. به این منظور برای انجام مثلث بندی دقیق، پارامترهای موقعیت و وضعیت تقریبی دوربین در لحظات تصویربرداری، مختصات تصویری دقیق نقاط گرهی در بلوک به همراه مختصات سه بعدی تقریبی بازسازی شده این نقاط و ۵ نقطه کنترل (۲ نقطه مسطحاتی و ۳ نقطه ارتفاعی) به عنوان قیود مینیمم برای حل دقیق بلوک در فرمت PATB که یک فرمت قابل ورود به نرم افزارهای فتوگرامتری است، وارد نرم افزار فتوگرامتری LPS شدند و با یک سرشکنی دسته پرتوی کلی، دقت ساختار سه بعدی منطقه و هندسه تصویربرداری بالا برده شد، مثلث بندی هوایی انجام شد و زمین مرجع کردن نقاط هم انجام گرفت.



شکل ۱۰- مدل سه بعدی ایجاد شده از دو تصویر از تصاویر اخذ شده از منطقه برداشت شده به وسیله پهپاد کم هزینه که نمایانگر پوشش نسبی تصاویر نیز می باشد.

به این ترتیب با انجام توجیه نسبی و قابلیت سه بعدی بینی تصاویر، می توان همانند تصاویر نزدیک به قائم فتوگرامتری، از امکانات نرم افزارهای فتوگرامتری هوایی استفاده نمود و برای مثال اقدام به تولید مدل ارتفاعی رقومی زمین و تصویر ارتوفتو نمود. در شکل ۱۱ نمونه مدل ارتفاعی رقومی یک متری و ارتوفتوی ۵ سانتی متری بدست آمده از ۵ تصویر پوشش دار در بلوک استخراج و نمایش یافته است. همانطور که دیده می شود اطلاعات هندسی با کیفیت بالایی از تصاویر هوایی فتوگرامتری پهپاد قابل حصول است. اگرچه هدف این مقاله، برآورد کیفیت هندسی این محصولات نبوده است اما در تحقیقات آتی می توان بطور ویژه به آن پرداخت.

معرفی سیستم فتوگرامتری پهپاد مورد استفاده در این تحقیق به همراه نتایج عددی حاصل از بالا بردن دقت بلوک تصاویر در مثلث بندی در جدول زیر آورده شده است.

جدول شماره ۱- تعداد نقاط کنترل و گرهی به کار گرفته شده در پروژه و دقت بدست آمده از مثلث بندی هوایی دقیق ۱۱۶ تصویر در محیط نرم افزار LPS

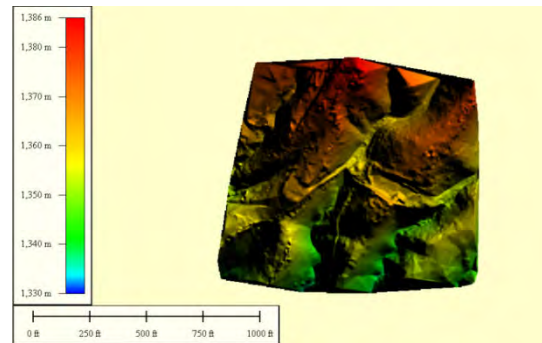
تعداد نقاط کنترل	۲ نقطه مسطحاتی و ۳ نقطه ارتفاعی
تعداد نقاط گرهی بر حسب شماره	۱۳۴۴۴
RMSE نقاط کنترل در راستای X زمینی بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر	۰/۰۰۶۷
RMSE نقاط کنترل در راستای Y زمینی بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر	۰/۰۰۷۹
RMSE نقاط کنترل در راستای Z زمینی بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر	۰/۰۱۷۶
RMSE مختصات عکسی کلیه نقاط در راستای X بعد از سرشکنی دسته پرتو به پیکسل	۱/۰۹۱۲
RMSE مختصات عکسی کلیه نقاط در راستای Y بعد از سرشکنی دسته پرتو به پیکسل	۱/۲۱۱۴
RMSE بلوک فتوگرامتری حاصل از سرشکنی	۱/۱۳۷۲

پس از انجام مثلث بندی هوایی و انجام توجیه خارجی دقیق تصاویر در محیط نرم افزار فتوگرامتری، امکان برجسته بینی بین هر دو تصویر پوشش دار مجاور هر چند با تیلت بالا وجود دارد. مشکل اساسی در هنگام برجسته بینی و تبدیل تصاویر با تیلت زیاد این است که با کوچکترین جابجایی مسطحاتی، نقطه شناور از سطح زمین دور شده و باید آنرا روی سطح زمین مماس نمود. شکل ۱۰ مثالی از مدل برجسته بینی آنالگراف برای دو تصویر پوشش دار با تیلت زیاد را نشان می دهد که از طریق عینک آنالگراف قابل سه بعدی بینی و قابل عملیات تبدیل به نقشه می باشد.

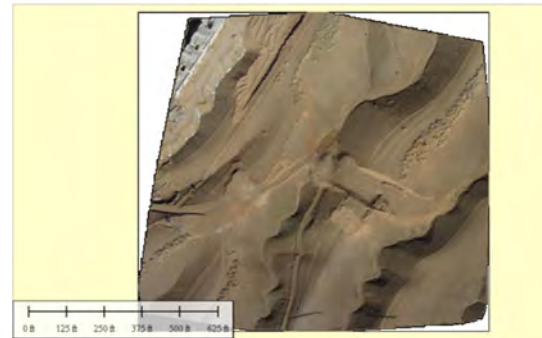
۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

به طور کلی مشکل اصلی بازسازی ساختار سه بعدی از تصاویری که دارای کیفیت نسبتاً پایین و تغییرات هندسی و طیفی بالایی نسبت به هم هستند، استخراج و تناظریابی نقاط گرهی در نواحی مشترک تصاویر می باشد که انجام این فرآیند توسط اپراتور و به صورت دستی باید انجام شود. تناظریابی نقاط گرهی به صورت دستی علاوه بر صرف زمان بسیار زیاد، موجب کاهش دقت در تناظریابی هم خواهد شد. در این تحقیق عملیات تناظریابی نقاط گرهی در نواحی مشترک تصاویر با دقت در حد زیر پیکسل و کاملاً به صورت خودکار در مدت زمان بسیار کمتری نسبت به کار دستی اپراتور (یک دهم مدت زمان) انجام شد و تعداد این نقاط ۱۳۴۴۴ نقطه با تراکم بالا و پراکندگی مناسب در تمامی سطح تصویر بود که می توان گفت این نقاط، بدون درونیابی هم، ساختار سه بعدی کلی منطقه را به خوبی نمایش می دهند. در این تحقیق، عملیات مثلث بندی دقیق بلوک فتوگرامتری تقریبی حاصل از تصاویر هوایی پهپاد کم هزینه از طریق سرشکنی دسته پرتو در محیط نرم افزار LPS، که یک نرم افزار منطبق بر فتوگرامتری کلاسیک می باشد انجام شد و بلوک فتوگرامتری حاصل از مثلث بندی هوایی دقیق استخراج شد.

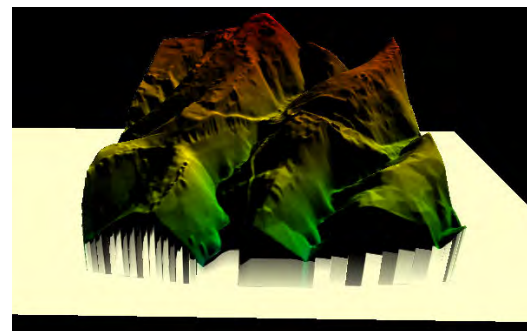
اهداف بعدی و مورد پیشنهاد این تحقیق، دو مورد می باشد. اول اینکه صحت هندسی مدل های سه بعدی و محصولات هندسی حاصل از این روش به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. دوم اینکه روش پیشنهادی برای پردازش همزمان تصاویر اخذ شده در فتوگرامتری برد کوتاه به همراه تصاویر اخذ شده در پهپاد کم هزینه تعمیم داده شود که به این منظور می بایست یک الگوریتم سرشکنی دسته پرتوی جامع و کاربردی برای انواع تصاویر با تیلتهای و تغییر مقیاس های شدید پیاده سازی شود.



a



b



c



d

شکل ۱۱- a و c) مدل ارتفاعی رقمی ۱ متری، b) ارتو موزائیک ۵ سانتی متری، d) ارتو موزائیک تصویر شده بر روی مدل ارتفاعی رقمی منطقه. (از ۵ تصویر متوالی بازسازی شده از تصاویر اخذ شده از پهپاد کم هزینه در این تحقیق)

- [1] Eisenbeiss, H. (2009). UAV Photogrammetry. DISS. ETH NO.18515, doi:10.3929/ethz-a-005939264.
- [2] Grenzdörffer, G., Engel, A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 31(B3), 1207-1214.
- [3] Xing, C., & Huang, J. (2010). An improved mosaic method based on SIFT algorithm for UAV sequence images. Paper presented at the Computer Design and Applications (ICCD), 2010 International Conference on.
- [4] Eisenbeiss, H., & Sauerbier, M. (2011). Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. *The Photogrammetric Record*, 26(136), 400-421.
- [5] Rodehorst, V., & Koschan, A. (2006). Comparison and evaluation of feature point detectors. Paper presented at the Proc. 5th International Symposium Turkish-German Joint Geodetic Days" Geodesy and Geoinformation in the Service of our Daily Life", Berlin, Germany.
- [6] Mikolajczyk, K., & Schmid, C. (2005). A performance evaluation of local descriptors. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 27(10), 1615-1630.
- [7] Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., . . . Van Gool, L. (2005). A comparison of affine region detectors. *International Journal of Computer Vision*, 65(1-2), 43-72.
- [8] Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110.
- [9] Harris, C., & Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector. Paper presented at the Alvey vision conference.
- [10] Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features *Computer Vision–ECCV 2006* (pp. 404-417): Springer.
- [11] Ke, Y., & Sukthankar, R. (2004). PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors. Paper presented at the Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on.
- [12] Ma, Y. (2004). *An invitation to 3-d vision: from images to geometric models* (Vol. 26): springer.
- [13] Hartley, R., & Zisserman, A. (2000). *Multiple view geometry in computer vision* (Vol. 2): Cambridge Univ Press.
- [14] Barazzetti, L., Remondino, F., & Scaioni, M. (2010). Automation in 3D reconstruction: results on different kinds of close-range blocks. Paper presented at the ISPRS Commission V Symposium Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK.
- [15] Barazzetti, L., Remondino, F., & Scaioni, M. (2011). Extraction of accurate tie points for automated pose estimation of close-range blocks. Paper presented at the ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis.
- [16] Zhang, C., & Elaksher, A. (2012). An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses¹. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(2), 118-129.
- [17] Wang, Z. (2012). Reconstruction of 3D Landscapes from UAV Images and Flight-Control Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- [18] Xiao, J., & Furukawa, Y. (2012). Reconstructing the world's museums *Computer Vision–ECCV 2012* (pp. 668-681): Springer.
- [19] Xiao, J. (2012). Multi-view 3D Reconstruction for Dummies. A lecture for teaching mutiple view 3D reconstruction with minimal prerequistic. <http://web.mit.edu/jxiao/SFMedu>.

- [20] Xiong, Z. M., & Wan, G. (2012). An Approach to Automatic Great-Scene 3D Reconstruction Based on UAV Sequence Images. *Applied Mechanics and Materials*, 229, 2294-2297.
- [21] Irschara, A., Kaufmann, V., Klopschitz, M., Bischof, H., & Leberl, F. (2010). Towards fully automatic photogrammetric reconstruction using digital images taken from UAVs. Paper presented at the Proceedings of the ISPRS TC VII Symposium—100 Years ISPRS.
- [22] Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
- [23] Luong, Q.-T., & Faugeras, O. D. (1996). The fundamental matrix: Theory, algorithms, and stability analysis. *International Journal of Computer Vision*, 17(1), 43-75.
- [24] Horn, B. K. (1987). Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *JOSA A*, 4(4), 629-642.
- [25] Hartley, R. I. (1997). In defense of the eight-point algorithm. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 19(6), 580-593.
- [26] Horn, B. K. (1990). Recovering baseline and orientation from essential matrix. *J. Optical Society of America*.
- [27] Golub, G. H., & Reinsch, C. (1970). Singular value decomposition and least squares solutions. *Numerische Mathematik*, 14(5), 403-420.