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

امین نورمحمد*'، محمدسعادت سرشت'

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

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

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۲، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۳)

چکیدہ

در یک دهه اخیر استفاده از سیستمهای فتوگرامتری پهباد 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 پهباد در کاهش هزینه، سرعت بالا و نیاز کمتر به افراد متخصص و تجهیزات خاص نسبت به فتوگرامتری هوایی سرنشیندار 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 دوران های خارج از حد نرمال و تغییر مقیاس قابل توجه می باشند. 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 پهباد 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 پهباد 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 پهباد کم هزینه، با به کارگیری الگوریتمهای SIFT(Scale Invariant Feature Transform) و هندسه اپیپولار انجام شد. بر اساس تقاطع پروژکتیو و به کارگیری الگوریتم کواترنیون 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 خروجی ها به صورت فرمت PATB به نرم افزار فتوگرامتری (Leica Photogrammetry Suiteبرده 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 بعدى، مدل ارتفاعي رقومي زمين و ارتوفتوموزاييك از بخشي از منطقه بدست آمد.

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

^{*} نویسنده رابط

۱– مقدمه

به طور کلی فتوگرامتری پهباد به وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین گفته می شود که مجهز به سکوی پرواز، سنجندههای فتوگرامتری و بخش ناوبری پرواز می باشند[۱]. در سالهای اخیر به علت نیاز به تصویربرداری از نواحی غیر قابل دسترس که نیاز به پرواز در ارتفاعات پائین می باشد و همچنین صرفه جویی در زمان و هزینه و عدم نیاز به محدودیتهای فیزیولوژیکی، به کارگیری فتوگرامتری پهباد کم هزینه رواج زیادی پیدا کرده است[۱]، [۲]. از سوی دیگر فتوگرامتری پهباد کمهزینه به علت وزن پائین سیستم، به کار گیری سنسورهای غیرمتریک ارزان قیمت و کنترل از راه دور سیستم، قابلیت اخذ تصاویر با کیفیت بالا و پوششهای منظم نظیر تصاویر اخذ شده از سیستم های 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 می-باشند[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 مشكلات اين تصاوير مستقل هستند استفاده شده است. یکی از بهترین الگوریتم های استخراج و تناظریابی عارضه از این تصاویر الگوریتم SIFT [٨] بوده است که علاوه براینکه 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 الگوريتمهاي مشابه نظير SURF [٩]، ۳SURF [١٠] و PCA-SIFT [۱۱] میباشد. همچنین به منظور بازسازی هندسه این تصاویر در لحظه تصویربرداری برای دوربین-های غیرمتریک، مطالعات بسیاری برمبنای استفاده از مدل رياضي هندسه اپيپولار⁶ براي نقاط متناظر انجام شده است که علاوه بر استخراج هندسه تصاویر یا به عبارتی پارامترهای توجیه خارجی تصاویر در لحظه تصویربرداری،

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

در سال ۲۰۱۱ L. Barazzeti ۲۰۱۱ 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 پهباد کم هزينه انجام داد كه توانست با به كارگيرى الگوريتم 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 پهباد 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 میا، تصاویر اخذ شده از سیستم میکرو فتوگرامتری پهباد 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 Xiao تحقیقات عمدهای در زمینه بازسازی ساختار سه بعدی تصاویر اخذ شده در فتوگرامتری برد کوتاه و فتوگرامتری پهباد با به کارگیری پارامترهای کالیبراسیون دوربین، اپراتورهای عارضه مبنای استخراج عوارض، مدل رياضي هندسه اپيپولار و تكنيكهاي مثلث بندي هوايي 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 پهباد 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 Perspective کاليبراسيون دوربين و مدل Projection [۱۳] و تکنیکهای سرشکنی دسته پرتو،

V Unmanned Aerial Vehicle(UAV)

۲ Scale Invariant Feature Transform

۳ Speeded-Up Robust Features

[£] Principle Component Analysis

[•] Epipolar Geometry

T Exterior Orientation

Y Digital Terrain Model(DTM)

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 سالهای ۲۰۱۰ الی A.Irschara نجام شده است میتوان به تحقیقات ۲۰۱۲ در زمینه بازسازی ساختار سه بعدی تصاویر اخذ شده از سیستمهای پهباد به صورت خودکار اشاره کرد که با به کارگیری پردازشهای 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 پهباد 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 الگوريتم RANSAC [٢٢] به مدل ریاضی ماتریس بنیادی^۲[۲۳]، علاوه بر حذف بلاندرهای موجود در نقاط گرهی، هندسهی تصاویر مجاور و پوششدار 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 ابر نقاط گرهی مربوط به هر تصویر با استفاده از اعمال متوالی الگوريتم كواترنيون واحد[٢۴] در يک سيستم مختصات مرجع اختیاری، هممرجع سازی شدهاند. به این ترتیب تا اینجا، هندسه نسبی تصاویر در لحظه تصویربرداری در یک سیستم مختصات مرجع محاسبه شدهاند. در نهایت بلوک تقريبی تصاوير 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. درنتیجه مدل های سه بعدی تصاویر متناظر (مدلهای

۱ RANSAC

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 پهباد 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 پیادهسازی این الگوریتمها در عمل روی ۱۱۶ مروی هوایی اخذ شده با فتوگرامتری پهباد 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 پهباد است که قابلیت کنترل و هدایت پهباد 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 مقادير تقريبي المانهاي توجيه خارجي تصاوير 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 الگوريتمهاى عارضه مبنا، قابليت استخراج و تناظريابى نقاط گرهی در تصاویر با تیلت بالا و مقیاس های متفاوت را ندارند.

۲ Fundamental Matrix

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 می شوند.

SIFT -1- الگوريتم

این روش یکی از روش های عارضه مبنا در استخراج و تناظریابی عوارض نقطه ای در تصویر است. در این روش موقعیت هایی از تصویر که مستقل از مقیاس و دوران هستند با ایجاد فضای مقیاس استخراج میشوند و تناظريابى عوارض استخراج شده بر اساس فاصله اقليدسى بین توصیفگرهای مربوط به هر عارضه انجام می گیرد. در مرحله استخراج عوارض در الگوریتم SIFT علاوه بر موقعیت هر عارضه، دو پارامتر مقیاس و جهت هم برای هر عارضه استخراج مىشود كه 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 می شود به گونهای که معيار مشابهت مورد استفاده براى تناظريابى فاصلهى اقلیدسی میان توصیفگرهای عوارض دو تصویر میباشد. عوارضی که کمترین میزان فاصلهی اقلیدسی مابین توصیفگرهای آن ها وجود دارد به عنوان عوارض متناظر انتخاب می شوند [۸].

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



شكل ۱- مراحل كلى الگوريتم SIFT[٨]

RANSAC الگوريتم-۲-۲

این الگوریتم یک الگوریتم با راه حل تکراری است برای تخمین پارامترهای یک مدل ریاضی از یکسری 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 داده های اشتباه به عنوان بلاندر از محاسبات حذف می-شوند.

$$\left(1 - \left(1 - e\right)^s\right)^N = 1 - p \tag{1}$$

$$N = \log(1-p) / \log(1-(1-e)^{s})$$
(7)

NANSAC fit to Fundamental Matrix

رابطه ۱ شرط اتمام تکرار در روند حل تکراری الگوریتم RANSAC میباشد و به ترتیب در روابط فوق، S تعداد حداقل دادههای ورودی مورد نیاز برای تخمین پارامترهای مدل ریاضی، N تعداد کل دادههای ورودی، پارامترهای مدل ریاضی، N تعداد کل دادههای ورودی، $^{S}(-1)$ بیانگر احتمال درست بودن تمامی S داده و P بیانگر حدآستانه برای انتخاب دادههای 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– هندسه ایپیولار

برای تصاویر استرئو که از دو ایستگاه متفاوت از یک منظر مشترک اخذ شدهاند، هندسه دو دوربین نسبت به هم در هنگام اخذ تصاویر، از طریق هندسه اپیپولار بیان میشود به گونهای که همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است صفحهای که از امتداد \overline{x} (باز بین دو تصویر) و یک نقطه روی تصویر میگذرد، 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 میشود. تمامی خطوط اپیپولار در هر تصویر و صفحه تصویر به نام نقطه ع یا همان نقطه اپیپول^۳



شكل ٣- هندسه اپيپولار [١٢]

۲-۳-۱- ماتریس اساسی^۴

شکل ریاضی هندسه اپیپولار بین مختصات هموژن^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 میباشد، به-گونهای که P مختصات هموژن نقاط در سیستم مختصات کالیبره شده تصویر اول، 'P مختصات هموژن نقاط در سیستم مختصات کالیبره شده تصویر دوم و E همان ماتریس اساسی میباشد. 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.

 $p'^{\mathrm{T}} E p = 0$

۲-۳-۲- ماتریس بنیادی

(٣)

شکل کلیتر رابطه ماتریس اساسی در سیستم مختصات غیر کالیبره شده با ساختار پروژکتیو^۷[۱۲] بین مختصات هموژن 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 (Mی(M) و جایگذاری رابطه ۴ در رابطه ۳ قابل تبدیل به ماتریس اساسی میباشد. رابطه ۸ بیانگر رابطه ماتریس بنیادی و شکل ۴ بیانگر هندسه اپیپولار با در نظر گرفتن پارامترهای ماتریس اساسی و ماتریس بنیادی میباشند.

⁶ Essential Matrix

^a Hemogeneous Coordinate

⁹ Metric Reconstruction

V Projective Reconstruction

۱ Epipolar Plane

۲ Epipolar Line

۳ Epipole

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

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

$$p' = M'^{-1} x', p = M^{-1} x$$
 (Δ)

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

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

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

$$x'^{T} M'^{-T} E M^{-1} x = 0$$
 (Y)

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

$$x'^{\mathrm{T}}Fx = 0 \tag{(A)}$$

در رابطه فوق x مختصات هموژن نقاط در سیستم مختصات کالیبره نشده تصویر اول، 'x مختصات هموژن نقاط در سیستم مختصات کالیبره نشده تصویر دوم و F همان ماتریس بنیادی میباشد. در این تحقیق پارامترهایF 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 (I و 'I) و نقاط اپیپول دو تصویر (e' e) را نشان می-دهد.



شکل ۴- پارامترهای ریاضی هندسه اپیپولار [۱۳]

F-۲- الگوريتم RANSAC+F

همانطور که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد الگوریتم RANSAC به منظور حذف داده های اشتباه نسبت به یک مدل ریاضی مورد استفاده قرار می گیرد. 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 ایپیولار متناظر در تصویر دوم قرار ندارند، هندسه اپیپولار بین دو تصویر هم از طریق برآورد ماتریس بنیادی بهینه جاصل از تکرارهای الگوریتم RANSAC بدست آمد.

پارامترهای الگوریتم RANSAC در این روش عبارتند از:

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.

www.SID.ir

¹ Normalized 8-point algorithm



شکل ۵- حذف نقاط متناظر اشتباه (به عنوان نمونه نقاط قرمز رنگ دو سر پاره خط قرمز که به اشتباه متناظر شناخته شدهاند) با به کارگیری الگوریتمRANSAC+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 ماتریسهای بنیادی بین هر دو تصویر پوشش دار بدست آمده است. با معلوم بودن پارامترهای کالیبراسیون دوربین(M) میتوان از روی ماتریس بنیادی(F) طبق رابطه زیر ماتریس اساسی را برآورد نمود.

$$E = M^T F M \tag{9}$$

اکنون میتوان 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

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



تنها راه حل ممكن از ميان ۴ راه حل فوق كه بازسازى سه بعدی نقاط در روبروی هر دو تصویر شکل میگیرد و در واقع حالت واقعی تصویربرداری را نشان میدهد 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 معكوس شكل گرفته است كه قابل قبول نمى 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" انجام شد که روابط مربوط به این معادلات در روابط ۱۰ الی ۱۳ آمده است.

$$P1 = M[I \mid 0] \tag{(1)}$$

$$P2 = M[R \mid T] \tag{11}$$

$$x = \frac{P11X + P12Y + P13Z + P14}{P31X + P32Y + P33Z + P34}$$
(17)

$$y = \frac{P \, 21X + P \, 22Y + P \, 23Z + P \, 24}{P \, 31X + P \, 32Y + P \, 33Z + P \, 34} \tag{17}$$

Projective Intersection

Structure From Motion(SFM)

۲ Singular Value Decomposition

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 P1 و P2 به ترتیب ماتریسهای پروژکتیو تصویر مرجع و تصویر دوم میباشند. از آنجا که در این تحقیق، P1 و P2 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 معادله و ۳ مجهول خواهیم داشت. این معادلات برای تمامی در رابطه ۱۴ داشته باشد حالت بهینه و واقعی دوربین در دو در رابطه ۲۹ داشته باشد حالت بهینه و واقعی دوربین در دو

 $(X - C) \cdot R(3, :)^T > 0 \tag{14}$

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 می باشد.

۲-۳- 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 می-گیرد 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.

٣-٢-١- الگوريتم كواترنيون 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

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.

$$q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3 \tag{10}$$

$$y = \lambda R x + T \tag{19}$$

در رابطه ۱۶، y مختصات سه بعدی نقاط در سیستم مختصات مرجع، x مختصات سه بعدی نقاط در سیستم مختصات انتقال یافته و ۸ و R و T به ترتیب پارامترهای مقیاس و دوران و انتقال بین دو سیستم مختصات می-باشند.

این روش ابتدا با بردن مختصات $y \in x$ به مرکز ثقل، انتقال T را حل میکند، سپس با تشکیل ماتریس P_{4*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.

$$p = \begin{bmatrix} s_{xx} + s_{yy} + s_{zz} & s_{yz} - s_{zy} & s_{xx} - s_{xz} & s_{xy} - s_{yx} \\ s_{yz} - s_{zy} & s_{xx} - s_{yy} - s_{zz} & s_{yy} + s_{yx} & s_{xx} + s_{zz} \\ s_{xx} - s_{xz} & s_{yy} + s_{yx} & -s_{xx} + s_{yy} - s_{zz} & s_{yz} + s_{zy} \\ s_{yy} - s_{yx} & s_{xx} + s_{xz} & s_{yz} + s_{zy} & -s_{xx} - s_{yy} + s_{zz} \end{bmatrix}$$
(17)

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

$$s_{ab} = \sum_{i=1}^{n} x_{ia} y_{ib}^{T}$$
(1 λ)

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.

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

\ Eigenvector

www.SID.ir



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 سهبعدی منطقه زواحد، پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین در تمامی لحظات تصویربرداری هم نسبت به سیستم مختصات مرجع برآورد میشوند.

۴- پیادہ سازی و نتایج آن

دادههای ورودی برای انجام این تحقیق، پارامترهای کالیبراسیون دوربین رقومی غیرمتریک نصب شده بر روی سکوی پرواز سیستم فتوگرامتری پهباد 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 با استفاده از ماتریس کالیبراسیون دوربین، ماتریس اساسی برای تمامی تصاویر متناظر محاسبه شد و ساختار بروژکتیو 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 می-پذیرد.



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 ۲۰*۲۰، 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.



شکل ۸- تناظریابی 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.



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 بازساری شده از نقاط گرهی از دید بالا

لازم به ذکر است که به علت به کارگیری ماتریس کالیبراسیون، ساختار سه بعدی بازسازی شده کاملا 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 مرحلهی 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 تقريبي دوربين در لحظات تصويربرداري، مختصات تصویری دقیق نقاط گرهی در بلوک به همراه مختصات سه بعدی تقریبی بازسازی شده این نقاط و ۵ نقطه كنترل(۲ نقطه مسطحاتي و ۳ نقطه ارتفاعي) به عنوان قیود مینیمم برای حل دقیق بلوک در فرمت PATB که یک فرمت قابل ورود به نرم افزارهای فتوگرامتری است، وارد نرمافزار 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.

معرفی سیستم فتوگرامتری پهباد 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

۲نقطه مسطحاتی	تعداد نقاط كنترل
و ۳ نقطه ار تفاعی	6,5
18444	تعداد نقاط گرهی بر حسب شماره
•/••۶٧	RMSE نقاط کنترل در راستای X زمینی
	بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر
•/••٧٩	RMSE نقاط کنترل در راستای Y زمینی
	بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر
•/•175	RMSE نقاط کنترل در راستای Z زمینی
	بعد از سرشکنی دسته پرتو به متر
1/+915	RMSE مختصات عکسی کلیه نقاط در
	راستای X بعد از سرشکنی دسته پرتو به
	پيكسل
1/5114	RMSE مختصات عکسی کلیه نقاط در
	راستای y بعد از سرشکنی دسته پرتو به
	پيكسل
1/1848	RMSE بلوک فتوگرامتری حاصل از
	سرشكنى

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 آناگلیف برای دو تصویر پوشش دار با تیلت زیاد را نشان میدهد که از طریق عینک آناگلیف قابل سه بعدی بینی و قابل عملیات تبدیل به نقشه میباشد.



شکل ۱۰– مدل سه بعدی ایجاد شده از دو تصویر از تصاویر اخذ شده از منطقه برداشت شده به وسیله پهباد کم هزینه که نمایانگر پوشش نسبی تصاویر نیز میباشد.

به این ترتیب با انجام توجیه نسبی و قابلیت سه بعدی بینی تصاویر، میتوان 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 سانتیمتری بدست آمده از ۵ تصویر پوشش دار در بلوک استخراج و نمایش یافته است. همانطورکه دیده میشود اطلاعات هندسی با کیفیت بالایی از تصاویر هوایی فتوگرامتری پهباد قابل حصول است. اگرچه هدف این مقاله، برآورد کیفیت هندسی این محصولات نبوده است اما در تحقیقات آتی میتوان بطور ویژه به آن پرداخت.



شکل ۱۱– a و C) مدل ارتفاعی رقومی ۱ متری. b) ارتو موزائیک ۵ سانتیمتری. d) ارتوموزائیک تصویر شده بر روی مدل ارتفاعی رقومی منطقه. (از ۵ تصویر متوالی بازسازی شده از تصاویر اخذ شده از پهباد کم هزینه در این تحقیق)

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

به طور کلی مشکل اصلی بازسازی ساختار سه بعدی از تصاویری که دارای کیفیت نسبتا پائین و تغییرات هندسی و طيفي بالايي نسبت به هم هستند، استخراج و تناظريابي 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 کاملا به صورت خودکار در مدت زمان بسیار کمتری نسبت به کار دستی ایراتور (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، عمليات مثلث بندى دقيق بلوك فتوگرامترى تقريبى حاصل از تصاویر هوایی پهباد کم هزینه از طریق سرشکنی دسته پرتو در محیط نرم افزار LPS، که یک نرم افزار منطبق بر فتوگرامتری کلاسیک میباشد انجام شد و بلوک فتوگرامتری حاصل از مثلث بندی هوایی دقیق استخراج

اهداف بعدی و مورد پیشنهاد این تحقیق، دو مورد میباشد. اول اینکه صحت هندسی مدلهای 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 پهباد کم هزینه تعمیم کوتاه به همراه تصاویر اخذ شده در پهباد کم هزینه تعمیم داده شود که به این منظور میبایست یک الگوریتم سرشکنی دسته پرتوی جامع و کاربردی برای انواع تصاویر با تیلتها و تغییر مقیاسهای شدید پیاده سازی شود.

مراجع

- [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 (ICCDA), 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.