

سیستم کالیبراسیون دوربین هوایی

Camera/GPS/IMU

مهندس مرضیه جعفری

دانشجوی دکتری مهندسی ژئودزی دانشگاه تهران

چکیده

سیستم ترکیبی GPS/IMU برای اندازه‌گیری دقیق موقعیت و توجیه (۱) تصاویر هوایی و یا سایر روشهای توجیه در سالهای اخیر مورد استفاده گسترده قرار گرفته است. به ویژه با پدید آمدن سنسورهای دیجیتال سیر با شتاب‌تری در معرفی این تکنولوژی بوجود آمده است. با این وجود برخی از کاربران این سیستم‌ها برای بهره‌گیری کامل از این تکنولوژی دچار مشکلات متعددی می‌شوند.

اکثر این مشکلات از صحیح عمل نکردن سیستم GPS/IMU یا بر اثر مشکلاتی که در حین عملیات پرواز به وجود می‌آید نیست بلکه بخاطر عدم شناخت صحیح از اندازه‌گیری موقعیت و توجیه مستقیم تصاویر در عملیات فتوگرامتری است. به ویژه استفاده از عنوان "کالیبراسیون" (۲) در مورد سنسورهای هوایی که به سیستم GPS/IMU مجهز شده‌اند ممکن است ایجاد ابهام کند.

در این مقاله مفاهیم مختلف "کالیبراسیون" برای سیستم Camera/GPS/IMU مورد بحث قرار گرفته است.

۱- مقدمه

کاربرد سیستم ترکیبی GPS/IMU برای اندازه‌گیری موقعیت و توجیه تصاویر هوایی در سالهای اخیر و در کنار آن گسترش سنسورهای اسکن کننده خطی یا LIDAR پتانسیل تولید را افزایش دهد. این روند افزایش که خود موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود، سبب گسترش کاربرد سیستم GPS/IMU همراه با دوربین هوایی در بین کاربران می‌شود. به ویژه پیدایش سنسورهای تصویربرداری تمام دیجیتال معرفی این تکنولوژی (GPS/IMU) به کاربران را شتاب می‌دهد.

برای بهره‌گیری کامل از این تکنولوژی مدیریت صحیح پارامترهای نامعلوم سیستم یا به عبارت دیگر کالیبراسیون، تعیین کننده می‌باشد. متأسفانه کاربرد عبارت "کالیبراسیون" برای سنسورهای هوایی توسط سیستم GPS/IMU

مقداری مبهم است.

در اینجا کالیبراسیون مربوط است به تعیین گروهی از پارامترهای:

۲- IMU

۱- سنسور هوایی

۴- دیتوم ژئودتیک

۳- نصب سیستم در هواپیما

با توجه به نتایج نهایی پروسه ژئورفرانس کردن تصاویر هوایی، این مهم است که در نظر داشته باشیم اثرات بسیاری از این پارامترها شدیداً به هم وابسته بوده و مشکل می‌توان آنها را به صورت متصل از هم تعیین کرد. برخی از این پارامترها فقط یک اثر قابل اغماض در نتایج نهایی دارند. بقیه این پارامترها، ممکن است اگر بصورت صحیح کنترل نشوند نتایج نهایی یک پروژه خوب را خراب کنند.

در این مقاله یک پروسه کالیبراسیون برای عملیات تهیه نقشه مقیاس کوچک و متوسط و پروزه تهیه اورتوفتو (DG) (۳) و پروسه دیگر کالیبراسیون برای تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس (ISO) (۴) شرح داده شده است.

۲- پارامترهای کالیبراسیون

پارامترهای کالیبراسیون ترکیب Camera/GPS/IMU و متدهای متداول برای تعیین آنها به صورت زیر شرح داده می‌شود. اما این، تمام پارامترهای لازم را شامل نمی‌شود.

۱-۲ - پارامترهای دوربین

پارامترهای دوربین هوایی توسط کارخانه سازنده مشخص می‌شوند. برای پروسه DG استفاده کنندگان برای رسیدن به دقت بالا باید توجه داشته باشند که از گواهینامه کالیبراسیون دوربین در معرفی شواهد استفاده کنند. این کالیبراسیون باید در یک آزمایشگاه با شرایط آب و هوایی کنترل شده انجام شود. شرایط آب و هوایی مثلاً دما در حین پرواز می‌تواند بسیار متفاوت باشد و این مسئله بویژه فاصله کانونی دوربین هوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اگر دو استریپ پروازی که در یک راستا ولی در دو جهت مخالف پرواز شده‌اند را مقایسه کنیم یک افست در موقعیت به میزان $2 \times 0.17m = 0.34m$ ایجاد می‌کند. بنابراین جبران زاویه رول $5^{(10)}$ یک افست به اندازه نصف این مقدار ایجاد می‌کند.

در سیستمی که IMU وجود ندارد و فقط سیستم GPS airborne عمل می‌کند این اثر ثابت است.

اگر این نتایج برای یک پروسه مثلث بندی هوایی (AT)⁽¹¹⁾ همراه با مشاهدات GPS استفاده شوند، این اثرات به صورت پارامترهای شیفت GPS و دریفت نمایان می‌شوند. برای تمام سنسورهایی که دهانه آن پایدارسازی شده است این امکان وجود دارد که زوایای دهانه را برای تصحیح این اثرات قرائت کنیم.

۲-۳-۲- پارامترهای نصب IMU روی دوربین

این پارامترها توجه نسبی و موقعیت دوربین هوایی نسبت به سیستم مختصات GPS/IMU را مشخص می‌کنند. افست موقعیت مستقیماً اندازه گیری می‌شوند. اما در مورد پارامتر کالیبراسیون فریم دوربین هوایی (زوایای boresight یا misalignment)، از طریق مقایسه پارامترهای توجیه خارجی (EO) اندازه گیری شده توسط سیستم GPS/IMU با پارامترهای بدست آمده از مثلث بندی بلوک (AT) تعیین می‌شوند. این مقایسه برای زاویه misalignment می‌تواند به طور ضمنی در یک پروسه اضافه بدست آید یا اینکه می‌تواند به عنوان یک مرحله اضافه در پروسه ISO انجام شود.

این واضح است که هرگاه تغییری در نصب سیستم ایجاد شود کالیبراسیون مجدداً باید انجام شود.

از مقایسه نتایج AT و اندازه گیری‌های مستقیم EO نه تنها زاویه misalignment محاسبه می‌شوند بلکه میزان افست⁽¹²⁾ نیز بدست می‌آید. از لحاظ تئوری اگر دیگر پارامترها بصورت دقیق تعیین شده باشند و مشاهدات GPS عاری از خطای سیستماتیک باشند این افست اهمیت ویژه‌ای دارد. یک افست موقعیت می‌تواند از عوامل زیر ایجاد شود:

● افست ثابت ارتفاعی

یک افست ثابت ارتفاعی می‌تواند از ترانسفورماسیون⁽¹³⁾ نامناسب سیستم مختصات GPS/IUM (WGS84) به سیستم مختصات مینا ایجاد شود. این افست می‌تواند بر اثرات اختلاف فاصله کانونی واقعی دوربین نسبت به فاصله کانونی بدست آمده از کالیبراسیون دوربین ایجاد شود. همچنین معرفی نادرست ارتفاع ایستگاه ثابت GPS یا ارتفاع آنتن GPS می‌تواند باعث این افست ارتفاعی شود.

● افست موقعیت مسطحاتی در خطوط پرواز

گاهی این افست از ترانسفورماسیون نامناسب سیستم مختصات GPS/IUM (WGS84) به سیستم مختصات مینا بوجود می‌آید.

۲-۲- پارامترهای IMU

پارامترهای IMU مثل بایاس⁽⁵⁾ یا فاکتور مقیاس یا تعامد⁽⁶⁾ مجموع سنسورها می‌توانند توسط فیلتر کالمن⁽⁷⁾ در طول پردازش اطلاعات بدست آمده یا اینکه توسط کارخانه سازنده داده شده و در طول پردازش اطلاعات به حساب آیند. استفاده کننده معمولی نیاز نیست که این پارامترها را کنترل کند.

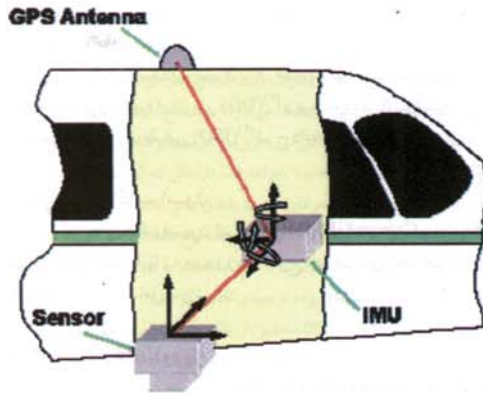
۲-۳-۳- پارامترهای نصب

این پارامترها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۲-۳-۱- پارامترهای نصب IMU و آنتن GPS در هواپیما

این پارامترها در واقع توجه IMU نسبت به محور هواپیما و موقعیت نسبی آنتن GPS نسبت به IMU می‌باشند و تا زمانی که محل نصب آنها در هواپیما عوض نشود تغییر نمی‌کنند. آنها می‌توانند از طریق اندازه گیری مستقیم تعیین شوند یا در طول پردازش اطلاعات GPS/IMU برآورد شوند.

هنگامیکه دقت بالا مورد نیاز باشد تغییرات این پارامترها در طول پردازش مهم بوده و باید به حساب آیند. این تغییرات، زمانی که دهانه سنسور دریفت‌های⁽⁸⁾ هواپیما را جبران می‌کند یا اگر دهانه سنسور پایدارسازی شده باشد می‌تواند مقادیر بزرگی داشته باشد. اثر حرکت دهانه سنسور روی بازوهای تعادل⁽⁹⁾ می‌تواند برآورد شود.



نگاره (۱): بازوهای تعادل از IMU تا آنتن GPS و از IMU تا دوربین هوایی

اگر آنتن GPS و IMU در هواپیما طوری نصب شوند که آنتن GPS یک متر عقب‌تر از IMU و یک متر بالاتر از آن بالای سر هواپیما قرار داشته باشد، تصحیح یک دریفت ۱۰ درجه‌ای یک افست در راستای عمود بر محور هواپیما به میزان $10 \times \sin(10) = 0.17 \text{ mm}$ ایجاد می‌کند.



● افست موقعیت مسطحاتی وابسته به جهت خطوط پرواز

این افست ممکن است بر اثر معرفی نامناسب اختلاف موقعیت آنتن GPS و IMU ایجاد شود. این خطا می‌تواند بر اثر جبران زاویه دریافت یا رول بوسیله دهانه سنور ظاهر شود. یا اینکه از اختلاف زمان عکسبرداری (۱۴) و زمان ثبت شده حاصل شود. معرفی نادرست نقطه اصلی (۱۵) در مرحله AT نیز می‌تواند این خطا را ایجاد کند.

● اختلاف موقعیت که بین نتایج AT و پارامترهای EO که مستقیماً اندازه‌گیری شده‌اند اساساً بدلیل افست مکانی IMU و دوربین نیست بلکه بدلیل عدم صحت در تعیین پارامترهای تشریح شده در پارامترهای ۲-۱ و ۲-۴ است.

۴-۲- پارامترهای ترانسفورماسیون دیتوم (۱۶)

سیستم مختصات مورد نظر برای ژئورفرنس کردن تصاویر هوایی اغلب همان سیستم مختصات اطلاعات مینا یعنی سیستم (WGS84) GPS/IMU نیست بلکه ممکن است متفاوت باشد. برای رسیدن به سیستم مختصات صحیح پارامترهای ترانسفورماسیون موقعیت‌ها و زاویا باید دقیقاً شناسایی و معرفی شوند تا از وارد شدن خطاهای اضافی صرف نظر شود. در برخی موارد پارامترهای کالیبراسیون در دسترس نیست یا دقت کافی ندارند. در این موارد تعیین این پارامترها به عنوان بخشی از کالیبراسیون سیستم انجام می‌شود، اگرچه آنها دقیقاً پارامترهای واقعی سیستم نیستند.

۳- روشهای کالیبراسیون

در پروژه‌های روزانه فتوگرامتری این انتظار نمی‌رود که هر روز مقادیر تصحیح برای تمام پارامترهای کالیبراسیون تعیین شود اما روشهایی برای حذف اثرات پارامترهایی که نامناسب معرفی شده‌اند باید وجود داشته باشد. مثال زیر این مسئله را تشریح می‌کند.

در یک بلوک فتوگرامتری که پرواز عکسبرداری آن در یک ارتفاع تقریباً ثابت انجام شده است مثلث بندی هوایی (AT) روی یک بلوک کوچک یک افست ارتفاعی کوچک اما قابل توجه را نشان می‌دهد. در این مورد اگر فاصله کانونی دوربین تنظیم شود، موقعیت ایستگاه ثابت GPS جایجا شود، یا اگر ترانسفورماسیون دیتوم تغییر کند (به شرط اینکه بلوک زیاد بزرگ نباشد) اختلافی در نتایج نهایی بلوک کامل ایجاد نمی‌کند. برای این بلوک هر سه روش در عمل یک نتیجه را در بر دارد. اما اگر پارامترها به پروژه دیگری در منطقه دیگر با مقیاس متفاوت منتقل شوند یک اختلاف بزرگ مشاهده می‌شود. در پروژه‌های روزانه فتوگرامتری ثابت شده که روشهای زیر مناسب هستند:

۱-۳- ژئورفرنس مستقیم تصاویر (Direct Georeferencing)

استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده مستقیم EO در پردازش اطلاعات فتوگرامتری بدون انجام مثلث بندی (AT) روی یک بلوک یا استریپ

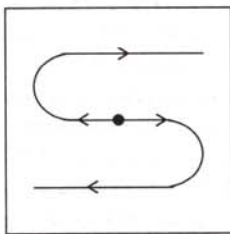
عکسبرداری، ژئورفرنس مستقیم یا DG نامیده می‌شود.

عدم نیاز به AT، اندازه‌گیری نقاط گرهی و همچنین نقاط کنترل زمینی (GCP) (۱۷) از مزایای این روش می‌باشد. مزایای روش DG نه تنها موجب کاهش قیمت در مقایسه با روشهای قدیمی ژئورفرنس تصاویر (توسط AT یا AT که کمک GPS) می‌شود بلکه زمان پردازش را نیز کوتاهتر می‌کند.

به عبارت دیگر در این روش پارامترهای کالیبراسیون شرح داده شده در پاراگراف ۲-۱ باید با دقت تعیین شده باشند چون در پروسه DG درجه آزادی نداریم. این نشان می‌دهد که تعیین غیر صحیح بعضی از پارامترهایی که در پاراگراف ۲-۱ شرح داده شده در نتایج نهایی تأثیر گذاشته بدون آنکه کاربر پیغام خطایی دریافت کند.

اگر روش DG برای ژئورفرنس کردن استفاده شود کالیبراسیون کوچک برای تعیین زوایای misalignment (پاراگراف ۲-۳-۲) حداقل یکبار باید انجام شود. زوایای misalignment که از کالیبراسیون حاصل می‌شوند وابسته به موقعیت منطقه کالیبراسیون یا مقیاس تصویر نیستند و همچنین هیچ وابستگی به دسترسی نقاط کنترل GSP ندارند. این کالیبراسیون misalignment می‌تواند همراه با فیلد کالیبراسیون انجام شود اما در اکثر موارد که حساسیت بیشتری وجود دارد باید کالیبراسیون در یک بلوک کوچک در منطقه اصلی که پرواز باید انجام شود، صورت گیرد. استفاده از یک بلوک کوچک برای کالیبراسیون در تعداد تصاویر و زمان پرواز صرفه‌جویی می‌شود.

اگر حداقل یک نقطه کنترل در دسترس داشته باشیم یک شیفت دیتوم فقط در منطقه عملیاتی می‌تواند بدست آید نه جای دیگر. پردازش قسمتی از منطقه همراه با AT برای انجام کالیبراسیون مزیت دیگری که دارد این است که سیستم به طور کامل چک می‌شود. اگر بخشی از بلوک که باید برای کالیبراسیون استفاده شود با پوشش فرضی ۳۰٪ پرواز شده باشد، ترکیبی که برای انجام کالیبراسیون استفاده می‌شود حداقل باید شامل سه خط پروازی باشد و خط میانی باید در جهت مخالف پرواز شود.



نگاره (۲): جهت پرواز در منطقه کالیبراسیون

تعیین زاویا مستلزم نقاط کنترل زمینی نمی‌باشد اما برای تعیین ارتفاع صحیح و مقادیر شیفت دیتوم حداقل ۴ نقطه کنترل زمینی و در صورت امکان ۶ نقطه کنترل مانند نگاره (۳) باید در دسترس باشد.



می تواند یک پروسه با قابلیت اطمینان بالا و کمترین دخالت انسان باشد.

۴- بحث و نتیجه گیری

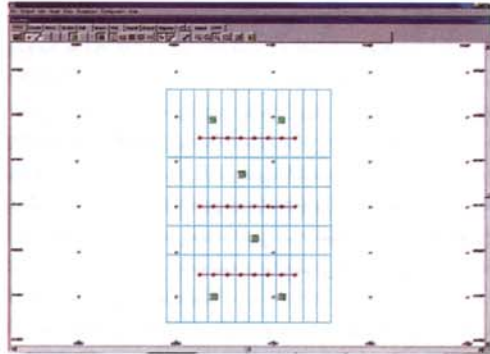
با استفاده از پارامترهای EO که مستقیماً توسط سیستم GPS/IMU اندازه گیری می شوند به اندازه زیادی در زمان پردازش تصاویر هوایی صرفه جویی می شود. برای بدست آوردن نتایج نرمال و مطلوب کالیبراسیون سیستم باید با دقت انجام شود. اگر قرار باشد نتایج سیستم GPS/IMU مستقیماً در ژئورفرنس کردن تصاویر به کار رود داشتن پارامترهای صحیح سیستم لازم است. اگر این پارامترها به عنوان مشاهدات اضافی در مرحله AT وارد شوند لازم نیست بیشتر پارامترها را به صورت صریح داشته باشیم.

۵- منابع

- 1- Jens kermer, System Calibration of arial Camera/GPS/IMU systems - procedures and experimences.IGImbh 2005,Langenauer strasse 46, 57223.Kreuztal, Germany.
- 2-AERO office User Manual.Vers,V5.OC.

۶- پی نوشت

- 1- Orientation
- 2- Calibration
- 3- Direct Georeferencing (DG)
- 4- Integrated Sensor Orientation (ISO)
- 5- Bias
- 6- Orthogonality
- 7- Kalman filter
- 8- Drifts
- 9- Lever arm
- 10-Roll
- 11- Aerial Triangulation (AT)
- 12- Offset
- 13- Transformation
- 14- Exposure time
- 15- Principal Point
- 16- Datum
- 17- Ground Control Point
- 18- Error Tolerance



نگاره ۳: نمونه ای از بلوک کوچک برای کالیبراسیون

اگر بلوک کالیبراسیون مستقل از منطقه اصلی عکسبرداری باشد حداقل دو خط پرواز با حداقل ۶۰٪ پوشش طراحی می شود. در مرحله AT از کالیبراسیون از موقعیت ها و زوایای توجیه که بصورت مستقیم اندازه گیری شده اند به عنوان مشاهدات اضافی استفاده می شود به عبارت دیگر مرحله کالیبراسیون AT برای ژئورفرنس مستقیم باید یک ISO (Integrated System Orientation) برای منطقه کالیبراسیون باشد. در مرحله AT افست های موقعیت به عنوان پارامتر اضافی استفاده می شود. کاربران باید دقت داشته باشند که زوایای misalignment برای مدت طولانی ثابت باقی می ماند (بستگی به نصب اجزاء دارد) اما افست موقعیت ممکن است در پروژه های مختلف و مقیاس های مختلف و مناطق مختلف متفاوت باشد. اگر افست های موقعیت را بخواهیم برای پروژه دیگر استفاده کنیم باید نتایج را با نقاط معلوم آن منطقه چک کنیم.

۲-۳- ISO (Integrated Sensor Orientation)

پردازش همزمان نتایج GPS/IMU و اطلاعات تصویری برای تعیین EO در یک پروسه مثلث بندی هوایی (AT) را ISO می نامند. روش ISO علیرغم اینکه نیاز به AT و اندازه گیری نقاط گرهی در تصاویر دارد ولی ساده تر و دارای تلورانس خطای کمتری هست. در این پروسه نیازی به کالیبراسیون misalignment نداریم. زیرا پارامترهایی که در پاراگراف ۱-۲-۳، ۲-۴ و ۴-۲ شرح داده شدند می توانند در حین مرحله AT محاسبه شوند. از آنجایی که هر کدام از روشهای AT یا اندازه گیری مستقیم به تنهایی قادر به تعیین پارامترهای EO هستند ولی ترکیب هر دو قابلیت اطمینان بالاتر و تلورانس خطای (۱۸) کمتری دارد. به ویژه در پروسه های کاملاً دیجیتال، اندازه گیری نقاط گرهی در کل بلوک اهمیت کمتری دارد زیرا پروسه تناظر یابی در مثلث بندی هوایی دیجیتال با استفاده از پارامترهای EO بدست آمده از اندازه گیری های GPS/IMU بهتر و سریعتر شده است. برای یک دوربین دیجیتال مجهز به سیستم GPS/IMU روش ISO