

## چکیده

ارزیابی عملکرد هندسی دوربین رقومی ابعاد بزرگ (ULTRACAM<sub>D</sub>) موضوع اصلی این مقاله می باشد.

مفاهیم کالیبراسیون هندسی به روش تعدیل گروهی (bundle adjustment) تشریح شده است.

پارامترهای اضافی مبتنی بر طراحی خاص دوربین، تعیین و تعریف می گردند و نرم افزار تعدیل گروهی BINGO به منظور آرازی این پارامترها ارائه داده شده است.

تمام پروسه کالیبراسیون شامل چهار مرحله خواهد بود.

دراولین مرحله یک مجموعه تصاویر از اهداف کاملاً مشخص طوری که مشاهدات اضافی (بادرجه آزادی بالا) ممکن باشد، گرفته می شود.

دومین مرحله به اندازه گیری مختصات تصویر اختصاص داده شده است. اتوماسیون و دقت بوسیله تکنیک های پردازش تصویر با بهره گیری از شکل خاصی از اهداف کاملاً مشخص بدست می آید.

سومین مرحله شامل پردازش تعدیل نیمه اتوماتیک خواهد بود و پارامترهای مجهول (فاصله کانونی، مختصات نقطه اصلی، پارامترهای اعوجاج و پارامترهای اضافی) تخمین زده می شوند.

در مرحله چهارم پارامترهای خطی و غیرخطی را تشخیص خواهیم داد. پارامترهای خطی جهت کاهش تأثیرات خطی اعوجاج در دوربین استفاده می گردند. این موضوع بوسیله انتقال خطی مختصات اندازه گیری شده بدست خواهد آمد، طوری که تنها اثرات غیرخطی کوچک باقی خواهد ماند. اثرات باقیمانده سپس در جدولی (Look Up table) تشریح می گردند.

نتایج یکسری عملیات کامل کالیبراسیون، پارامترهای تعدیل شده و تأثیرات این پارامترها ارائه گردیدند. در نهایت کالیبراسیون تأیید و محقق شده است. **واژگان کلیدی:** دوربین رقومی، کالیبراسیون دوربین، تعدیل گروهی

## ۱- مقدمه

دوربین (ULTRACAM<sub>D</sub>) یک دوربین متریک می باشد و برای کاربردهای دقیق فتوگرامتری طراحی گردیده است. بنابراین هندسه داخلی دوربین از طریق انجام یک عملیات کالیبراسیون صورت می گیرد. اساس کالیبراسیون تصاویری از نقاط کنترل دقیق و کاملاً مشخص در یک موقعیت مشخص می باشد. معادلات غیرخطی پایه ریاضی عملیات کالیبراسیون می باشد، همانطوری که در دوربین آنالوگ سنتی نیز چنین است. بنابراین فاصله کانونی و مختصات نقطه اصلی اولین پارامترهای مورد نیاز دوربین می باشد.

# کالیبراسیون هندسی

## دوربین رقومی هوایی

# ULTRACAM<sub>D</sub>

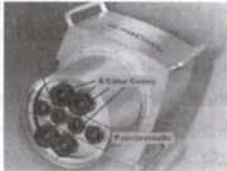
نویسندگان: M.Kropel, E.Kyuck, M.Gruher

برگردان: مهندس حمید مصومی - کارشناس نقشه برداری

دوربین سری پارامترها جهت تشریح شعاعهای نامتقارن و دیگر اعوجاجات سیستم نوری در خط با نظریه فتوگرامتری سنتی تعیین گردیدند. علاوه بر این پارامترهای معلوم (پارامترهای دیافراگم دوربین و اعوجاج عدسی) دومین مجموعه پارامترها در کالیبراسیون هندسی دوربین گنجانده شدند. این پارامترها موقعیت هر یک از CCDها را در فاصله کانونی مسطح هر یک از ۸ مخروط دوربین تشریح می کنند.

تعیین این پارامترها از طریق عملیات تعدیل گروهی (Bundle Adjustment) عرضه شده در بسته

نرم افزار BINGO شکل می گیرد. پارامترهای بدست آمده از عملیات تشریح هندسه کامل هر یک از مخروطهای دوربین را شکل می دهند.



نگاره (۱): بخش سنجنده دوربین (ULTRACAM<sub>D</sub>)

انتقال خطی داخلی بین مخروطها بوسیله عملیات یکپارچه سازی مبتنی بر باقیمانده های تناظریابی تعداد زیادی نقاط گرهی (tie point) تعیین می گردد. پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای انتقال داخلی در مرحله بعد برای تولید تصاویر عاری از اعوجاج استفاده شده است.

## ۲- جزئیات طراحی دوربین ULTRACAM<sub>D</sub>

### ۲-۱- بخش سنجنده (sensor) دوربین

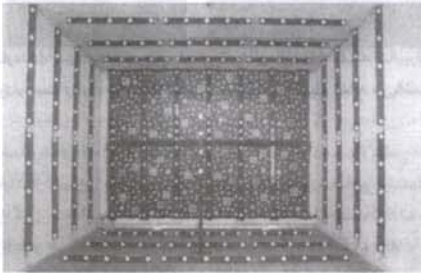
بخش سنجنده دوربین شامل ۸ دوربین مستقل می باشد که Cones نامیده می شوند. تعداد ۴ عدد آن تصویر پانکروماتیک اندازه بزرگ به ابعاد ۷۵۰۰×۱۱۵۰۰ پیکسل را تولید می کنند. چهار عدد دیگر برای تهیه تصاویر چندباندی در باندهای قرمز، سبز، آبی، و مادون قرمز نزدیک در نظر گرفته شده اند. (نگاره ۱) بخش پانکروماتیک دوربین، مجموعه ای از ۹ سنجنده با ابعاد متوسط را برای تولید تصویر پانکروماتیک با ابعاد بزرگ ترکیب و جمع آوری می کند. بخش چندباندی دوربین نیز توسط ۴ سنجنده منجرای دیگر تأمین می گردد. هر یک از این ۱۳ سنجنده عملیات مستقل تولید



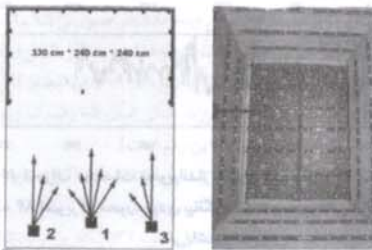
شامل ۲۴۰ نقطه با مختصات کاملاً مشخص و با دقت ( $\pm 50\mu$ ) برای (z,y,x) می‌باشند طوری که این نقاط روی دیوار مقابل، جانبی و کف و سقف اتاق تثبیت گردیدند. چهار نقطه اضافه‌تر نیز در موقعیت مرکزی مجموع نقاط نشانه تثبیت گردیدند. (نگاره (۳))

### ۳-۱ - جمع آوری داده‌های

جمع آوری داده‌ها توسط دوربین از ۱۳ ایستگاه ثابت با انجام عملیات تصویربرداری انجام می‌گیرد. یک مجموعه‌ای از تصاویر با اعمال دوران و چرخش دوربین از هر یک از ۱۳ ایستگاه تهیه می‌گردد.



نگاره (۳): اتاق تست کالیبراسیون در ساختمان مرکزی Vexcel. این اتاق تست شامل ۲۴۰ نقطه کنترل با مختصات دقیق می‌باشد.



نگاره (۴): در نمودار سمت چپ ۳ موقعیت ثابت دوربین و در نمودار سمت راست یک تصویر از ۸۴ تصویر بدست آمده با چرخش و دوران دوربین نمایش داده شده است.

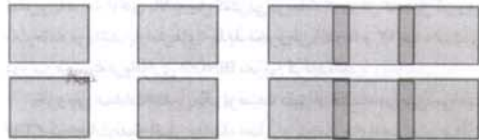
در چنین مجموعه‌ای با درجه آزادی بالا و توزیع خیلی خوب اندازه گیری در سطح تصویر بدست می‌آید. همچنین تنظیم زمان نوردهی و درجه دیافراگم دوربین برای کاربردهای خاص انجام می‌گیرد. برای دستیابی به وضوح قابل قبول برای تصویر از یک فاصله محدود شیء نسبت به دوربین، دهانه دیافراگم کوچک ( $F \frac{1}{11}$ ) و زمان نوردهی نسبتاً بیشتر از ۳ ثانیه را انتخاب می‌کنیم. یک مجموعه تصویر از ۱۳ ایستگاه ثابت مختلف با اعمال دوران و چرخش دوربین تهیه می‌گردد.

تصاویر مجزایی را بعهده دارند. هر یک از آنها شامل سنجنده، بخش الکترونیک، مبدل آنالوگ به رقمی A/D و بخش انتقال داده (IEEE 1394) می‌باشند. اطلاعات و داده‌های خام تصاویر از طریق رابط IEEE 1394 به بخش ذخیره داده‌های دوربین منتقل می‌گردند. بنابراین دوربین با بهره‌گیری از یک ساختار سیستم موازی، نرخ بیشتر از ۱ فریم تصویر در ثانیه را فراهم می‌آورد. تصویر پانکروماتیک شامل ۱۱۵۰۰ پیکسل عمود بر محور عکسبرداری و ۷۵۰۰ پیکسل در امتداد محور عکسبرداری می‌باشد. تصاویر رنگی نیز بطور همزمان در یک ابعاد  $4 \times 2.7$  کیلوپیکسل برای باند قرمز، سبز، آبی و مادون قرمز نزدیک ثبت می‌گردند.

### ۲-۲ - طرح چند مخروطی دوربین (Multi-Cone)

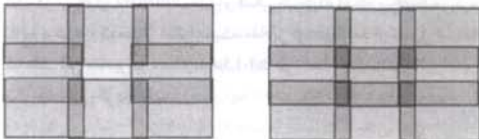
شکل‌گیری هندسی دوربین بوسیله مخروط اصلی که شامل ۴ عدد سنجنده و یک عدسی منفرد می‌باشد، مشخص می‌گردد.

۴ عدد CCD تصاویر پانکروماتیک ابعاد بزرگ دوربین را تعریف می‌کنند. فاصله خالی بین این چهار سنسور بوسیله ۳ عدد مخروط دیگر پوشش داده شده است. انتقال و اتصال بین مخروطها بوسیله کالیبراسیون و تناظر یابی تأیید شده نقاط گرهی در هر خط از هر فریم تصویر انجام می‌گردد. یادآوری می‌شود که ادغام و تلفیق بخشهای فرعی تصویر برای دسترسی به ابعاد کامل تصویر با عملیات یکپارچه سازی انجام می‌گیرد. (نگاره (۲))



MASTERCONE WITH 4 CCDs

MASTERCONE plus Cone # 2



MASTERCONE plus Cone # 2 and 3

MASTERCONE plus Cone # 2, 3 and 4

نگاره (۲): ۴ مخروط پانکروماتیک صفحه زیرین یک مجموعه ۹ تایی تصویر کوچکتر را تشکیل می‌دهد. این مجموعه تصویر در ۳ مرحله بی دربی بعد از وجود ۴ فرمت اصلی بدست می‌آید. قسمت سمت چپ بالایی نمودار، مخروط اصلی با ۴ سنسور هندسه اصلی تصویر با ابعاد بزرگ را تعیین می‌کند.

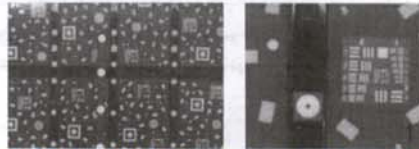
### ۳ - نشانه‌ها و علائم در کالیبراسیون

نقاط نشانه جهت کالیبراسیون در یک اتاق در محل اصلی ساختمان شرکت Vexcel تثبیت شده‌اند. ابعاد آن  $20 \times 22 \times 230$  سانتیمتر می‌باشد. سه ایستگاه ثابت نیز جهت استقرار دوربین تعبیه شده است. نقاط نشانه



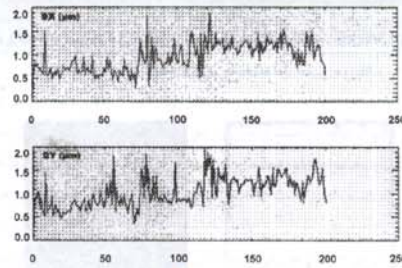
### ۳-۲- اندازه گیری مختصات تصویر

اندازه گیری مختصات تصویر با بکارگیری ابزارهای موجود در یک نرم افزار خاص انجام می گیرد. برای اندازه گیری موقعیت دقیق نقاط کنترل یک پنجره بزرگنمایی با پله های ۱/۴ پیکسل فراهم گردیده است. مجموعه نهایی مختصات تصویر نقاط نشانه مبتنی بر تکنیک های پردازش تصویر رقومی و تقریب سازی برای اندازه گیریهای دستی می باشد. (نگاره (۵))



نگاره (۵): نمودار سمت چپ تصویر نمونه ای از نقاط نشانه کالیبراسیون و نمودار سمت راست نتیجه شناسایی اتوماتیک یک نقطه نشانه می باشد.

مجموعه ای کامل از مختصات تصویر از ۸۴ تصویر که معمولاً شامل ۱۴۰۰۰ موقعیت از تصاویر پانکروماتیک یا حتی بیشتر برای تصاویر چندباندی، اندازه گیری شده اند. دقت الگوریتم شناسایی نقاط نشانه تست شده اند و یک انحراف در حدود  $103\mu \pm 0.14 \text{ pixel}$  مشاهده گردید. (نگاره (۶))



نگاره (۶): انحراف مختصات تصویر اندازه گیری شده از ۲۰۰ نقطه نشانه مربوط به ۸۴ تصویر که محور عمودی بیانگر جهت x و محور افقی بیانگر جهت y می باشد.

### ۴- تخمین ویر آرد پارامترهای دوربین بوسیله تعدیل کمترین مربعات

تعدیل تمام اندازه گیریهای مختصات تصویر و تخمین پارامترهای دوربین بوسیله بسته نرم افزاری BINGO شکل گرفته است. کل عملیات تعدیل داخلی در چهاربخش انجام می گیرد.

- محاسبه مقادیر اولیه پارامترهای دوربین شامل پارامترهای موقعیت CCD، فاصله اصلی، مختصات نقطه اصلی و اعوجاج عدسی
- انتقال مختصات تصویر (اندازه گیری شده) به پارامترهای مشخص موقعیت CCD. این مرحله به منظور اجتناب از پارامترهای اعوجاج شعاعی نامتعارف (خروج از مرکزی) عدسی دوربین، نیاز به تکرار متعدد محاسبات دارد.
- تشریح و توصیف جابه جایی باقیمانده در صفحه تصویر و تشریح جابه

### جایی ها بوسیله Look Up table

○ تخمین و برآورد پارامترهای انتقال بین مخروطها به منظور هدایت عملیات پردازش بعدی (Stitching) جهت دسترسی به تصویر پانکروماتیک در ابعاد بزرگ و انطباق باندهای چندطیفی تصویر رنگی به تصویر پانکروماتیک جهت دسترسی به وضوح بیشتر.

### نتایج حاصله

پارامترهای تعدیل شده و جدول Look Up table در یک مجموعه اطلاعات کالیبراسیون ذخیره می گردند.

این مجموعه اطلاعات بطور اتوماتیک توسط نرم افزار در مراحل پردازش تصویر استفاده می گردند.

تصویر خروجی نهایی دوربین UltraCam D عاری از اعوجاج همراه با پارامترهای مورد نیاز کاربران شامل پارامترهای معلوم دیافراگم، فاصله اصلی و مختصات نقطه اصلی دوربین خواهد بود.

انحراف معیار استاندارد این پارامترها بعد از پردازش کالیبراسیون مجدداً محاسبه گردیدند و انتظار می رود کمتر از  $2\mu \pm$  باشند.

### ۵- نتیجه گیری

ایده و مفهوم چند مخروطی و چندسجدهای دوربین UltraCam D نیاز به کالیبراسیون خاص دارد. این روش کالیبراسیون مبتنی بر اندازه گیری نقاط تصویر با درجه آزادی بالا و حل کمترین مربعات از روش تعدیل گروهی معلوم می باشد. پارامترهای جدید مخروطی، لنزها و ۱۳ عدد سنسور دوربین در بسته نرم افزاری BINGO معرفی گردیده اند.

خروجی عملیات تعدیل یک توصیف دقیق از هندسه دوربین، موقعیت CCD، مختصات نقطه اصلی، فاصله اصلی و پارامترهای اعوجاج عدسی می باشد. دقت روش تعدیل با بهره گیری مدل تصادفی قابل انعطاف عرضه شده در نرم افزار BINGO تحلیل و آنالیز گردیده است. برای کمی کردن نتایج بوسیله یک مقدار حائز اهمیت، مقادیر Sigma $\mu$  بعد از تعدیل استفاده شده اند. این مقادیر در محدوده  $1-1.5\mu \pm$  طی تمام جلسات کالیبراسیون قبلی مشخص گردیده اند.

### ۶- منابع

- 1- Kruck, E. (1984): BINGO: Ein Bundelprogramm Zur Simultanausgleichung Fur Ingenieurwendungen Moglichkeiten und praktische Ergebnisse, Intenational Archive for Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janeiro 1984.
- 2 - Leberl, F., R. Perko, M. Gruber, M. Ponticelli (2002) Novel Concepts for Aerial Digital Cameras. ISPRS Archives, Volume 34, Part 1, Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium, Denver, Colorado, November 2002.
- 3 - Leberl, F. et al. (2003): The Ultracam Large Format Aerial Digital Camera System, Proceedings of the American Society For Photogrammetry & Remote Sensing, 5-9 May, 2003, Anchorage, Alaska.