نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال دهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۱

Vol.10, No.4, Winter 2023

۳۹ -۶۵

مقاله پژوهشی

DOR: *20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3*

ارائه یک روش بهبود یافته مبتنی بر الگوریتم تبدیل هاف به‌منظور کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی

سروش مطیب [۱]، فرهاد صمدزادگان [۲*]، مسعود ورشوساز [۳]

۱- کارشناسی ارشد فتوگرامتری، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

چکیده

سنجنده‌های حرارتی غیر متریک، پس از گذشت مدت زمانی از کالیبراسیون آزمایشگاهی خارج شده و به‌منظور تصحیح پارامترهای توجیه داخلی و اعوجاجات عدسی نیازمند کالیبراسیون مجدد می‌باشند. در این راستا جهت تولید محصولات فتوگرامتری با دقت هندسی مطلوب، تعیین پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده غیر متریک به‌منظور کاهش خطا توجیه نسبی و حل سرشکنی باندل اجسمنت امری ضروری است. هدف از این تحقیق ارائه یک روش نوین جهت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیرمتریک به‌عنوان یک مرحله پیش‌پردازش اساسی جهت تولید محصولات فتوگرامتری با دقت هندسی مطلوب می‌باشد. در روش پیشنهادی به‌منظور کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیرمتریک، از یک الگو کالیبراسیون به شکل یک صفحه مستطیلی شامل تارگت‌های دایره‌ای توخالی با هندسه قرارگیری متقارن در کنار یکدیگر استفاده شده است. وجود دایره‌های توخالی موجب ایجاد اختلاف دمایی و در نهایت ایجاد تضاد و وضوح در صفحه الگو کالیبراسیون حرارتی می‌گردد. با توجه به قدرت تفکیک مکانی و وضوح پایین سنجنده‌های حرارتی، تارگت‌های دایره‌ای به‌صورت بیضی در تصویر ثبت می‌گردند. به همین دلیل، در این مقاله جهت برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی تارگت‌های بیضی شکل در فضا تصویر از الگوریتم تبدیل هاف استفاده شده است. علت این امر آن است که تبدیل هاف جهت برازش بیضی از پارامترهای کانون بیضی استفاده می‌کند و نیاز به استخراج کامل خطوط محیطی بیضی ندارد. در روش به کار گرفته شده در این مقاله از معادلات شرط هم خطی جهت محاسبه المان‌های کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی آزمایش‌های مختلفی انجام شد. نتایج این آزمون‌ها که بر اساس معیار میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر انجام گردید، دقت کالیبراسیون هندسی را ۰٫۰۳ پیکسل ارزیابی نموده است. علاوه بر این روش پیشنهادی جهت نگاشت مجدد مرکز کانونی تارگت‌ها به صفحه الگو کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون برآورد شده، میانگین خطا بین مختصات تصویری واقعی و مختصات واقعی تارگت‌ها در فضا زمینی را به مقدار ۰٫۲۸ پیکسل نسبت به روش معادله مقاطع مخروطی بهبود بخشیده است.

کلید واژه‌ها : توجیه داخلی، کالیبراسیون هندسی، سنجنده حرارتی، الگوریتم تبدیل هاف، شرط هم خطی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی.

تلفن: ۰۲۱۸۸۰۰۸۸۴۱

Email: samadz@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]

[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

۱- مقدمه

تصویربرداری حرارتی مادون‌قرمز یک روش منظم برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل انرژی تابشی مادون‌قرمز با استفاده از سامانه‌های تصویربرداری مادون‌قرمز است. تصویر حرارتی، تصویری است که نقشه توزیع سطوح مختلف انرژی تابشی مادون‌قرمز را از سطحی از جسم که قابل مشاهده است، نشان می‌دهد. روش تصویربرداری حرارتی به‌منظور تشخیص و ردیابی، شناسایی و اندازه‌گیری تابش حرارتی (اشعه فروسرخ یا مادون‌قرمز ساطع شده از اجسام با دما بیشتر از صفر درجه کلوین و یا ۲۷۳- درجه سانتی‌گراد) از سطح یک جسم به کار می‌رود. در سال‌های اخیر استفاده از این روش به‌طور گسترده در حوزه فتوگرامتری و بینایی ماشین[1] به کار گرفته شده است[۱، ۲ و ۳].

با توجه به هندسه ضعیف داخلی[۴] و کیفیت رادیومتریک پایین [۵] تصاویر اخذ شده توسط این دسته از سنجنده‌ها، امکان به‌کارگیری آن‌ها در پروژه‌های فتوگرامتری برد کوتاه با چالش اساسی مواجه بوده است. بر همین اساس تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کالیبراسیون این دسته از سنجنده‌های رقومی غیر متریک ارائه شده است. [۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱].

در حالت کلی انجام کالیبراسیون سنجنده رقومی غیر متریک جهت تعیین و بررسی پارامترهای موقعیت نقطه اصلی، فاصله کانونی، اعوجاج عدسی (شامل اعوجاج شعاعی و خروج از مرکزیت عدسی)، هندسه صفحه کانونی (صاف بودن صفحه کانونی، تعامد محورهای مختصات، اندازه پیکسل‌ها)، تغییرات هندسه داخلی سیستم سنجنده مخصوصاً با یک عدسی باقابلیت فوکوس و همچنین ثبات و استواری پارامترهای کالیبراسیون انجام می‌گیرد[۱۲، ۱۳ و ۱۴].

در شکل (۱) دیاگرام کلی کالیبراسیون هندسی سنجنده رقومی حرارتی غیر متریک ارائه شده است.

به‌طور کلی به‌منظور انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده‌های رقومی حرارتی غیر متریک سه مرحله اساسی در نظر گرفته می‌شود. مراحل شامل اخذ تصاویر از الگو کالیبراسیون، استخراج مختصات دو بعدی دقیق تارگت‌ها[2] جهت برقراری ارتباط با فضا زمینی و همچنین انتخاب مدل ریاضی مناسب به‌منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون می‌باشند. لازم به ذکر است همان‌طور که در ادامه بیان خواهد شد در این مقاله فقط از الگو کالیبراسیون دایره‌ای به‌منظور پیاده سازی و ارزیابی نتایج استفاده شده است. با این حال در زمینه کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی از الگو کالیبراسیون صفحه شطرنجی و مربعی نیز در برخی تحقیقات استفاده می‌گردد. لذا در دیاگرام کلی نمایش الگو صفحه شطرنجی برای بیان کامل و روشن روند کلی انجام کالیبراسیون هندسی برای یک سنجنده حرارتی می‌باشد.

با توجه به دیاگرام شکل(۱) پس از اخذ تصاویر از الگو، نیاز به استخراج مختصات دو بعدی تارگت و برقراری ارتباط با فضا زمینی با استفاده از مدل ریاضی کالیبراسیون هندسی و برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی می‌باشد.

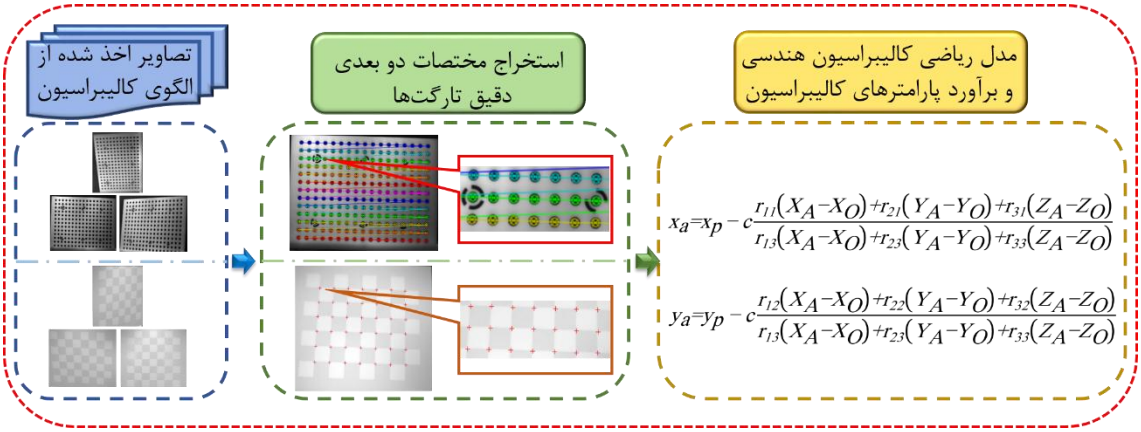
به‌طور کلی کالیبراسیون سنجنده‌های حرارتی غیر متریک در دو دسته کالیبراسیون رادیومتریک و هندسی دسته‌بندی می‌گردد. کالیبراسیون رادیومتریک، جهت ذخیره صحیح و دقیق میزان حرارت طیف بازگشتی و ثبت شده از هدف مورد نظر با مقدار واقعی ثبت شده توسط سنجنده انجام می‌شود. هدف از انجام کالیبراسیون رادیومتریک اطمینان از دقت و صحت اندازه‌گیری‌ها توسط سنجنده حرارتی می‌باشد. برای این منظور، جهت تعیین رابطه بین حرارت و مقدار شدت روشنایی ثبت شده توسط سنجنده حرارتی در اکثر اوقات از یک جسم سیاه با دما معلوم تصویربرداری

[1] *Computer Vision*

[2] *Target*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

می‌شود[۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹]. در شکل (۲) نمونه جسم سیاه که از آن جهت انجام کالیبراسیون رادیومتریک سنجنده حرارتی غیر متریک استفاده می‌شود نمایش داده شده است[۲۰].



شکل ۱: دیاگرام کلی کالیبراسیون هندسی سنجنده غیر متریک



شکل ۲: نمایش یک جسم سیاه

در کالیبراسیون هندسی، هدف محاسبه و تعیین المان‌های توجیه داخلی، خارجی و اعوجاجات عدسی می‌باشد. [۱۳، ۲۱ و ۲۲]. با مشخص بودن المان‌های فوق رابطه صحیح هندسی بین تصویر حرارتی و زمینی برقرار و امکان محاسبه مختصات صحیح سه بعدی زمینی فراهم می‌شود. در سنجنده حرارتی نیز مانند سنجنده مرئی، هر مرحله پردازشی از جمله تابش طیف الکترومغناطیس تا دریافت، ذخیره و تشکیل تصویر، می‌تواند اثراتی بر روی داده‌ها به‌جای بگذارد. لذا جهت حذف این اثرات و افزایش دقت هندسی و مکانی، انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی، به‌منظور تولید محصولات فتوگرامتری امری ضروری است[۲۳ و ۲۴].

روش‌های مورد استفاده جهت انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی شباهت زیادی به سنجنده مرئی دارند. لذا بیشترین تفاوت موجود، انتخاب الگو کالیبراسیون از دیدگاه نوع هندسه تارگت‌ها (صفحه شطرنجی، مربعی و یا دایره‌ای) و جنس الگو به‌منظور شناسایی توسط سنجنده حرارتی می‌باشد. در این راستا جهت شناسایی هندسه تارگت‌های موجود در الگو کالیبراسیون نیاز است که ضریب بازتابش حرارتی زمینه و پس‌زمینه الگو کالیبراسیون تفاوت داشته باشند[۲۵]. همچنین استفاده از تارگت‌هایی که جنس

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

آن‌ها دارای میزان انتشار[1] حرارتی متفاوتی می‌باشند؛ بیشترین تضاد وضوح[2] را از دیدگاه بازتابش حرارتی در الگو کالیبراسیون ایجاد می‌کنند. بنابراین جنس تارگت عاملی مؤثر در افزایش دقت شناسایی و استخراج هندسه تارگت‌ها محسوب می‌شود. برای مثال می‌توان به استفاده از فویل آلومینیومی به‌عنوان جایگزین مربع‌های سفید الگو صفحه شطرنجی[۲۶] اشاره کرد. در بخش ۲ به موارد بیشتری از الگوهای کالیبراسیون با مواد اولیه و میزان انتشار حرارتی متفاوت اشاره شده است.

به‌منظور کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک، الگوهای کالیبراسیون بر اساس پارامترهای مختلفی از قبیل تعداد ابعاد فضایی[3]، منبع انرژی (فعال و یا غیرفعال) و هندسه تارگت‌ها تقسیم‌بندی می شوند[۲۴]. استفاده از الگو دو بعدی یک راه حل کم هزینه‌تر با پیچیدگی ریاضی و هزینه محاسباتی کمتر نسب به الگو سه بعدی است[۲۷]. همچنین جهت برآورد دقیق پارامترهای کالیبراسیون با استفاده از الگو سه بعدی نیاز است که با دقت بالایی موقعیت فضایی صفحه‌های دو بعدی عمود به یکدیگر بر روی وجوه خود تعیین شوند[۲۷]. در این راستا الگو کالیبراسیون دو بعدی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

در شکل (۳) انواع الگوهای مورد استفاده کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از دیدگاه هندسه تارگت‌ها نمایش داده شده است.

در شکل(۳) انواع مختلف الگوهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از جمله صفحه شطرنجی، مربعی و دایره‌ای با هندسه متقارن و غیرمتقارن نمایش داده شده است. در الگوهای دوبعدی و سه‌بعدی مورد استفاده در کالیبراسیون هندسی به‌منظور عدم وابستگی بین فاصله اصلی و مقیاس و همچنین افزایش استحکام شبکه کالیبراسیون به بیش از یک تصویر از الگو نیاز می‌باشد. لذا جهت تصویربرداری از الگو کالیبراسیون پارامترهای مختلفی دخیل می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود[۲۹]:

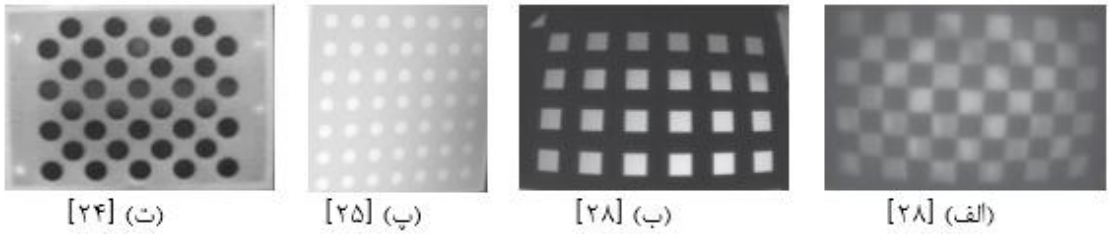
- تصویربرداری به صورتی باشد که تمام تارگت‌های الگو کالیبراسیون توسط تصویر پوشش داده شوند. در غیر این صورت هر تارگت حداقل در سه تصویر موجود باشد.
- زاویه بین محور ایستگاه‌های اخذ تصویر بین ۳۰ تا ۹۰ درجه باشد.
- به‌منظور عدم وابستگی پارامترهای توجیه داخلی، در هر ایستگاه سنجنده ۹۰ درجه دوران داده شود و مجدداً از همان زاویه تصاویر اخذ گردند.

به‌منظور انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده‌های حرارتی غیر متریک معمولاً از یک الگو کالیبراسیون حاوی تارگت‌ها با هندسه صفحه شطرنجی، مربعی و یا دایره‌ای استفاده می‌گردد [۲۵، ۲۸ و ۳۰]. علاوه بر این به‌منظور شناسایی و استخراج مختصات دو بعدی تارگت‌ها، الگو کالیبراسیون در معرض تابش یک منبع انرژی حرارتی (فعال و یا غیرفعال) قرار می‌گیرد. در این راستا جهت استخراج مختصات دو بعدی از تارگت‌های صفحه شطرنجی و مربعی، از روش‌های استخراج گوشه[4] استفاده می‌شود[۲۵].

در الگوهای صفحه شطرنجی بهترین عوارض قابل استخراج از الگو به‌عنوان نقاط گرهی تارگت‌ها و برقراری ارتباط با فضا زمینی عوارض گوشه‌ای مستخرج از تقاطع خطوط افقی و عمودی می‌باشند[۲۵]. در این راستا عملگر هریس[5] [۳۱] دارای بهترین عملکرد جهت استخراج گوشه‌ها از الگو صفحه شطرنجی است[۳۲].

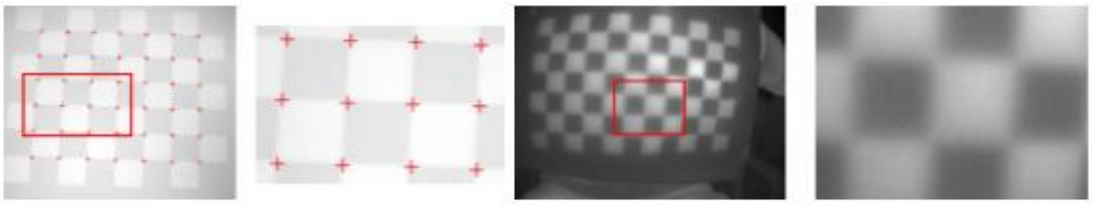
[1] *Emissivity*
[2] *Contrast*
[3] *Dimension*
[4] *Corner detection*
[5] *Harris*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]



شکل ۳: الگوهای کالیبراسیون شامل تارگت‌ها با هندسه گوناگون. الف) صفحه شطرنجی ب) مربعی پ) دایره‌ای با هندسه متقارن ت) دایره‌ای با هندسه نامتقارن

علی‌رغم اینکه تارگت‌های دارای زمینـه سـفید و سـیاه بازتاب‌های مختلفی از نقطه نظر رادیومتریکی (بسته بـه میزان گرما سطح تارگت که ناشی از رنگ آن می‌باشـد) دارند، با این حال، این دسـته از روش‌هـا، بـا توجـه بـه قدرت تفکیک مکانی و وضـوح پـایین تصـاویر حرارتـی سنجنده‌هـای حرارتـی غیـر متریـک، امکـان اسـتخراج گوشه‌ها با دقت زیر پیکسل را ندارند[۲۵]. در این راستا استفاده از الگو صفحه شطرنجی با جنس‌های مختلـف و میزان بازتابش متفاوت جهت افزایش وضـوح و افـزایش دقـت اسـتخراج گوشـه‌هـا همچنـان بـه دلیـل درهـم آمیختگی پیکسل‌های مجاور تصـویر حرارتـی ناشـی از قدرت تفکیک مکـانی پـایین سـنجنده حرارتـی امکـان پـــذیر نمـــی‌باشـــد[۲۵]. در شـــکل (۴) نمونـــه‌ای از به‌کارگیری الگو صفحه شطرنجی به‌منظور کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک نمایش داده شده است.



شکل ۴: نمایش الگو صفحه شطرنجی در تصویر حرارتی. الف) قدرت تفکیک مکانی و وضوح پایین سنجنده حرارتی ب) عدم استخراج با گوشه‌ها دقت زیر پیکسل

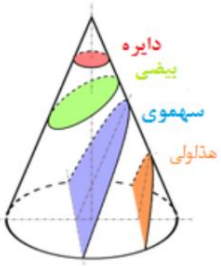
در شکل (۴-الف) قدرت تفکیک مکانی و وضـوح پـایین سنجنده حرارتی در تصویربرداری از الگو کالیبراسیون و در شکل (۴-ب) عدم استخراج گوشـه‌هـا بـا دقـت زیـر پیکسل ارائه شده است. در طرف مقابل، استفاده از الگو کالیبراسیون با تارگت‌های دایره‌ای و استخراج مختصات دو بعدی مرکز دایره‌ها به‌منظور برقراری ارتباط بـا فضـا زمینی و بـرآورد پارامترهـای کالیبراسـیون نتـایج قابـل قبولی ارائه می‌دهند[۲۵]. تارگت‌های دایره‌ای به دلیـل متقارن بودن دارای حساسیت کمتری نسبت به پدیـده مات شدگی[1] می‌باشند. علاوه بر این بـه دلیـل هندسـه منعطف، امکان شناسایی بیضی بهینـه در تصـاویر اخـذ شده از آن فراهم است[۲۵ و ۳۳].

روش‌هـایی کـه از تارگـت‌هـای کالیبراسـیون دایـره‌ای استفاده می‌کنند، به‌طـور معمـول از روش‌هـای بـرازش بیضی جهت استخراج مختصات دو بعدی مرکـز تارگـت بهره می‌گیرنـد. از جملـه ایـن روش‌هـا معادلـه مقـاطع

[1] *Blur*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

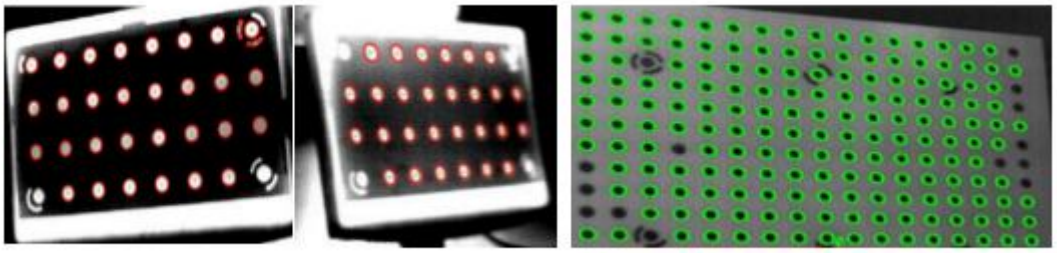
مخروطی می‌باشد. یک مقطع مخروطی منحنی است که از تقاطع یک مخروط با یک صفحه ایجاد می‌گردد. همچنین با توجه به شکل (۵) بیان می‌گردد که دایره حالت خاصی از بیضی است.



شکل ۵: نمایش تقاطع مخروط با صفحات مختلف[۳۴]

در این روش از طریق معادله خطوط گرادیان مماس بر بیضی در نقاط محیط بر عارضه و میانگین‌گیری اقدام به استخراج بیضی و مرکز کانونی آن به‌عنوان مختصات دو بعدی تارگت در فضا تصویر می‌شود. [۳۵ و ۳۶]. با نگاهی به تحقیقات جاویدی [۳۴] و آرفته [۳۷] دیده می‌شود که روش‌های گرادیان مبنا جهت استخراج و برازش خطوط محیطی بیضی تحت تأثیر عواملی مانند قدرت تفکیک مکانی و وضوح پایین تصاویر حرارتی[۴]، وجود نویز[۳۸] و تصویربرداری با زاویه مایل به‌عنوان پارامتر طراحی شبکه می‌باشند[۲۹].

در این راستا موارد فوق موجب از دست رفتن تعدادی از تارگت‌ها می‌شود و به بالطبع دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی را کاهش می‌دهد. در شکل(۶) نتایج بصری از دست رفتن تارگت‌ها به دلیل محدودیت‌های فوق ارائه شده است.



(الف)[۳۴] (ب)[۳۷]

شکل ۶: نمایش از دست رفتن تارگت‌ها به دلیل محدودیت‌های سنجنده حرارتی غیر متریک. الف) تارگت‌هایی دایره‌ای سبز استخراج شده توسط الگوریتم معادله مخروطی ب) تارگت‌هایی دایره‌ای قرمز استخراج شده توسط الگوریتم معادله مخروطی

در شکل (۶-الف) تارگت‌هایی که با دایره سبز مشخص شده‌اند توسط الگوریتم معادله مخروطی از الگو کالیبراسیون استخراج گردیده‌اند. همچنین در شکل (۶-ب) تارگت‌ها با دایره قرمز بیانگر تارگت‌های استخراج شده با استفاده از الگوریتم معادله مخروطی می‌باشند. به همین دلیل جهت غلبه بر مشکلات روش‌های گرادیان مبنا در این مقاله جهت برازش و استخراج دقیق مرکز کانونی بیضی از الگوریتم تبدیل هاف[۳۹] استفاده شده است. مزیت روش پیشنهادی عدم نیاز به استخراج کامل خطوط محیطی بیضی است. به عبارت بهتر در روش پیشنهادی با استخراج پیکسل-ها یا نقاط انتهایی محور اصلی بیضی الگوریتم قادر به استخراج بیضی در حالت‌های کامل و ناقص است[۳۹]. همان‌طور که در بخش پیاده سازی بیان می‌شود، روش تبدیل هاف موجب استخراج و حفظ تارگت‌های از دست رفته به دلیل محدودیت‌های مذکور (قدرت

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

تفکیک مکانی و وضوح پایین، وجود نویز و ...) می‌شود؛ بنـابراین بـا افـزایش تعـداد تارگـت‌هـا، پـارامترهـای کالیبراسـیون هندسـی بـا دقـت بـالاتری تخمـین زده می‌شوند.

در ادامه پس از ارائه مطالعـات مـروری در بخـش ۲ بـه شرح روش پیشنهادی در بخش ۳ پرداخته شده اسـت. ارزیابی و بحث در مورد نتایج روش تحقیق در بخـش ۴ مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. سرانجام نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی تحقیق در بخش ۵ ارائه می‌گردد.

۲- مروری بر تحقیقات پیشین

تـاکنـون الگوهـای گونـاگونی بـه‌منظـور کالیبراسـیون هندسی سنجنده حرارتی مورد استفاده قرار گرفتـه‌انـد. در این راستا از رایج‌ترین ایـن الگوهـا بـه الگـو صـفحه شطرنجی و یا الگو با تارگت‌های دایره‌ای اشاره می‌شـود [۲۴ و ۳۳]. در این بخش به‌منظور مروری بر تحقیقـات پیشین، مقالات بر اساس نوع هندسه تارگـت‌هـای الگـو کالیبراسیون، منبع انرژی (فعال و یا غیرفعال) و جـنس الگو کالیبراسیون به دو دسته تقسیم می‌شوند.

در دسته اول الگوهای صفحه شطرنجی با جنس و منابع مختلف انرژی حرارتی بررسـی مـی‌شـوند. الگـو صـفحه شطرنجی از جنس و مواد اولیه مختلفی جهت تشخیص توسط سنجنده حرارتی ساخته می‌شود. همان‌گونه کـه در بخـش ۱ بیـان شـد در الگوهـای صـفحه شـطرنجی بهترین عوارض قابل استخراج از الگو به‌عنوان مختصات دو بعـدی تارگـت در فضـا تصـویر عـوارض گوشـه‌ای می‌باشند[۲۵]. این عـوارض از تقـاطع خطـوط افقـی و عمودی الگو با استفاده از عملگر هریس قابل اسـتخراج می‌باشند[۳۲].

در برخـی از تحقیقـات از الگـو کالیبراسـیون صـفحه شطرنجی قابل مشاهده برای سنجنده مرئی غیر متریک استفاده شده است [۴۰]. ایـن رویکـرد نیـاز بـه تـابش حرارت و یک مرحله پیش پردازش تصاویر جهت بهبـود و وضوح گوشه‌های تصاویر دارد. همچنین هیچ ارزیـابی کمی برای انـدازه‌گیـری دقـت بـه دسـت آمـده انجـام نمی‌شود[۲۵].

رززوتارسـکی و همکـاران (۲۰۰۸)، جهـت بازسـازی سـه‌بعـدی از تصـاویر حرارتـی اقـدام بـه کالیبراسـیون هندسی شده است. در این رویکرد به‌منظـور شناسـایی الگو کالیبراسـیون صـفحه شـطرنجی توسـط سـنجنده حرارتی از فویل آلومینیومی در محل مربـع‌هـای سـفید الگـو صـفحه شـطرنجی اسـتفاده شـده اسـت. پـس از اسـتخراج عـوارض گوشـه‌ای از الگـو پارامترهـای کالیبراسـیون بـرآورد شـده‌انـد[۲۶]. محـد و همکـاران (۲۰۱۲) ، از الگو صفحه شطرنجی که داخل مربـع‌هـای سیاه از مواد گچی به‌صورت ژل سرد شده و لامـپ ۵۰۰ واتـی بـرای انتقـال حـرارت بـه الگـو بـه‌منظـور انجـام کالیبراسیون هندسی سـنجنده حرارتـی اسـتفاده شـده است. علاوه بر این ساخت این الگو ارزان است و نتـایج نشـان مـی‌دهـد کـه مـی‌توانـد ۳۹٪ مـؤثرتر از صـفحه شطرنجی گرم شده معمولی برای کالیبراسیون سنجنده حرارتی استفاده شود[۴۱].

ساپونارو و همکـاران (۲۰۱۵)، الگـو صـفحه شـطرنجی، جهت حفظ گرما تولید شده توسـط منبـع گرمـایی بـر روی یک صفحه سرامیکی قرار داده شـده اسـت. نتـایج نشـان مـی‌دهـد کـه قـرار دادن الگـو بـر روی کاشـی سرامیکی لعاب‌دار موجب حفظ گرما در سطح الگو برای مدت زمان ۱۰ تا ۲۰ دقیقه می‌گردد. همچنین عـوارض گوشه‌ای با دقت بیشتری استخراج می‌شوند[۴۰].

جواد نژاد و همکاران (۲۰۲۰)، از الگو صفحه شـطرنجی ۱۱ × ۱۱ ساخته شده از کاغذ مقوایی و مربع‌های فلزی بازتابنـده ۱٫۵ اینچـی (۳۸٫۱ میلـی‌متـر) جهـت کالیبراسیون هندسی سـنجنده حرارتـی اسـتفاده شـده است. تضاد وضوح حرارتـی جهـت بـرآورد پارامترهـای کالیبراسیون هندسی سـنجنده حرارتـی از طریـق نگـه داشتن الگو کالیبراسیون در محـیط خـارجی و آسـمان ابری ایجاد شده است. سرانجام با استفاده از جعبه ابـزار کلتک[1] نرم افزار متلب پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده برآورد می‌شوند[۴۲].

[1] *Caltech*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

شیواکومار و همکاران (۲۰۲۰)، جهت انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی از الگو کالیبراسیون صفحه شطرنجی آلومینیومی استفاده شده است. در این تحقیق به‌منظور تشخیص گوشه‌های الگو صفحه شطرنجی، با توجه به عملکرد ضعیف آشکارساز صفحه شطرنجی کتابخانه *OpenCV* پایتون از پیاده‌سازی *libcb Detect* ++*C* استفاده شده است. سپس پس از استخراج گوشه‌ها با استفاده از جعبه ابزار کالیبراسیون دوربین چشم ماهی[1] کتابخانه *OpenCV* پایتون پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی برآورد می‌شوند[۴۳].

در الگوهای کالیبراسیون صفحه شطرنجی استخراج عوارض گوشه‌ای متأثر از لبه‌های ضعیف و قدرت تفکیک مکانی پایین تصاویر حرارتی می‌باشد[۲۵]. لذا به‌موجب درهم‌آمیختگی پیکسل‌های مجاور در تصاویر حرارتی امکان استخراج گوشه‌ها با دقت زیر پیکسل امکان‌پذیر نیست. علاوه بر این بر اساس تحقیقات انجام شده الگو با تارگت‌های دایره‌ای نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد[۲۵].

علاوه بر اینکه انتقال و حفظ حرارت به یک صفحه شطرنجی اسکن شده کار دشواری است و معمولاً به منبع گرمایشی فعال همچون لامپ نیاز دارد[۲۸ و ۴۴]. در الگو کالیبراسیون صفحه شطرنجی با توجه به استفاده از منبع گرمایشی فعال، توزیع یکنواخت و حفظ گرما در تمام محدوده الگو امری دشوار بوده و از لحاظ هزینه و زمان نیز مقرون‌به‌صرفه نیست.

دسته دیگر از الگوهای کالیبراسیون مورد بررسی جهت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک، الگو کالیبراسیون حاوی تارگت‌های دایره‌ای می‌باشند. تارگت‌های دایره‌ای می‌توانند به دو صورت توخالی و یا تو پُر و همچنین به دو شکل هندسی متقارن[2] و یا غیرمتقارن[3] در کنار یکدیگر قرار گیرند.

از دیدگاه بررسی نوع منبع انرژی در الگو کالیبراسیون دایره‌ای، در تحقیق [۱۵، ۴۵ و ۴۶] از الگو با تارگت‌های دایره‌ای فعال استفاده شده است. همچنین صفحه الگو کالیبراسیون به‌اندازه قطر لامپ *LED* برش داده شده و با تعبیه کردن لامپ‌ها در صفحه، الگویی با نقاط کنترل دایره‌ای جهت تشخیص توسط سنجنده حرارتی و انجام کالیبراسیون تولید کرده‌اند.

بر اساس نتایج تحقیقات یکی از مشکلات استفاده از منبع انرژی فعال در الگو کالیبراسیون دایره‌ای این است که به دلیل اثر پراکنش نور به وجود آمده[۴۷] مرکز لامپ‌های تارگت را نمی‌توان با دقت بالا اندازه‌گیری کرد[۴۸]. همچنین تعبیه لامپ‌ها در الگو موجب افزایش وزن الگو کالیبراسیون می‌شود و نیاز به یک منبع تغذیه انرژی خارجی دارد[۴۷]. از این رو الگوهای کالیبراسیون با منبع انرژی غیرفعال (مانند صفحه نمایشگر کامپیوتر[۳۷]) به‌موجب ایجاد اختلاف دما کافی در تشخیص صفحه الگو و همچنین استخراج تارگت‌ها به‌عنوان مختصات دو بعدی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند[۲۸، ۳۴ و ۴۴]. همچنین استفاده از منبع انرژی غیرفعال موجب افزایش زمان حفظ حرارت در سطح الگو کالیبراسیون می‌شود و از دیدگاه اقتصادی مقرون به‌صرفه است[۴۹].

در ادامه از دیدگاه استخراج مختصات دو بعدی مرکز تارگت‌های دایره‌ای بیان می‌شود که با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین و اعوجاجات عدسی سنجنده حرارتی تارگت‌های دایره‌ای در اکثر تصاویر اخذ شده با جهات و زوایای مختلف از الگو کالیبراسیون به‌صورت بیضی تصویر خواهند شد [۳۴]؛ بنابراین جهت استخراج مختصات دو بعدی مرکز تارگت‌های دایره‌ای از الگوریتم‌های برازش و استخراج مرکز کانونی بیضی استفاده می‌شود.

یکی از روش‌های برازش و استخراج بیضی روش

[1] *Fisheye*

[2] *Symmetric*

[3] *Asymmetric*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

خاصیت دوگانگی مخروط می‌باشد [۳۶]. در ایـن روش به‌منظور برازش بیضی و حداقل نمودن خطـا بـرازش از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود [۳۶]. بر اسـاس تحقیقات صـورت گرفتـه از جملـه روش‌هـای معمـول برازش و استخراج مرکز کانونی بیضی به‌عنوان مختصات دو بعدی مرکز تارگت، معادله مقاطع مخروطی می‌باشد. در این روش از طریق معادله خطوط گرادیان مماس بـر بیضی در نقاط محـیط بـر عارضـه، اقـدام بـه بـرازش و استخراج مرکز کانونی بیضـی از طریـق میـانگین‌گیـری می‌شود [۳۵].

اوسـامنتیاگا و همکـاران (۲۰۱۷)، ایـده‌ای بـه‌منظـور ساخت آسان و در عین حال بسیار دقیق و ارزان قیمـت جهت طراحی الگو کالیبراسـیون پیشـنهاد شـده اسـت. تارگت‌های الگو کالیبراسـیون بـر روی مـواد کامپوزیـت آلومینیومی با استفاده از چاپگر صنعتی تهیـه شـده‌انـد. در این تحقیق به‌منظور تصویربرداری از الگو از سنجنده حرارتی مدل *Flir T۴۵۰sc* استفاده شده است. در ایـن رویکرد به‌منظور برازش بیضی، بـا اسـتفاده از الگـوریتم تشخیص لبه منحنـی‌هـای بسـته جسـت‌وجـو شـده و منحنی‌ها با یک بیضی تقریب زده می‌شوند[۲۵].

جاویدی و همکاران (۲۰۱۷)، دو الگو پر کـاربرد و رایـج کالیبراسیون هندسـی سـنجنده حرارتـی غیـر متریـک یعنی استفاده از تارگت‌های مربعی و دایره‌ای بـه‌منظـور کالیبراسیون هندسـی سـنجنده حرارتـی غیـر متریـک بررسی می‌شوند. در الگو کالیبراسیون مربعی بـه‌منظـور اسـتخراج مختصـات دو بعـدی تارگـت‌هـا از الگـوریتم استخراج گوشه هریس اسـتفاده شـده اسـت. همچنـین جهت برازش و استخراج مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونـه از روش معادلـه مقـاطع مخروطـی[۳۵] اسـتفاده گردیده است. در این رویکرد بر اسـاس مقایسـه بـرآورد پارامترهای کالیبراسیون برتری نسبی الگو کالیبراسیون دایره‌ای نسبت به مربعی بیان شده است[۳۴].

آرفته و همکـاران (۲۰۱۷)، از سـنجنده حرارتـی مـدل *KEII MC۱-۶۴۰s* مورد استفاده در این تحقیق جهـت کالیبراسیون هندسی استفاده شده است. همچنین الگـو کالیبراسیون با هندسه دایـره‌ای متقـارن و تعـداد ۷×۴ دایره انتخـاب گردیـده اسـت. در ایـن پـژوهش جهـت آشکارسازی تارگت‌ها از منبع گرمایش غیرفعال (صفحه روشن مانیتور کامپیوتر) استفاده شده است. در ادامه بـا استفاده از رویکرد معادله مقاطع مخروطی[۳۵] اقدام به برازش و استخراج مرکز کانونی بیضـی‌هـای موجـود در الگو کالیبراسیون شـده اسـت. سـرانجام پـس از انجـام کالیبراسیون هندسی بـرای ۱۶ تصـویر، میـانگین خطـا نگاشت مجدد ۰/۴۷ پیکسل جهت تخمـین پارامترهـای توجیـه داخلـی و اعوجاجـات عدسـی حاصـل شـده است[۳۷].

شـرام و همکـاران (۲۰۲۰)، بـه‌منظـور کالیبراسـیون هندسـی سـنجنده حرارتـی در محـدوده‌هـای طیفـی مختلف (مرئی، مادون‌قرمز نزدیک، مادون‌قرمز متوسـط و مـادون‌قرمـز بلنـد) امـواج الکترومغنـاطیس از الگـو کالیبراسـیون تصـویربرداری شـده اسـت. در روش پیشنهادی به‌منظور بـرازش و اسـتخراج مرکـز کـانونی تارگـت‌هـای دایـره‌ای از الگـوریتم آشـکار سـاز دایـره[1] *(findCirclesGrid())* کتابخانـه *OpenCV* پـایتون[۵۰] استفاده شده است. این تابع به بررسی وجود شـبکه‌ای از دایـره‌هـا در تصـویر ورودی مـی‌پـردازد. بنـابراین در صورت وجود شبکه‌ای از دایره‌ها، تابع مرکز دایـره‌هـا را تعیین می‌کند و اگر تمام مراکز پیـدا شـده باشـند و در یک ترتیب معین (ردیف به‌ردیف، از چپ بـه راسـت در هر سطر) قرار گرفته باشـند، تـابع مقـدار غیـر صـفر را برمی‌گرداند. در غیر این صورت، اگـر تـابع نتوانـد تمـام مراکز را تعیین کند مقدار صفر را بر می‌گرداند. در ایـن راستا تارگت‌های دایـره‌ای توسـط آشکارسـاز *OpenCV* به‌سختی قابل تشخیص می‌باشـند. سـرانجام بـر اسـاس نتـایج بیـان مـی‌گـردد کـه نسـبت وضـوح بـه نـویز[2] و الگوریتم‌های مختلف تشخیص ویژگی *OpenCV* دلایـل تغییر دقت کالیبراسیون هندسی است[۳۰].

[1] *Circle detectors*

[2] *Contrast-to-noise*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

زیکای و همکاران (۲۰۲۱)، به‌منظور کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از یک الگو کالیبراسیون شامل یک صفحه آلومینیومی سفید رنگ با دما پایین و حاوی تارگت‌های دایره‌ای با هندسه متقارن ۷×۷، یک صفحه فولادی ضد زنگ سیاه و یک صفحه گرمایشی استفاده شده است. همچنین تصویربرداری به‌صورت هم‌زمان توسط سنجنده مادون‌قرمز با طول موج بلند و سنجنده مرئی جهت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی انجام می‌شود. در این راستا با استفاده از شبکه عصبی روش *YOLO-V۴* به‌سرعت الگو کالیبراسیون شناسایی می‌شود. در این تحقیق از روش تشخیص دایره در سطح قوس[1] به‌جای سطح پیکسل[2] برای تشخیص لبه‌های تارگت‌های دایره‌ای الگو کالیبراسیون استفاده شده است. سرانجام پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی با خطا ریپروجکشن[3] ۰٫۵۴ پیکسل محاسبه شده است[۵۱].

گونزالس پرز و همکاران (۲۰۲۱)، از الگو صفحه شطرنجی از جنس پی وی سی[4] و یک ورق آلومینیومی سیاه تعبیه شده در پشت الگو استفاده شده است. الگو کالیبراسیون حاوی تارگت‌های مربعی و دایره‌ای برش داده شده با پلاتر لیزری می‌باشند. ورق آلومینیومی در یخچال خنک می‌شود تا وضوح حرارتی مشخصی را در تصویر حرارتی بین مربع‌ها و دایره‌های صفحه شطرنجی ایجاد نماید. سرانجام به‌منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی از روش ژانگ [۵۳] استفاده شده است. در ادامه به تحقیقات مرتبط با استخراج بیضی با استفاده از تبدیل هاف پرداخته شده است[۵۲].

کانگ و همکاران (۲۰۱۹)، به‌منظور بهبود سرعت و دقت تشخیص قطر تک بلور سیلیکون روش تشخیص بیضی بر اساس الگوریتم بهینه سازی طوفان مغزی تبدیل هاف پیشنهاد شده است. این روش از الگوریتم بهینه‌سازی طوفان مغزی برای جستجوی پارامترهای بیضی جهت دستیابی به حداکثر مقدار انباشتگر استفاده می‌کند. پس از استفاده از تبدیل هاف، مقدار دقیق اندازه‌گیری قطر تک کریستال سیلیکون حاصل می‌شود[۵۴].

شیا و همکاران (۲۰۲۰)، روشی جهت تشخیص دقیق سه بعدی شکاف‌ها جهت کنترل پرچ و کیفیت[5] سطح هواپیما پیشنهاد شده است. به دلیل پیچیدگی توزیع روشنایی بر روی سطح هواپیما، ابتدا یک روش اندازه‌گیری سطح دقیق بر اساس طرح حاشیه‌ای[6] پیشنهاد شده است. سپس بر اساس اطلاعات دو بعدی و سه بعدی، روشی برای شناسایی و مکان‌یابی خودکار پرچ‌ها و درزها بر اساس تشخیص بیضی بر اساس الگوریتم تبدیل هاف استفاده شده است[۵۵].

هوانگ و همکاران (۲۰۲۰)، جهت کشاورزی هوشمند مدل فازی *Mask R-CNN* به‌منظور شناسایی خودکار سطوح رسیدگی گوجه‌فرنگی پیشنهاد شده است. در ابتدا، جهت حاشیه نویسی خودکار تصاویر از یک مدل فازی *C-Mean* برای حفظ اطلاعات مکانی عناصر مختلف پیش زمینه و پس زمینه تصویر استفاده شده است. سپس با استفاده از روش تبدیل هاف موقعیت‌های لبه هندسی خاص گوجه‌فرنگی‌ها تعیین شده است[۵۶].

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مطالعات پیشین، جهت انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک، استفاده از الگو کالیبراسیون دایره‌ای نتایج دقیق‌تر و قابل قبول‌تری را نسبت به تارگت‌های مربعی ارائه می‌دهد[۲۵ و ۳۴]. علاوه بر این یکی از چالش‌های مرتبط در استفاده از الگوهای دایره‌ای برازش و

[1] *Arc-level*
[2] *Pixel-level*
[3] *Reprojection error*
[4] *Polyvinyl chloride (PVC)*
[5] *Controlling riveting and quality*
[6] *Fringe projection*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز تارگت‌ها به‌منظور برقراری ارتباط با فضا زمینی و برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی می‌باشد. در این راستا هر چه تعداد تارگت‌ها و مختصات دو بعدی مرکز تارگت‌ها با دقت بالاتری استخراج شوند موجب افزایش و بهبود دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی خواهد شد.

در تحقیقات پیشین، روش معادله مقاطع مخروطی به‌عنوان روش معمول برازش و استخراج مرکز کانونی بیضی معرفی شده است. لذا با توجه به بررسی نتایج تحقیقات جاویدی [۳۴] و آرفته [۳۷] مورد استفاده از روش معادله مقاطع مخروطی، این نکته استنباط می‌گردد که اگر به دلیل محدودیت‌های بیان شده (قدرت تفکیک مکانی و وضوح پایین، وجود نویز و ... .) امکان استخراج کامل گرادیان‌های محیطی بیضی فراهم نباشد، روش‌های معمول موفق به برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی بیضی نمی‌باشند. علاوه بر این با از دست رفتن تارگت‌ها بالطبع دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک کاهش خواهد یافت.

در این تحقیق با توجه به ارائه نتایج دقیق‌تر الگوهای کالیبراسیون دایره‌ای [۲۵ و ۳۴] نسبت به دیگر الگو-های مورد استفاده در کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی، از الگوی کالیبراسیون دایره‌ای استفاده شده است؛ بنابراین تمرکز اصلی این تحقیق بهبود برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک بر اساس برازش دقیق و استخراج کامل مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه از الگو کالیبراسیون دایره‌ای است. در این راستا جهت حفظ و استخراج دقیق مختصات دو بعدی دقیق تارگت‌های بیضی گونه و رفع محدودیت‌های سنجنده حرارتی غیر متریک از الگوریتم تبدیل هاف استفاده شده است. روش تبدیل هاف عاری از اتصال تمام نقاط منحنی[1] بیضی می‌باشد.

علاوه بر این اگر پیکسل‌ها یا نقاط انتهایی محور اصلی بیضی موجود باشند، الگوریتم قادر به استخراج بیضی‌ها در حالت‌های کامل و ناقص است. همچنین به دلیل استفاده از پارامترهای کانون بیضی جهت استخراج و برازش بیضی در تصاویر دارای نویز متوسط عملکرد مناسبی دارد[۳۹]. در ادامه به شرح جزئیات مراحل روش پیشنهادی پرداخته شده است.

۳- روش پیشنهادی

در این تحقیق کالیبراسیون سنجنده حرارتی غیر متریک مدل *KEII MC*۱-۶۴۰*s*، از دیدگاه هندسی مورد بررسی قرارگرفته است. در روش پیشنهادی این تحقیق تمرکز اصلی بر روی برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف می‌باشد.

در شکل(۷) دیاگرام روش پیشنهادی کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی نمایش داده شده است.

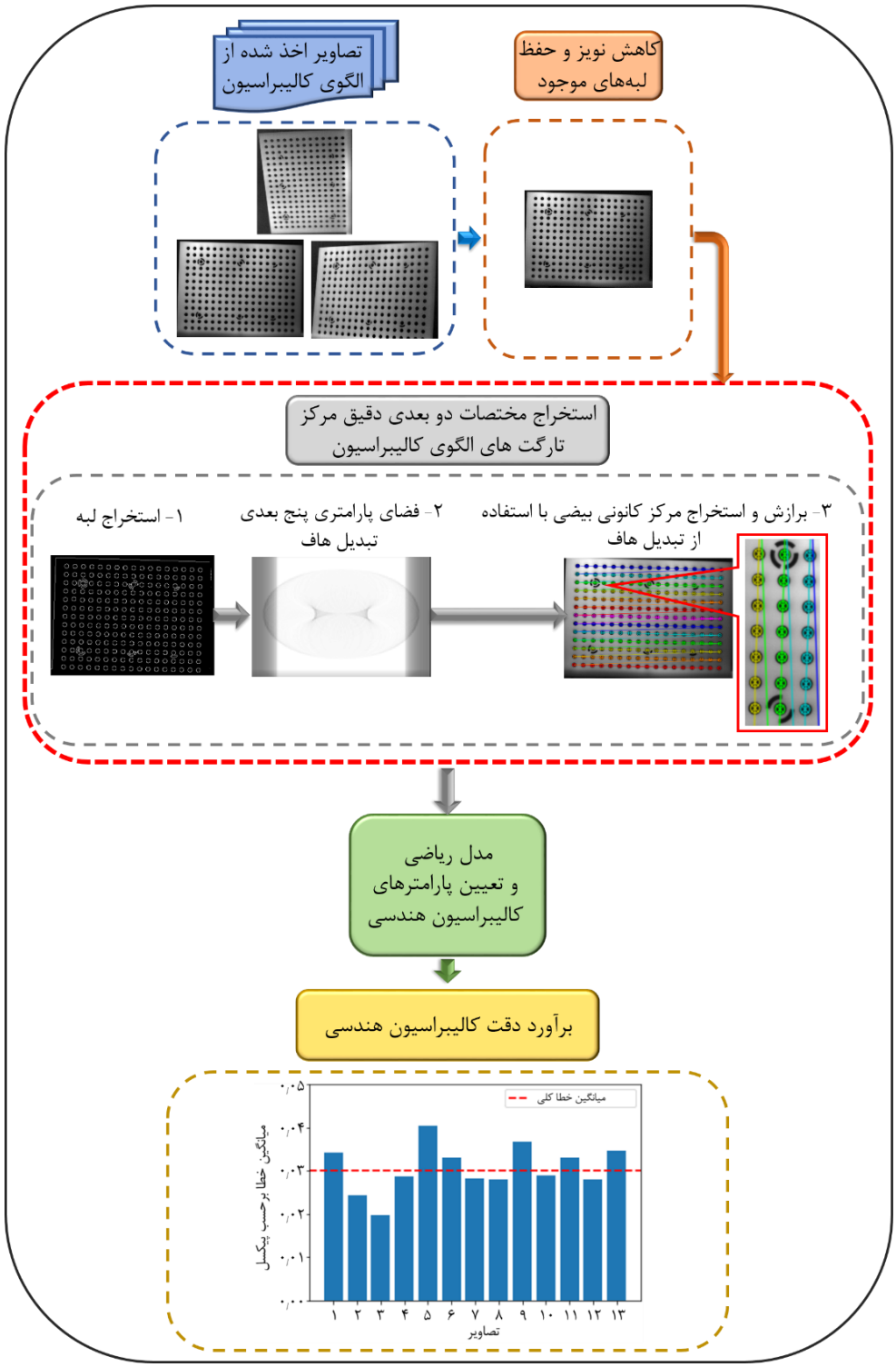
در مقایسه با مراحل جاری کالیبراسیون یک سنجنده حرارتی، در روند پیشنهادی بهبود بخش تشخیص تارگت‌ها مدنظر بوده است. مطابق دیاگرام ارائه شده در شکل(۷)، کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از ۴ مرحله ذیل تشکیل شده است: ۱- تصویربرداری از الگو کالیبراسیون و پیش پردازش تصاویر ۲ – برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف ۳- برقراری ارتباط مختصات دو بعدی تارگت‌ها با فضا زمینی و همچنین برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی با استفاده از معادلات شرط هم خطی[2] ۴ - ارزیابی دقت کالیبراسیون هندسی با استفاده از معیار میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر[3] [۵۷].

[1] *Contour points*

[2] *Collinearity equation*

[3] *Mean Reprojection Error per Image*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]



شکل ۷: دیاگرام روش پیشنهادی کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

در دیاگرام پیشنهادی با توجه به نـویزی بـودن تصـاویر حرارتی[۲۵ و ۳۸] پـیش‌پردازشـی جهـت حـذف و یـا کاهش نویز بر روی تصاویر حرارتی به‌منظور تشخیص و استخراج لبه‌های باکیفیت از تصاویر و تارگـت‌هـا انجـام می‌شود. لبه‌های موجود در تصاویر و تارگت‌ها به‌منظـور معرفی به الگـوریتم بـرازش و اسـتخراج مرکـز کـانونی تارگت‌هـا اسـتخراج مـی‌شـوند. در ایـن راسـتا در ایـن تحقیق جهت کاهش نویز و حفظ لبـه‌هـای موجـود در الگو از فیلتر بایلترال[1] استفاده شده است.

در تصاویر حرارتی به دلیل اعوجاجات مربوط به عدسی لبه‌های استخراج شده از تارگت‌های دایره‌ای، بـه شـکل دایره با هندسه کامل نبوده و بـه شـکل بیضـی تصـویر می‌شوند؛ بنابراین به‌منظور برازش بیضی و مرکز کانونی آن‌ها به‌عنوان مختصات دو بعدی دقیق تارگت‌ها جهـت برقراری ارتباط بین فضا تصویر و زمینی، در این تحقیق از الگوریتم تبـدیل هـاف اسـتفاده شـده اسـت. در ایـن راستا تمرکز اصلی در این تحقیـق اسـتخراج و نمـایش پارامترهـای کـانونی بیضـی جهـت بـرآورد پارامترهـای کالیبراسیون هندسی می‌باشد و از نمایش پیکسل‌ها یـا نقاط انتهایی محور اصلی بیضی صرف نظر شـده اسـت. همچنین به‌منظور آشکارسازی لبه‌های مورد نظر جهـت معرفـی بـه الگـوریتم تبـدیل هـاف، در ایـن تحقیـق از الگـوریتم تشـخیص لبـه کنـی[2] اسـتفاده شـده اسـت. سرانجام جهت انجـام کالیبراسـیون هندسـی سـنجنده حرارتی و برآورد پارامترهای توجیـه داخلـی، خـارجی و اعوجاجات عدسـی از مـدل ریاضـی شـرط هـم خطـی اسـتفاده مـی‌شـود. در ادامـه بـه شـرح جزئیـات روش پیشنهادی پرداخته شده است.

۳-۱- کاهش نویز و حفظ لبه‌های موجود

فیلتر بایلترال یک فیلتر غیرخطی هموارساز حفظ لبه و کاهش نویز برای تصاویر می‌باشد. این فیلتر بـا اسـتفاده از ترکیب غیرخطی مقادیر مجاور، موجـب هموارسـازی تصـویر مـی‌شـود. بـرای ایـن منظـور، در طـی مراحـل هموارسازی، این فیلتر لبه‌هـای اصـلی تصـویر را حفـظ کرده و خروجی این فیلتر تصویری هموار با حفظ لبه‌ها و کاهش نویز است[۵۸]. در ایـن فیلتـر مقـدار عـددی شدت روشنایی هـر پیکسـل بـا میـانگین پیکسـل‌هـای مجاور بر اساس توزیع گوسین[3] وزن دهی می‌شود. نکته قابـل‌توجـه در مـورد فیلتـر بـایلترال، تأثیرگـذاری تفاوت‌های رادیومتریکی بر وزن دهـی‌هـا اسـت و تنهـا میـزان وزن دهـی بـر اسـاس فاصـله اقلیدسـی تعیـین نمی‌شود. سرانجام با تنظـیم نمـودن وزن پیکسـل‌هـای همسایه به‌صورت سامانمند در یک حلقه، لبه‌های تیـز[4] تصویر حفظ می‌شوند[۵۹].

۳-۲- الگوریتم تشخیص لبه

الگوریتم پیشنهادشده توسط کنـی (۱۹۸۶)، بـه‌عنـوان یک الگوریتم ایده آل بـرای تشـخیص لبـه در تصـاویر مطرح شده اسـت[۶۰]. هـدف کنـی کشـف الگـوریتمی هوشمند برای شناسایی لبه بوده که احتمـال تشـخیص لبه‌های اشتباه را کاهش دهد و لبه‌هایی با وضوح بیشتر شناسایی گردند[۶۰]. الگوریتم کنی یک روش هوشمند استخراج لبه می‌باشد که به‌خوبی لبـه‌هـا را بـا پاسـخی واضح و مـوقعیتی صـحیح فـراهم مـی‌کنـد. ایـن روش امروزه در بیشتر کاربردهای پردازش تصـویر بـه‌صـورت گسترده استفاده می‌شود[۶۱]. الگوریتم تشـخیص لبـه کنی بهتر از سایر اپراتورهای تشخیص لبه از جنبه‌هـای مختلف مانند سازگاری با طبیعت، مناسب برای تصـاویر نویزی، استخراج لبـه‌هـای واضـح‌تـر و احتمـال کـم‌تـر شناسایی لبه‌های اشتباه عمل می‌کند. ایـن الگـوریتم از چهـار گـام اصـلی تشـکیل‌شـده اسـت کـه بـه ترتیـب عبارت‌اند از: حذف نویز توسط نرم کـردن تصـویر، پیـدا کردن گرادیان‌ها، جلوگیری از حداکثر ماکزیمم[5] و حـد آستانه‌گذاری[۶۲].

[1] *Bilateral Filter*

[2] *Canny*

[3] *Gaussian*

[4] *Sharp*

[5] *Non maximum suppression*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

۳-۳- برازش و استخراج مختصات دو بعدی مرکز کانونی بیضی

در این تحقیق با توجه به بررسی مطالعات پیشین جهت انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از الگو کالیبراسیون دایره‌ای استفاده شده است. همچنین به‌منظور برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی نیاز به برازش و استخراج تارگت‌های بیضی گونه و تعیین مرکز کانونی آن‌ها به‌عنوان مختصات دو بعدی دقیق تارگت‌ها در فضا تصویر می‌باشد. علت این امر آن است که با توجه به اعوجاجات عدسی و قدرت تفکیک مکانی پایین سنجنده حرارتی، در تصاویر حرارتی تارگت‌های دایره‌ای به شکل بیضی ثبت می‌شوند؛ بنابراین در این تحقیق از روش تبدیل هاف [۳۹]، جهت برازش و استخراج مختصات دو بعدی مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه استفاده شده است.

استخراج اشیا بیضی شکل از تصاویر رقومی در تشخیص شکل از اهمیت اساسی برخوردار است[۶۳]. یکی از بهترین روش‌های شناخته شده در استخراج بیضی از تصاویر، الگوریتم تبدیل هاف است. مفهوم کلیدی تبدیل هاف استاندارد در استخراج بیضی تعریف نگاشتی بین فضا تصویر دوبعدی و فضا پارامتری پنج بعدی است. این پنج پارامتر مختصات نقطه مرکزی بیضی، طول محورهای اصلی و فرعی بیضی و زاویه محور اصلی نسبت به محور طول‌ها می‌باشند.

در تبدیل هاف هر نقطه در فضا تصویر به سلول‌های خاص انباشتگر[1] پنج بعدی در فضا هاف نگاشت می‌شود. سپس در فضا هاف معیار انتخاب پارامترهای مربوط به سلول‌های انباشتگر بر اساس عبور منحنی تعریف شده توسط این پارامترها از یک نقطه در فضا هاف تعیین می‌شود؛ بنابراین این نقاط به‌عنوان رأی دهنده به پارامترهای بیضی موجود در تصویر تعریف می‌شوند. سپس با مجموع رأی‌های موجود در سلول‌ها و پس از در نظر گرفتن تمام نقاط تصویر، حداکثر محلی انباشتگر با پارامترهای بیضی شناسایی‌شده در تصویر مطابقت داده می‌شود.

مزیت اصلی این الگوریتم در استخراج بیضی، مقاومت آن در برابر نقاط ناپیوسته یا از دست رفته تصویر به دلیل عاری بودن این الگوریتم به اتصال تمام نقاط منحنی[2] بیضی است. به همین دلیل، الگوریتم ارائه شده برای تشخیص بیضی در صورت وجود نویز متوسط یا در تصاویر با پس‌زمینه نامرتب مناسب است. متأسفانه نیاز به انباشتگر پنج بعدی محدودیت‌های محاسباتی و ذخیره‌سازی زیادی را ایجاد می‌کند؛ بنابراین از کاربردهای عملی جلوگیری می‌کند. با توجه به این موضوع، الگوریتم‌های بسیاری برای حفظ مزایای اصلی تبدیل هاف درحالی‌که پیچیدگی محاسباتی را به حداقل می‌رساند، توسعه یافته‌اند[۶۴، ۶۵، ۶۶، ۶۷، ۶۸ و ۶۹].

روش پیشنهادی در این تحقیق از انباشتگر یک‌بعدی استفاده کرده و روشی با اطمینان جهت تشخیص بیضی می‌باشد. در نتیجه این کاهش در اندازه انباشتگر الگوریتم مورد استفاده از نظر نیاز به فضا ذخیره‌سازی کارآمد است. یکی دیگر از جنبه‌های متمایز الگوریتم این است که از محاسبه شیب‌ها و مماس‌های[3] پیکسل لبه جلوگیری می‌کند؛ بنابراین این روش حساسیت کمتری نسبت به نویز تصویر دارد. همچنین در این روش از کانون بیضی استفاده شده تا دقیقاً پارامترهای بیضی فرضی استخراج شوند. علاوه بر این، با ارتباط دادن محیط بیضی به تعداد پیکسل‌هایی که به بیضی رأی می‌دهند، اعتبار فرضیه بیضی بودن تعیین می‌شود. با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته در تصاویر مختلف بیان می‌گردد که با استفاده از تبدیل هاف در صورت موجود بودن پیکسل‌های انتهایی محور اصلی،

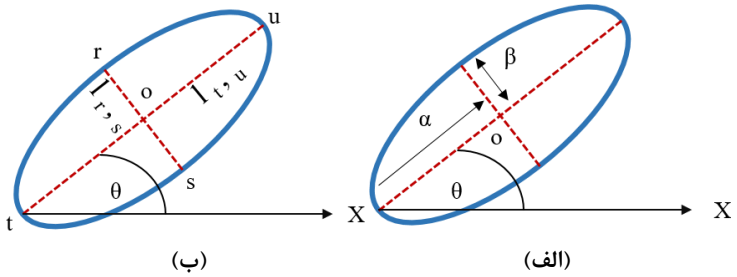
[1] *Accumulator*

[2] *Contour*

[3] *Tangents*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

می‌توان بیضوی کامل و ناقص را استخراج نمود [۳۹]. در شکل (۸) نمونه‌ای از نمـایش هندسـی یـک بیضـی ارائه شده است.



(ب) (الف)

شکل ۸: نمایش بیضی: الف) نمایش پارامترهای اصلی بیضی دلخواه ب) نمایش محورهای فرعی و اصلی بیضی

در بیضی نشان داده شـده در شـکل (۸-الـف) نقطـه O موقعیت مرکزی بیضی و (O_x, O_y) مختصات نقطـه O را نشان می‌دهـد. α و β بـه ترتیـب بـه‌عنـوان نـیم طـول محورهای اصلی و فرعی تعریف می‌شـوند. زاویـه محـور اصلی ساخته شده با محور طول‌ها θ عنوان شده اسـت. بـرای هـر بیضـی دلخـواه، اگـر مقـادیر $(\beta، \alpha، O_x،O_y، \theta)$تعیین گردند، می‌تـوان ایـن بیضـی را کـاملاً تعریـف نمود. در شکل (۸-ب) نمـایش دیگـری از بیضـی ارائـه شده است که $l_{t, u}$ و $l_{r, s}$، به ترتیب بیان‌گر محورهـای اصلی و فرعی بیضی می‌باشند.

در ادامه به‌منظور بیان روابط ریاضی برازش و اسـتخراج بیضی با استفاده از الگویتم تبـدیل هـاف از پارامترهـای بیضی ارائه شده در شکل (۸-ب) استفاده شده است. در این راستا $l_{r, s}$ و $l_{t, u}$، به ترتیب بیانگر محورهای فرعی و اصلی بیضی می‌باشند. همچنین نقـاط لبـه $t\ (t_x, t_y)$ و $u\ (u_x, u_y)$ بیضی به‌عنوان نقـاط ابتـدا و انتهـای محـور اصلی تعریف می‌شوند؛ بنابراین با استفاده از متغیرهـای t و u، مـی‌تـوان مقـادیر (Ox, Oy, α, θ) بیضـی را بـا استفاده از روابط (۱) تا (۴) محاسبه نمود. همچنـین بـا توجه به معلوم بودن فقط نیمی از محور فرعی β، جهت رأی دادن به متغیر β از نقـاط لبـه بـاقی‌مانـده تصـویر استفاده می‌شود؛ بنابراین با توجه به انجام رأی‌گیری در نیمی از طول محور فرعی به یـک انباشـتگر یـک‌بعـدی نیاز است.

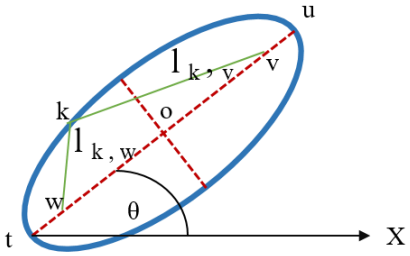
$$o_x = \frac{t_x + u_x}{2} \qquad \text{رابطه(۱)}$$

$$o_y = \frac{t_y + u_y}{2} \qquad \text{رابطه(۲)}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{(u_x - t_x)^2 + (u_y - t_y)^2}}{2} \qquad \text{رابطه(۳)}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{u_y - t_y}{u_x - t_x}\right) \qquad \text{رابطه(۴)}$$

با در نظر گرفتن بیضی ارائه شده در شـکل (۹)، کـانون بیضی به‌عنوان نقـاط w و v و موقعیـت مرکـزی بیضـی به‌عنوان نقطه O نشـان داده شـده اسـت. بـا توجـه بـه مقادیر (t_x, t_y) و (u_x, u_y)، می‌تـوان $(O_x, O_y, \alpha, \theta)$ را بـه شرح زیر محاسبه نمود:



شکل ۹: بیضی دلخواه که در آن نقاط w و v کانون‌های بیضی و نقطه o موقعیت مرکزی بیضی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

در ادامه شروع به استخراج نیم طول محور جزئی β کرده که نقطه k یک نقطه دلخواه روی منحنی بیضی می‌باشد. ازآنجایی‌که نقاط w و v کانون بیضی می‌باشند؛ بنابراین مجموع طول‌های قطعه خط‌های $l_{k,w}$ و $l_{k,v}$ را می‌توان با رابطه (۵) برآورد نمود:

رابطه(۵) $$\sqrt{(k_y-w_y)^2+(k_x-w_x)^2}\;\&+\;\sqrt{(k_y-v_y)^2+(k_x-v_x)^2}\;\&=2\alpha$$

همچنین متغیرهای رابطه (۵) به‌صورت روابط (۶) تا (۹) تعریف می‌شوند:

رابطه(۶) $$w_x=o_x-\cos|\theta|\sqrt{\alpha^2-\beta^2}$$

رابطه(۷) $$w_y=o_y-\sin|\theta|\sqrt{\alpha^2-\beta^2}$$

رابطه(۸) $$v_x=o_x-\cos|\theta|\sqrt{\alpha^2-\beta^2}$$

رابطه(۹) $$v_y=o_y+\sin|\theta|\sqrt{\alpha^2-\beta^2}$$

بنابراین با توجه به یک نقطه دلخواه روی منحنی بیضی، می‌توان مقدار β را با استفاده از روابط (۵) تا (۹) محاسبه نمود که به صورت روابط (۱۰) تا (۱۱) بیان می‌شود:

رابطه(۱۰) $$\beta=\sqrt{\frac{\alpha^2\delta^2-\alpha^2\gamma^2}{\alpha^2-\gamma^2}}$$

رابطه(۱۱) $$\delta=\sqrt{(k_y-o_y)^2+(k_x-o_x)^2}$$

رابطه(۱۲) $$\gamma=\sin|\theta|(k_y-o_y)+\cos|\theta|(k_x-o_x)$$

روابط (۱) تا (۱۲) چارچوب اساسی الگوریتم تشخیص بیضی را فراهم می‌کنند. ابتدا هر جفت پیکسل لبه به‌عنوان نقاط انتهایی احتمالی محور اصلی بیضی فرضی در نظر گرفته می‌شوند. سپس با استفاده از روابط (۱) تا (۴)، می‌توان مقادیر $(O_x, O_y, \alpha, \theta)$ بیضی فرضی را محاسبه نمود. در ادامه از تمام پیکسل‌های لبه دیگر، برای رأی دادن به نصف طول محور فرعی β این بیضی فرضی استفاده خواهد شد.

اگرچه می‌توان از حداکثر محلی انباشتگر[1] برای تعیین نیمه‌های احتمالی محور فرعی استفاده کرد، اما در اینجا تصحیحی ارائه شده است که بتواند تعداد پیکسل‌های لبه را که به بیضی فرضی رأی می‌دهند با تعداد پیکسل‌های لبه که برای تعریف بیضی کامل لازم است بهتر ادغام کند. برای هر بیضی فرضی، از مقادیر محاسبه‌شده α و β برای محاسبه محیط بیضی استفاده می‌شود[۷۰]. اگر تعداد پیکسل‌های لبه‌ای رأی دهنده به بیضی بیشتر از $RelativeVotemin \times Circumference$ باشند با در نظر گرفتن شرط $0 < RelativeVotemin \leq 1$ یک بیضی شناسایی می‌شود. برای این منظور، تنظیم $RelativeVotemin = 1$ تنها در صورتی می‌تواند بیضی را تشخیص دهد که تمام نقاط کانونی بیضی پیدا شود.

۳-۴- مدل ریاضی کالیبراسیون هندسی

در این تحقیق جهت محاسبه پارامترهای توجیه داخلی، خارجی و اعوجاجات عدسی، سنجنده حرارتی غیر متریک از معادلات شرط هم خطی بیان شده توسط معادلات (۱۳) و (۱۴) استفاده شده است. با استفاده از معادلات شرط هم خطی ارتباط بین فضا ۲ بعدی و ۳ بعدی را برقرار و پارامترهای کالیبراسیون هندسی برآورد می‌شوند.

در روابط (۱۳) و (۱۴) به ترتیب متغیرهای c بیانگر فاصله کانونی، x_a و y_a مختصات تصویری، x_p و y_p مختصات نقطه اصلی، $X_.,Y_.,Z_.$ بیانگر مختصات مرکز عدسی، X,Y,Z بیانگر مختصات فضا شی‌ای و r المان‌های ماتریس دوران[2] می‌باشند. همچنین پارامترهای اعوجاج عدسی با استفاده از معادلات برون[3] و به‌صورت تکراری با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌گردند[۷۱]. در روابط (۱۵) و (۱۶) به ترتیب متغیرهای x', y' مختصات تصویری تصحیح‌شده، k ضرایب اعوجاج شعاعی، p ضرایب اعوجاج خروج از مرکزیت عدسی و r فاصله شعاعی از تصویر نقطه پرسپکتیو[4] بر روی صفحه تصویر می‌باشند.

[1] *local maxima of the accumulato*

[2] *Elements of rotation matrix*

[3] *Brown*

[4] *Perspective point*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

$$x_a = x_p - c\frac{r_{11}(X_A - X_O) + r_{21}(Y_A - Y_O) + r_{31}(Z_A - Z_O)}{r_{13}(X_A - X_O) + r_{23}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)}$$ رابطه(۱۳)

$$y_a = y_p - c\frac{r_{12}(X_A - X_O) + r_{22}(Y_A - Y_O) + r_{32}(Z_A - Z_O)}{r_{13}(X_A - X_O) + r_{23}(Y_A - Y_O) + r_{33}(Z_A - Z_O)}$$ رابطه(۱۴)

$$x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + p_2(r^2 + 2x^2) + 2p_1 xy)$$ رابطه(۱۵)

$$y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy)$$ رابطه(۱۶)

۴- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی جهت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک از معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر و همچنین مقایسه کمینه و بهینه بودن مقادیر اندازه و میانگین انحراف معیار هریک از پارامترهای کالیبراسیون روش پیشنهادی با روش معادله مقاطع مخروطی و مقادیر اولیه سنجنده حرارتی به‌عنوان مرجع استفاده شده است. معیار میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر نشان دهنده میانگین خطا در صفحه تصویر، بین مختصات تصویری واقعی تارگت‌ها روی الگو کالیبراسیون و مختصات واقعی تارگت در فضا زمینی با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون است. این مقدار مستقیماً با مختصات تصویری تارگت مرتبط می‌باشد؛ زیرا مقداری است که در طول بهینه‌سازی به حداقل می‌رسد[۵۷].

۴-۱- مشخصات فنی سنجنده حرارتی غیر متریک

در این تحقیق کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک مدل *KEII MC*۱-۶۴۰*s* مورد بررسی قرار می‌گیرد. در جدول (۱) مشخصات فنی سنجنده حرارتی ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات فنی سنجنده حرارتی

	پارامترها	مقادیر
	فاصله کانونی	۲۵ میلی‌متر
	ابعاد تصویر	۶۴۰×۴۸۰
	ابعاد حس‌گر	۱۷ میکرومتر
	حساسیت حرارتی	۳۰-۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد

۴-۲- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش به‌منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی مراحل طراحی و ساخت الگو کالیبراسیون، طراحی شبکه و تصویربرداری از الگو کالیبراسیون و همچنین برازش و استخراج مرکز کانونی تارگت‌ها بیضی گونه بررسی می‌شوند که به شریح ذیل می‌باشد.

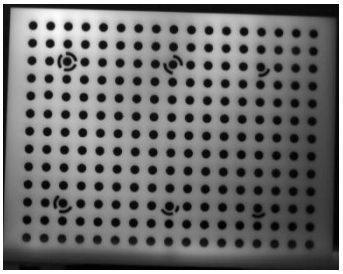
۴-۲-۱- طراحی و ساخت الگو کالیبراسیون

با توجه به بررسی مطالعات پیشین در زمینه الگوهای کالیبراسیون از دیدگاه صرف زمان و هزینه، منبع انرژی حرارتی به‌منظور توزیع یکنواخت حرارت و همچنین حفظ گرما بیشتر در صفحه الگو کالیبراسیون و استخراج مختصات دو بعدی دقیق و کاهش خطا

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

تشخیص تارگت‌ها در این تحقیق از الگو کالیبراسیون دارای تارگت‌های دایره‌ای و منبع انرژی غیرفعال استفاده شده است.

در شکل (۱۰) نمایی از الگو کالیبراسیون مورد استفاده در تحقیق نمایش داده شده است.



شکل ۱۰: الگو کالیبراسیون مورد استفاده تحقیق

الگو کالیبراسیون ارائه شده در شکل (۱۰) یک صفحه مستطیل شکل با دایره‌های توخالی می‌باشد. هندسه قرارگیری به‌صورت متقارن و تعداد ۱۷×۱۳ دایره با قطر ۱۲ میلی‌متر در کنار یکدیگر قرارگرفته‌اند. فواصل بین مراکز دایره‌ها ۲۴ میلی‌متر است. شش مورد از دایره‌ها به‌عنوان تارگت کدگذاری[1] جهت تعیین توجیه و موقعیت تارگت‌ها در تصاویر مختلف در الگو کالیبراسیون در نظر گرفته شده است. وجود دایره‌های توخالی موجب ایجاد اختلاف دمایی و در نهایت ایجاد تضاد و وضوح در صفحه الگو کالیبراسیون حرارتی می‌گردد؛ بنابراین این امر موجب افزایش دقت و کیفیت استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی تارگت‌های دایره‌ای در فضا دوبعدی تصویر می‌گردد. علاوه بر این جهت آشکار ساختن تارگت‌های دایره‌ای و ایجاد وضوح بالا در تصاویر حرارتی به الگو کالیبراسیون توسط یک منبع غیرفعال (رادیاتور گرمایشی)، حرارت اعمال می‌شود.

۴-۲-۲- طراحی شبکه و تصویربرداری از الگو کالیبراسیون

در این تحقیق به‌منظور پوشش تمام محدوده تارگت‌ها، ۹ ایستگاه تصویربرداری جهت اخذ تصاویر از الگو کالیبراسیون طراحی شده است. تصاویر از سه زاویه مختلف (۰، ۶۰ و ۶۰- درجه) نسبت به موقعیت قرارگیری الگو کالیبراسیون اخذ شده‌اند. علاوه بر این از جهات رو به رو، بالا و پایین الگو نیز تصاویر اخذ می‌شوند. در این راستا در هر ایستگاه علاوه بر تصویربرداری با حالت معمول به‌منظور عدم وابستگی پارامترهای کالیبراسیون، سنجنده حرارتی را ۹۰ درجه حول محور دوران داده و تصویربرداری تکرار شده است.

۴-۲-۳- برازش و استخراج مرکز کانونی تارگت‌ها بیضی گونه

با توجه به قدرت تفکیک مکانی پایین و اعوجاجات عدسی سنجنده‌های حرارتی در تصاویر اخذ شده از الگو کالیبراسیون، دایره‌ها به‌صورت بیضی تصویر می‌گردند؛ بنابراین جهت برازش و استخراج مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه در این تحقیق از روش برازش و استخراج بیضی با استفاده از تبدیل هاف استفاده شده است.

با در نظر گرفتن وجود نویز در تصاویر حرارتی انجام پیش‌پردازش جهت کاهش نویز موجود در تصاویر حرارتی امری ضروری می‌باشد. در این راستا با توجه به اینکه استخراج لبه‌ها با استفاده از الگوریتم تشخیص لبه *Canny* جهت معرفی به الگوریتم برازش و استخراج بیضی یکی از مراحل اصلی الگوریتم تبدیل هاف است. لذا به‌منظور کاهش نویز و حفظ لبه‌های موجود در الگو از فیلتر بایلترال استفاده شده است.

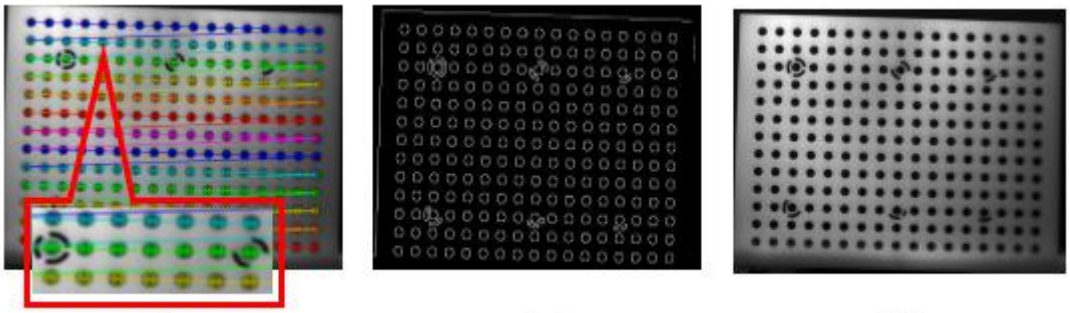
سرانجام پس از برازش و استخراج مختصات دو بعدی

[1] *Coded target*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

دقیق مرکز کانونی تارگت‌ها با استفاده از مـدل ریاضـی کالیبراسـیون هندسـی پارامترهـای توجیـه داخلـی و اعوجاجات عدسی سنجنده حرارتی غیر متریک بـرآورد مـی‌شـوند. در شـکل (۱۱) نتـایج اعمـال مراحـل پیش‌پردازش و برازش و استخراج مرکز کانونی تارگـت-های بیضی گونه از الگو با استفاده از تبدیل هاف جهـت انجـام کالیبراسـیون هندسـی سـنجنده حرارتـی غیـر متریک بـا اسـتفاده از تبـدیل هـاف نمـایش داده شـده است.

در شکل (۱۱-الف) اعمال فیلتر بایلترال جهت کـاهش نویز و حفظ لبه‌ها، (۱۱-ب) اعمال اپراتور تشخیص لبـه کنی جهت استخراج لبه تارگت‌هـا و معرفـی بـه‌عنـوان ورودی به الگوریتم برازش و استخراج بیضی و در شـکل (۱۱-پ) برازش و استخراج مختصـات دو بعـدی مرکـز کانونی تارگت‌های بیضی گونه نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: نمایش نتایج مراحل روش پیشنهادی جهت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی: الف) اعمال فیلتر بایلترال ب) اعمال اپراتور تشخیص لبه، (پ) استخراج بیضی و مرکز کانونی تارگت‌ها با استفاده از تبدیل هاف

۴-۳- بحث و بررسی

بـه‌منظـور تخمـین پارامترهـای کالیبراسـیون هندسـی سنجنده حرارتی پس از اسـتخراج مختصـات دو بعـدی دقیق مرکز کانونی تارگت‌ها و محاسبه مختصات واقعـی نظیر آن‌ها در فضـا زمینـی ایـن داده‌هـا وارد معـادلات شـرط هـم خطـی شـده و پارامترهـای کالیبراسـیون هندسی سنجنده حرارتی برآورد می‌گردند. اندازه عددی و میانگین انحراف معیـار هریـک از پارامترهـای توجیـه داخلـی و اعوجاجـات عدسـی بـرآورد شـده سـنجنده حرارتی با اسـتفاده از روش پیشـنهادی و روش معادلـه مقاطع مخروطی در جدول (۲) ارائه شده است.

در جدول (۲)، مقادیر اندازه و میـانگین انحـراف معیـار هریک از پارامترهای کالیبراسیون برای ۱۳ تصویر اخـذ شده از الگـو بـا اسـتفاده از روش پیشـنهادی و معادلـه مقـاطع مخروطـی ارائـه شـده اسـت. در جـدول (۲) پارامترهای F_x و F_y به ترتیب بیـانگر فاصـله کـانونی در راستای محورهای x و y، پارامترهای C_x و C_y مختصـات نقطـه اصـلی، پارامترهـای K_1، K_2 و K_3 اعوجاجـات شعاعی عدسی و پارامترهای P_1 و P_2 اعوجاج خـروج از مرکزیت عدسی سـنجنده حرارتـی غیـر متریـک مـورد استفاده در این تحقیق می‌باشند.

در جدول (۲) نتـایج بـرآورد پارامترهـای کالیبراسـیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک بـا اسـتفاده روش پیشنهادی و روش معادله مقاطع مخروطـی ارائـه شـده است. مقادیر بهینه روش پیشنهادی بـا قلـم ضـخیم در جـدول (۲) نمـایش داده شـده اسـت. پارامترهـای کالیبراسیون برآورد شده علاوه بر مقایسه کمینه بـودن مقادیر میانگین انحراف معیار از دیدگاه بهینه بودن نیـز با یکدیگر و مقـادیر اولیـه سـنجنده حرارتـی بـه‌عنـوان مرجع مقایسه می‌شوند؛ بنابراین کمینه مقدار میـانگین انحراف معیار و مقادیر اندازه نزدیک‌تر نسبت به مقـادیر اولیه پارامترهای کالیبراسـیون ارائـه شـده در کاتـالوگ

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

سنجنده حرارتی، بیانگر تخمین دقیق‌تر پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک می‌باشد. در نتیجه با توجه به نتایج جدول (۲)، روش پیشنهادی تحقیق با به‌کارگیری الگوریتم تبدیل هاف جهت برازش و استخراج مرکز تارگت‌های بیضی گونه به‌منظور تخمین پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش معادله مقاطع مخروطی ارائه داده است.

جدول ۲: پارامترهای توجیه داخلی و اعوجاجات عدسی سنجنده حرارتی

پارامتر	مقادیر اولیه (میلی‌متر)	روش پیشنهادی		روش معادله مقاطع مخروطی	
		اندازه (پیکسل)	انحراف معیار (پیکسل)	اندازه (پیکسل)	انحراف معیار (پیکسل)
F_x	۲۵٫۰۰	**۱۵۰۸٫۶۷**	**۸۹٫۸۶**	۱۵۲۸٫۳۷	۹۱٫۱۱
F_y	۰۰٫۰۰	۱۵۱۱٫۰۱	۹۰٫۴۴	۱۵۴۵٫۲۲	۹۲٫۳۶
C_x	۰۰٫۰۰	۳۴٫۰۲۳	۲۷٫۳۹	۲۹۸٫۶۲	۱۴۵٫۱۲
C_y	۰۰٫۰۰	۱۹٫۹۵	۲۳٫۸۸	۲۶۶٫۷۰	۱۲۵٫۲۸
K_1	۰۰٫۰۰	-۰٫۱۳	۰٫۱۴	-۰٫۲۸	۰٫۱۹
K_2	۰۰٫۰۰	۱٫۱۵	۵٫۱۰	۳٫۱۱	۶٫۷۳
K_3	۰۰٫۰۰	-۲۹٫۸۸	۵۱٫۴۸	-۳۹٫۰۵	۵۸٫۴۵
P_1	۰۰٫۰۰	-۰٫۰۰۱	$۵٫۷۹e$-۰۳	۰٫۰۰۳	$۷٫۲۵e$-۰۳
P_2	۰۰٫۰۰	۰٫۰۰۴	$۳٫۲۴e$-۰۳	۰٫۰۰۵	$۴٫۱۲e$-۰۳

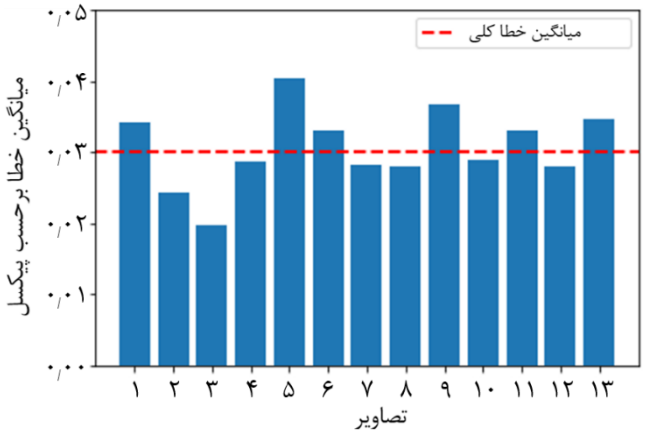
در ادامه به‌منظور ارزیابی دقت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی از معیار میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر استفاده شده است. در شکل (۱۲) و (۱۳) نتایج معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر برای روش پیشنهادی و معادله مقاطع مخروطی نمایش داده شده است.

در شکل (۱۲) نتایج ارزیابی معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر برای روش پیشنهادی، بر اساس ۱۳ تصویر و ۲۲۱ تارگت برابر با مقدار عددی ۰٫۰۳ پیکسل برآورد شده است.

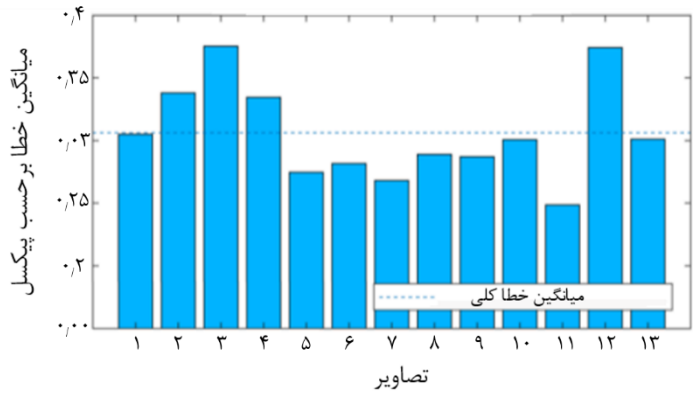
در شکل (۱۳) نتایج ارزیابی معیار میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر برای روش معادله مقاطع مخروطی، بر اساس ۱۳ تصویر اخذ شده از الگو کالیبراسیون و ۲۲۱ تارگت برابر با مقدار عددی ۰٫۳۱ پیکسل برآورد شده است.

در شکل (۱۲) و (۱۳) محور افقی نشان‌دهنده تعداد تصاویر و محور عمودی بیانگر معیار خطا نگاشت مجدد در هر تصویر بر حسب پیکسل برای روش‌های پیشنهادی و معادله مقاطع مخروطی می‌باشد. در این راستا بازه مقادیر محور عمودی برای روش پیشنهادی بین صفر تا ۰٫۰۵ و روش معادله مقاطع مخروطی بین صفر تا ۰٫۴ پیکسل را نمایش می‌دهند. بر این اساس نتایج حاکی از عملکرد مطلوب معیار خطا نگاشت مجدد برای همه تصاویر روش پیشنهادی نسبت به روش معادله مقاطع مخروطی می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]



شکل ۱۲: معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر روش پیشنهادی



شکل ۱۳: معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر روش معادله مقاطع مخروطی

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی و روش معمول معادله مقاطع مخروطی جهت برازش و استخراج مختصات دو بعدی تارگت‌های بیضی‌گونه جهت کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیرمتریک از دو معیار ارزیابی میانگین انحراف معیار هریک از پارامترهای کالیبراسیون و میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر استفاده شده است.

بر اساس مقایسه کمینه و بهینه بودن مقادیر اندازه و میانگین انحراف معیار هریک از پارامترهای کالیبراسیون برآورد شده روش پیشنهادی و روش معادله مقاطع مخروطی و همچنین مقایسه مقادیر هر یک از روش‌های فوق با مقادیر اولیه سنجنده حرارتی به‌عنوان مرجع بیان می‌شود که روش پیشنهادی با شناسایی کامل تارگت‌های موجود (۲۲۱ تارگت) در الگوی کالیبراسیون موجب بهبود و افزایش دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک شده است. همچنین بر اساس مقایسه مقادیر معیار ارزیابی میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۳۱ پیکسل برای روش‌های پیشنهادی و روش معادله مقاطع مخروطی، نتایج حاکی از بهبود میانگین خطا نگاشت مجدد مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه به صفحه الگو کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون هندسی تخمینی روش پیشنهادی به مقدار ۰/۲۸ پیکسل بین مختصات تصویری واقعی تارگت‌ها روی الگو کالیبراسیون و مختصات واقعی تارگت در فضا زمینی می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک رویکرد نوین جهت برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق مرکز کانونی تارگت-های بیضی گونه به‌منظور انجام کالیبراسیون هندسی سنجنده‌های حرارتی غیر متریک ارائه شده است. با توجه به اهمیت کالیبراسیون هندسی سنجنده در تولید محصولات فتوگرامتری از جمله ابرنقاط سه‌بعدی متراکم و مدل سه‌بعدی با دقت هندسی بالا، این مرحله به‌عنوان یک مرحله پیش پردازش ضروری به‌حساب می‌آید.

با توجه به نتایج مطالعات جاویدی [۳۴] و آرفته [۳۷]، روش معمول معادله مقاطع مخروطی به‌موجب محدودیت‌های سنجنده حرارتی (قدرت تفکیک مکانی و وضوح پایین، وجود نویز و ...) موفق به برازش و حفظ حداکثر تارگت‌ها نیست؛ بنابراین با کاهش تعداد تارگت‌ها دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی کاهش پیدا خواهد کرد. لذا در این تحقیق جهت برازش و استخراج مختصات دو بعدی دقیق و همچنین حفظ حداکثر تارگت‌های بیضی گونه از الگوریتم تبدیل هاف استفاده شده است.

مزیت اصلی الگوریتم تبدیل هاف در برازش و استخراج مختصات مرکز کانونی بیضی، روباست[1] بودن آن در برابر نقاط ناپیوسته و استخراج نشده از تصاویر است. به‌عبارت‌دیگر جهت برازش و استخراج مرکز کانونی بیضی از پارامترهای کانون بیضی استفاده می‌گردد و نیاز به استخراج کامل خطوط محیطی بیضی نیست. همچنین اجتناب از محاسبه گرادیان‌ها و خطوط مماس بر پیکسل‌های لبه الگوریتم تبدیل هاف موجب برازش و حفظ حداکثر تارگت‌ها در تصاویر دارای نویز می‌شود. یکی دیگر از جنبه‌های متمایز روش پیشنهادی که موجب افزایش روباست بودن الگوریتم در تصاویر نویزی می‌گردد؛ اجتناب از محاسبه گرادیان‌ها و خطوط مماس بر پیکسل‌های لبه می‌باشد. لذا تا حد امکان موجب برازش و حفظ حداکثر تارگت‌ها می‌شود. نتایج بصری برازش بیضی با استفاده از تبدیل هاف در زاویه‌های مختلف تصویربرداری از الگو کالیبراسیون در شکل(۱۴) ارائه شده است.

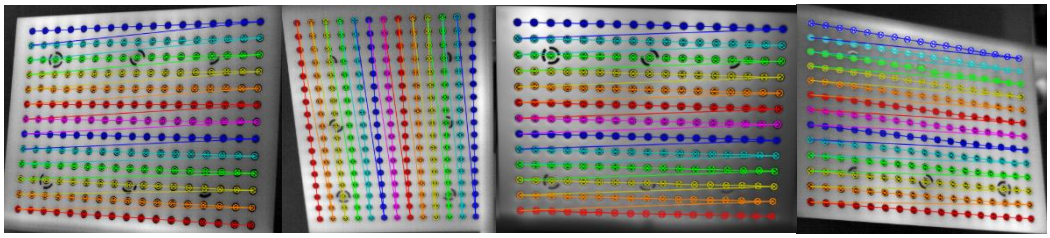
در این تحقیق به‌منظور ارزیابی دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی از دو معیار ارزیابی میانگین انحراف معیار هریک از پارامترهای کالیبراسیون و میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر استفاده شده است. در این راستا بر اساس مقایسه مقادیر اندازه و میانگین انحراف معیار روش پیشنهادی با روش معادله مقاطع مخروطی و همچنین مقایسه مقادیر هر یک از روش‌های فوق با مقادیر اولیه سنجنده حرارتی به‌عنوان مرجع، روش پیشنهادی تحقیق موجب افزایش و بهبود دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی مدل *KEII* *MC*۱-۶۴۰*s* می‌شود.

در این راستا بر اساس میانگین خطا نگاشت مجدد در هر تصویر، روش پیشنهادی تحقیق جهت نگاشت مجدد مرکز کانونی تارگت‌های بیضی گونه به صفحه الگو کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای کالیبراسیون هندسی برآورد شده، میانگین خطا بین مختصات تصویری واقعی تارگت‌ها روی الگو کالیبراسیون و مختصات واقعی تارگت در فضا زمینی را به مقدار ۰٫۲۸ پیکسل نسب به روش معادله مقاطع مخروطی بهبود بخشیده است.

همچنین با استفاده از تصاویر اخذ شده با سنجنده حرارتی غیر متریک یکسان و الگو کالیبراسیون دایره‌ای مشابه، روش پیشنهادی با توجه به حجم محاسبات بیشتر الگوریتم تبدیل هاف، زمان بیشتری را نسبت به روش معادله مقاطع مخروطی به‌منظور برازش و استخراج مختصات مرکز کانونی بیضی و برآورد پارامترهای کالیبراسیون هندسی سنجنده حرارتی غیر متریک هزینه می‌کند.

[1] *Robustness*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]



شکل ۱۴: نمایش برازش و استخراج مرکز کانونی بیضی‌ها با استفاده از الگوریتم تبدیل هاف در زاویه‌های مختلف تصویربرداری

علاوه بر این با توجه به ارزیابی نتـایج روش پیشـنهادی ایـن پـژوهش در مقایسـه بـا روش آرفتـه و همکـاران (۲۰۱۷) که از سنجنده مدل *KEII MC۱-۶۴۰s* و الگـو کالیبراسـیون دایـره‌ای اسـتفاده کـرده اسـت؛ روش پیشـنهادی موجـب افـزایش دقـت و بهبـود بـرآورد پارامترهای توجیه داخلی و اعوجاجات عدسی سـنجنده حرارتی به میزان ۰/۴۴ پیکسل بر اساس معیار میانگین خطا نگاشت مجدد شده است[۳۷].

در این راسـتا بـه‌منظـور بررسـی‌هـای بیشـتر در مـورد کالیبراسـیون هندسـی سـنجنده حرارتـی غیرمتریـک، بررسی وابستگی آماری بین پارامترهای توجیه داخلی و همچنین تأثیر پارامترهای کالیبراسیون هندسی برآورده شده روش پیشنهادی بـر روی دقـت مـدل سـه بعـدی تولید شده به‌عنـوان پیشـنهاد آتـی ایـن تحقیـق ارائـه می‌گردد. در این راستا جهت رفع محدودیت‌هـای مـؤثر سنجنده‌های حرارتی از جمله قـدرت تفکیـک مکـانی و وضـوح پـایین روی کالیبراسـیون هندسـی، اسـتفاده از روش‌های بهبود وضوح تصاویر حرارتی به‌منظور افزایش دقت تخمین پارامترهای کالیبراسیون هندسی از جملـه پیشـنهاد آتـی دیگـر ایـن تحقیـق مـی‌باشـد.

مراجع

[1] *Rakha. T, Liberty. A, Gorodetsky. A, Kakillioglu. B, and Velipasalar. S, "Heat Mapping Drones: An Autonomous Computer-Vision-Based Procedure for Building Envelope Inspection Using Unmanned Aerial Systems (UAS)". Technology|Architecture + Design, 2(1): pp. 30-44, 2018.*

[2] *Edelman, G.J. and M.C. Aalders, "Photogrammetry using visible, infrared, hyperspectral and thermal imaging of crime scenes". Forensic Science International, 292: pp. 181-189, 2018.*

[3] *Adamopoulos, E. and F. Rinaudo, "Enhancing Image-Based Multiscale Heritage Recording with Near-Infrared Data". ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(4), 2020.*

[4] *Conte, P, V.A. Girelli, and E. Mandanici, "Structure from Motion for aerial thermal imagery at city scale: Pre-processing, camera calibration, accuracy assessment". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146: pp. 320-333, 2018.*

[5] *Wierzbicki. D, Fryskowska. A, Kedzierski. M, Wojtkowska. M, and Delis, "Method of radiometric quality assessment of NIR images acquired with a custom sensor mounted on an unmanned aerial vehicle". Journal of Applied Remote Sensing, 12(1): pp. 015008. 2018.*

[6] *Fraser. C.S, and Brown. D.C, "INDUSTRIAL PHOTOGRAMMETRY: NEW DEVELOPMENTS AND RECENT APPLICATIONS". The Photogrammetric Record, 12(68): pp. 197-217, 1986.*

[7] *Clarke. T.A, and J.G. Fryer, "The Development of Camera Calibration Methods and Models". The*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

Photogrammetric Record, 16(91): pp. 51-66, 1998.

[8] Sun. Q, Wang. X, Xu. J, Wang. L, Zhang. H, Yu. J, and Zhang. X, "Camera self-calibration with lens distortion". Optik, 127(10): pp. 4506-4513, 2016.

[9] Fraser. C.S, "Automatic camera calibration in close range photogrammetry". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 79(4): pp. 381-388, 2013.

[10] Wang. J, Shi. F, Zhang. J, and Liu. Y, "A new calibration model of camera lens distortion". Pattern recognition, 41(2): pp. 607-615, 2008.

[11] Sun. X, and J. Duan, "Design of multi-parameter target used in calibration of high precision CCD camera". Optik, 127(2): pp. 548-552, 2016.

[12] Wolf. P.R, Elements of photogrammetry; with air photointerpretation and remote sensing. 1983.

[13] Li, X, Photogrammetric investigation into low-resolution digital camera systems. 1999.

[14] Kannala. J, J. Heikkilä, and S.S. Brandt, "Geometric camera calibration". Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, 13(6): pp. 1-20, 2008.

[15] Lagüela. S, González-Jorge. H, Armesto. J, and Arias. P, "Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements". Infrared Physics & Technology, 54(2): pp. 92-99, 2011.

[16] Budzier. H, and G. Gerlach, "Calibration of uncooled thermal infrared cameras". J. Sens. Sens. Syst, 4(1): pp. 187-197, 2015.

[17] Lane. B, and E. Whitenton, "Calibration and Measurement Procedures for a High Magnification Thermal Camera". 2016.

[18] Lin, D, Maas. H-G, Westfeld. P, Budzier. H, and Gerlach. G, "An advanced radiometric calibration approach for uncooled thermal cameras". The Photogrammetric Record, 33(161): pp. 30-48, 2018.

[19] Ribeiro-Gomes. K, Hernández-López. D, Ortega. J. F, Ballesteros. R, Poblete. T, & Moreno. M. A, "Uncooled Thermal Camera Calibration and Optimization of the Photogrammetry Process for UAV Applications in Agriculture". Sensors, 17(10), 2017.

[20] Kelly. J, Kljun. N, Olsson, P-O, Mihai. L, Liljeblad. B, Weslien. P, and Eklundh. L, "Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera". Remote Sensing, 11(5): pp. 567, 2019.

[21] Moffitt. F.H, and E.M. Mikhail, Photogrammetry, New York: Harper [and] Row, 1980.

[22] Kannala. J, J. Heikkilä, and S.S. Brandt, "Geometric Camera Calibration". Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering, pp. 1-11, 2008.

[23] Nex. F, and F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: a review". Applied geomatics, 6(1): pp. 1-15, 2014.

[24] Rangel. J, S. Soldan, and A. Kroll, "3D thermal imaging: Fusion of thermography and depth cameras". In International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. 2014.

[25] Usamentiaga. R, Garcia. D. F, Ibarra-Castanedo. C, & Maldague. X, "Highly accurate geometric calibration for infrared cameras using inexpensive calibration targets". Measurement, 112: pp. 105-116, 2017.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

[26] Rzeszotarski. D, and B. Wiecek, "Calibration for 3D reconstruction of thermal images". In Proceedings of 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). 2008. Citeseer.

[27] He. X, Zhang. H, Hur. N, Kim. J, Wu. Q, and Kim. T, "Estimation of Internal and External Parameters for Camera Calibration Using 1D Pattern". In 2006 IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance. 2006.

[28] Vidas. S, Lakemond. R, Denman. S, Fookes. C, Sridharan. S, and Wark. T, "A Mask-Based Approach for the Geometric Calibration of Thermal-Infrared Cameras". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61(6): p. 1625-1635, 2012.

[29] Luhmann. T, Robson. S, Kyle. S, and Harley. I, Close range photogrammetry. Whittles, Caithness, 2006.

[30] Schramm. S, Rangel. J, Salazar. D. A, Schmoll. R, and Kroll. A, "Target analysis for the multispectral geometric calibration of cameras in visual and infrared spectral range". IEEE Sensors Journal, 21(2): pp. 2159-2168, 2020.

[31] Harris. C.G, and M. Stephens, "A combined corner and edge detector". in Alvey vision conference. Citeseer, 1988.

[32] Yujing. Q, T. Yanchao, and L. Junshi, "Improved Harris sub-pixel corner detection algorithm for chessboard image". in Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013.

[33] Datta. A, J. Kim, and T. Kanade, "Accurate camera calibration using iterative refinement of control points". in 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops. 2009.

[34] Javidi, N, F. Samadzagegan, and F. Dadras Javan, "Assessing the Ability of Calibration Methods in Geometric Correction of Airborne Thermal Cameras", in National Geomatics Conference, 2017. (Persian)

[35] Ouellet. J-N, and P. Hébert, "Precise ellipse estimation without contour point extraction". Machine Vision and Applications, 21(1): pp. 59-67, 2009.

[36] Rosin. P.L, "A note on the least squares fitting of ellipses". Pattern Recognition Letters, 14(10): pp. 799-808, 1993.

[37] Zollner. H, and R. Sablatnig, "Comparison of methods for geometric camera calibration using planar calibration targets", 2004.

[38] Arofteh, F. Samadzagegan, and F. Dadras Javan. "Provide an efficient method for geometric calibration of thermal cameras". in National Geomatics Conference, Available from: https://www.sid.ir/fa/seminar/ViewPaper.aspx?ID=89937, 2017. (Persian)

[39] Chia. A. Y. S, Leung. M. K. H, Eng. H, and Rahardja. S, "Ellipse Detection with Hough Transform in One Dimensional Parametric Space". in 2007 IEEE International Conference on Image Processing, 2007.

[40] Saponaro. P, Sorensen. S, Rhein. S, and Kambhamettu. C, "Improving calibration of thermal stereo cameras using heated calibration board". in 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2015.

[41] Mohd. M. N, Kashima. M, Sato. K, and Watanabe. M, "Effective geometric calibration and facial feature extraction

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

using multi sensors". International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), 1(2): pp. 170-178, 2012.

[42] Javadnejad. F, Gillins. D. T, Parrish. C. E, and Slocum. R. K, "A photogrammetric approach to fusing natural colour and thermal infrared UAS imagery in 3D point cloud generation". International Journal of Remote Sensing, 41(1): pp. 211-237, 2020.

[43] Shivakumar. S. S, Rodrigues. N, Zhou. A, Miller. I. D, Kumar. V, and Taylor. C. J, Pst900: "Rgb-thermal calibration, dataset and segmentation network". in 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020.

[44] Song. L. M, Wang. M. P, Lu. L, and Jing Huan. H, "High precision camera calibration in vision measurement. Optics & Laser Technology", 39(7): pp. 1413-1420, 2007.

[45] Yang. R, Yang. W, Chen. Y, and Wu. X, "Geometric Calibration of IR Camera Using Trinocular Vision". Journal of Lightwave Technology, 29(24): pp. 3797-3803,2011.

[46] Ellmauthaler. A, Silva. E. A. B. d, Pagliari. C. L, Gois. J. N, and Neves. S. R, "A novel iterative calibration approach for thermal infrared cameras". in 2013 IEEE International Conference on Image Processing. 2013.

[47] Lagüela. S, González-Jorge. H, Armesto. J, and Herráez. J, "High performance grid for the metric calibration of thermographic cameras". Measurement Science and Technology, 23(1): pp. 015402, 2011.

[48] Luhmann. T, J. Piechel, and T. Roelfs, "Geometric calibration of thermographic cameras, in Thermal Infrared Remote Sensing", Springer, pp. 27-42, 2013.

[49] Helgesen. H. H, Leira. F. S, Bryne. T. H, Albrektsen. S. M, and Johansen. T. A, "Real-time georeferencing of thermal images using small fixed-wing UAVs in maritime environments". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 154: pp. 84-97,2019.

[50] Bradski. G, and A. Kaehler, Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library: " O'Reilly Media, Inc.", 2008.

[51] Xicai. L, W. Qinqin, and W. Yuanqing, "Binocular vision calibration method for a long-wavelength infrared camera and a visible spectrum camera with different resolutions". Optics Express, 29(3): pp. 3855-3872, 2021.

[52] Zhang. Z, "A flexible new technique for camera calibration". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11): pp. 1330-1334, 2000.

[53] González-Pérez. S, Perea Ström. D, Arteaga-Marrero. N, Luque. C, Sidrach-Cardona. I, Villa. E, and Ruiz-Alzola, J, "Assessment of registration methods for thermal infrared and visible images for diabetic foot monitoring". Sensors, 21(7): pp. 2264, 2021.

[54] Kang. L, and D. Liu, "Diameter Detection of Silicon Single Crystal Based on Brain Storm Optimization Algorithm Hough Transform". In 2019 Chinese Control Conference (CCC). 2019.

[55] Xia. R, Zhao. J, Zhang. T, Su. R, Chen. Y, and Fu. S, "Detection method of manufacturing defects on aircraft surface based on fringe projection". Optik, 208: pp. 164332, 2020.

[56] Huang. Y.P, T.H. Wang, and H. Basanta, "Using Fuzzy Mask R-CNN Model to Automatically Identify Tomato Ripeness". IEEE Access, 8: pp. 207672-207682, 2020.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

[57] Poulin-Girard. A-S, S. Thibault, and D. Laurendeau, "Influence of camera calibration conditions on the accuracy of 3D reconstruction". Optics Express, 24(3): p. 2678-2686, 2016.

[58] Tomasi. C, and R. Manduchi, "Bilateral filtering for gray and color images". In Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271). 1998.

[59] Paris. S, Kornprobst. P, Tumblin. J, and Durand. F, Bilateral filtering: Theory and applications. Now Publishers Inc, 2009.

[60] Canny. J, "A computational approach to edge detection". IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (6): pp. 679-698, 1986.

[61] Gonzalez. R, R. Woods, and S. Eddins, Digital Image Processing Using Matlab, 1st Indian Reprint, Pearson Education, 2004.

[62] Solomon. C, and T. Breckon, Fundamentals of Digital Image Processing: A practical approach with examples in Matlab: John Wiley & Sons, 2011.

[63] Davies, E.R, Machine vision: theory, algorithms, practicalities: Elsevier, 2004.

[64] Tsuji and Matsumoto, "Detection of Ellipses by a Modified Hough Transformation". IEEE Transactions on Computers, C-27(8): pp. 777-781, 1978.

[65] Guil. N, and E.L. Zapata, "Lower order circle and ellipse Hough transform". Pattern Recognition, 30(10): pp. 1729-1744, 1997.

[66] Xu. L, E. Oja, and P. Kultanen, "A new curve detection method: Randomized Hough transform (RHT)". Pattern Recognition Letters, 11(5): pp. 331-338, 1990.

[67] Chen. T-C, and K-L. Chung, "An Efficient Randomized Algorithm for Detecting Circles". Computer Vision and Image Understanding, 83(2): pp. 172-191, 2001.

[68] Chun-Ta. H, and C. Ling-Hwei, "A high-speed algorithm for elliptical object detection". IEEE Transactions on Image Processing, 5(3): pp. 547-550, 1996.

[69] Ho. C-T, and L-H. Chen, "A fast ellipse/circle detector using geometric symmetry". Pattern Recognition, 28(1): pp. 117-124, 1995.

[70]W,W.a.E.[CitedAccessedonJanuary2007];Availablefrom:http://mathworld.wolfram.com/Ellipse.html.

[71] Brown. D.C, "Close-range camera calibration", Photogrammetric Engineering. Engineering and Remote Sensing, 37(8): pp. 855-866, 1971.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.10, No.4, Winter 2023

Research Paper

Improved Geometric Calibration Method for Thermal Sensors Using the Hough Transform Algorithm

Soroush Motayeb [1], Farhad Samadzadegan[*2], Masood Varshosaz [3]

1- MSc at Dept. of Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Professor at Dept. of Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- Associate Professor at photogrammetry and remote sensing department, K.N.Toosi University of technology.

Abstract

Non-metric thermal sensors have been out of calibration in the laboratory for an extended period of time and require calibration to adjust for the interior orientation parameters and lens distortions. To generate photogrammetric products with the desired degree of geometric precision, it is important to identify the geometric calibration parameters of the non-metric sensor in order to minimize the relative orientation error and resolve the bundle adjustment. The purpose of this research is to present a novel method for geometric calibration of non-metric thermal sensors as a necessary preprocessing step before producing photogrammetric products with the desired geometric precision. To geometrically calibrate the non-metric thermal sensor, the proposed method employs a calibration pattern in the form of a rectangular plate composed of hollow circular targets with symmetrical placement geometry. Hollow circles induce temperature differences, improving the contrast and sharpness of the thermal calibration pattern. Due to the thermal sensors' low spatial resolution and low contrast, circular targets appear as an ellipse in the image. For this reason, in this study, the Hough Transform method is utilized to fit and extract the exact two-dimensional coordinates of the focal center of elliptical targets in the image space. The reason for this is that the Hough Transform employs the parameters of the ellipse to fit it and does not require the entire extraction of its circumferential lines. In the method utilized in this study, the Collinearity Equation is used to compute the geometric calibration elements of the thermal sensor. Various experiments were undertaken to evaluate the proposed approach. The results of these tests, which were performed based on the criterion of Mean Reprojection Error per Image, evaluated the accuracy of the geometric calibration as 0.03 pixels. Additionally, when the proposed method for re-projecting the target´s focal point to the calibration pattern is used in conjunction with the estimated calibration parameters, the mean error between the actual image coordinates and the actual ground coordinates of the targets is reduced to 0.28 pixels when compared to the method of the equation of conic sections.

Key words: *Interior Orientation, Geometric Calibration, Thermal Sensor, Hough Transform algorithm, Collinearity equation.*

Correspondence Address: *Dept. of Photogrammetry, School of Surveying and Geospatial Engineering, University College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel : *+98 88008841.*
Email*: samadz@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1401.10.4.3.3]
[DOI: 10.61186/jgit.10.4.39]