نشریه علمی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۶، شماره ۱، صفحه ۱ تا ۱۶، شهریور ماه ۱۴۰۵ – مقاله پژوهشی

توسعه رویکردی سه‌مرحله‌ای برای تشخیص و بازیابی اتوماتیک تست فیلد صفحه‌ای در کالیبراسیون دوربین-پروژکتور زاویه باز

علی ابذل*[۱]

[۱] استادیار گروه مهندسی ژئوماتیک، دانشکدهٔ مهندسی عمران و حمل‌ونقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان
a.abzal@cet.ut.ac.ir

(دریافت: آبان ۱۴۰۴، تصویب: مرداد ۱۴۰۵)

چکیده

کالیبراسیون دوربین‌های غیر متریک عموما توسط یک تست فیلد صفحه ای انجام می‌شود. در این تحقیق با هدف کالیبراسیون یک سامانه استریوی دوربین-پروژکتور یک تست فیلد صفحه ای طراحی شده است که امکان بازیابی فاز مرکز هر کدام از تارگت‌ها با بالاترین دقت ممکن فراهم باشد. این تست فیلد از تعدادی تارگت دایره‌ای سفیدرنگ در زمینه سیاه تشکیل شده است که بر روی یک صفحه چاپ شده است. سه تارگت حلقوی شکل با آرایش مثلث قائم الزاویه در مرکز تست فیلد یک وضعیت منحصر بفرد ایجاد می‌کند که برای کددهی تارگت‌های تست فیلد قرار داده شده‌است. وجود اعوجاج شعاعی در دوربین زاویه بازی که در این تحقیق استفاده شده‌است، کددهی تارگت‌های حاشیه تست فیلد را با چالش جدی مواجه ساخت. برای حل آن از سه تبدیل هندسی افاین، پروژکتیو و چندجمله ای دو بعدی به طور متوالی بهره گرفته شد که توانست از عهده اعوجاجات شعاعی شدید برآید. خطای بازیابی مختصات مرکز تارگت‌ها در بالاترین زاویه دوران تست فیلد و بالاترین اعوجاج شعاعی ممکن به میزان ۰.۲ پیکسل برآورد شد. پس از کالیبراسیون دوربین توسط تست فیلد پیشنهادی خطای RMSE کالیبراسیون برای دوربین فوجی فیلم، ۰.۰۹ پیکسل پیکسل و برای دوربین گوپرو، ۰.۰۷ پیکسل برآورد گردید.

واژگان کلیدی: تست فیلد صفحه‌ای، تبدیل پروژکتیو، اعوجاج شعاعی، کالیبراسیون دوربین، کددهی تارگت

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

هر سامانه مبتنی بر فتوگرامتری برد کوتاه نیاز به یک فرایند کالیبراسیون جهت تعیین پارامترهای داخلی دوربین بطور مجزا و همچنین محاسبه پارامترهای خارجی آن‌ها در یک سیستم مختصات مرجع است.

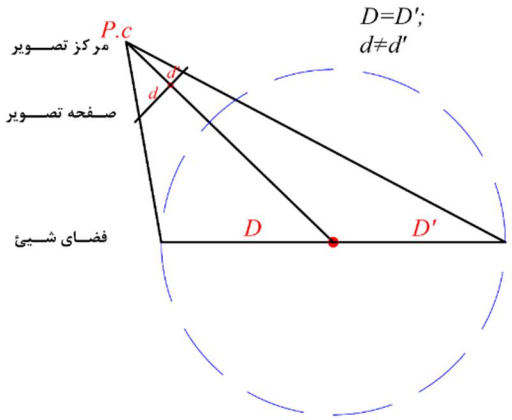
در این تحقیق هدف طراحی یک تست فیلد صفحه ای برای کالیبراسیون سامانه‌های دوربین استریو است که تمامی فرایند تشخیص و تناظریابی تارگت‌ها بصورت اتوماتیک انجام شود. سامانه‌های اسکنر اپتیکی بوسیله یک پروژکتور یک الگو[۱] را به سطح شیئ تابانده و تصویر آن الگو را که تحت تاثیر ناهمواری‌های سطح شیئ تغییر شکل یافته است را ثبت می‌نماید. با استفاده از تناظریابی میان نقاط تصویر دوربین و نقاط الگوی پروژکتور یک سری نقاط استریو از سامانه دوربین-پروژکتور بدست خواهد آمد. با استفاده از این نقاط استریو بعلاوه پارامترهای داخلی و خارجی دوربین-پروژکتور مختصات سه بعدی شیئ نقاط قابل محاسبه خواهد بود. بمنظور بدست آوردن پارامترهای داخلی و خارجی یک سامانه استریو لازم است تا فرایند کالیبرسیون انجام شود. برای کالیبراسیون لازم است یک شیئ کالیبراسیون که بر روی آن تارگت هایی با موقعیت بسیار دقیق تعبیه شده است در مقابل دوربین قرار داده شود و از آن تصویربرداری گردد. مختصات تصویری این تارگت‌ها به همراه مختصات زمینی متناظر آن وارد یک فرایند سرشکنی شده و پارامترهای کالیبراسیون بعنوان مجهولات محاسبه می‌گردند. در این راستا مدل‌های ریاضی متعددی برای کالیبراسیون دوربین توسعه داده شده است [۱-۵].

یکی از روش‌های رایج در کالیبراسیون دوربین استفاده از یک تست فیلد صفحه ای است. بدین منظور تارگت هایی با شکل و الگوی از پیش تعیین شده بصورت یک آرایه منظم روی یک صفحه با ابعادی مشخص چاپ می‌شوند. مختصات زمینی تارگت‌ها با یک روش بسیار دقیق نظیر CMM مشخص می‌گردد. بنابراین هر تارگت در صفحه تست فیلد یک مختصات دقیق دارد. این تست فیلد صفحه ای برای کالیبراسیون دوربین استفاده می‌شود. در فرایند کالیبراسیون دوربین از این صفحه در وضعیت‌های مختلف تصویربرداری می‌شود. در مرحله بعد بایستی تارگت‌های موجود در صفحه تست فیلد بصورت اتوماتیک تشخیص داده شوند. سپس مرکز هرکدام از این تارگت‌ها بصورت دقیق تعیین شده و مختصات آن با مختصات زمینی آن متناظر می‌گردد. به منظور جلوگیری از ابهام در تناظریابی تارگت‌ها در چرخش‌های ۱۸۰ درجه صفحه تست فیلد، بایستی به نحوی تارگت‌های صفحه تست فیلد کددهی گردد. طراحی تست فیلد، تشخیص اتوماتیک تارگت‌ها و تناظریابی آن‌ها فرایندی است که در این تحقیق بر روی آن تمرکز شده است. به بیان دیگر در یک تست فیلد صفحه ای تارگت هایی با مختصات دقیق چاپ شده است که بایستی در هر وضعیت عکسبرداری تارگت‌های متناظر تشخیص داده شده و مختصات دو بعدی مرکز آنها با دقت بالایی اندازه گیری گردد. مختصات دوبعدی هر تارگت در هر تصویر به همراه مختصات سه بعدی آنها در معادلات سرشکنی قرار داده شده و در نهایت پارامترهای داخلی و خارجی دوربین و پروژکتور برای یک سامانه استریو محاسبه می‌گردد.

روش‌های متعددی برای اتوماسیون کددهی تارگت‌های دو بعدی توسط محققین پیشنهاد داده شده است که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم. صفحه شطرنجی یکی از رایج ترین تست فیلدهای صفحه ای برای کالیبراسیون دوربین به شمار می‌رود. مختصات گوشه‌های مربع‌های درون صفحه شطرنجی بعنوان مختصات تارگت‌ها در نظر گرفته شده است و بایستی گوشه‌ها در تصویر کاملا واضح دیده شوند. به منظور جلوگیری از ابهام تناظریابی از سطرها و ستونهای فرد در صفحه شطرنجی استفاده می‌شود [۶]. آرایه دایره ای نیز یکی دیگر از فرم‌های تست فیلد است که بسیار پرکاربرد است [۷]. این آرایه را می‌توان بصورت متقارن یا غیر متقارن ایجاد کرد. در این تست فیلد مرکز هر دایره بعنوان مختصات معلوم در کالیبراسیون محسوب می‌شود. ویژگی دایره منطبق نبودن مرکز ثقل درجات خاکستری تارگت با مرکز هندسی دایره آن در حالت دید پرسپکتیو است. این عدم تطابق در لنز هایی با اعوجاج بالا تشدید هم می‌شود. شکل ۱ جابجایی مختصات مرکز یک تارگت دایره ای را در یک سیستم مختصات مرکزی پرسپکتیو نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که وقتی از یک زاویه مایل از یک تارگت دایره ای به شعاع D تصویری با هندسه مرکزی تهیه می‌شود، شعاع دایره در تصویر آن نسبت به مرکز دایره متقارن نیست و فاصله d با d' با هم

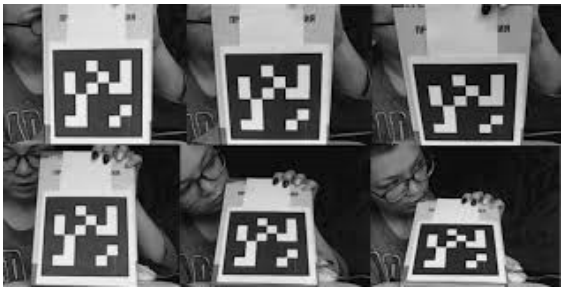
۱ Pattern

برابر نیست. بنابراین مرکز دایره در تصویر با استفاده از اپراتورهای مرکز ثقل درجات خاکستری بر مرکز هندسی تارگت دایره ای منطبق نمی‌شود.



شکل ۱- جابجایی نامتقارن مختصات مرکز یک تارگت دایره‌ای در یک سیستم مختصات مرکزی غیر قائم

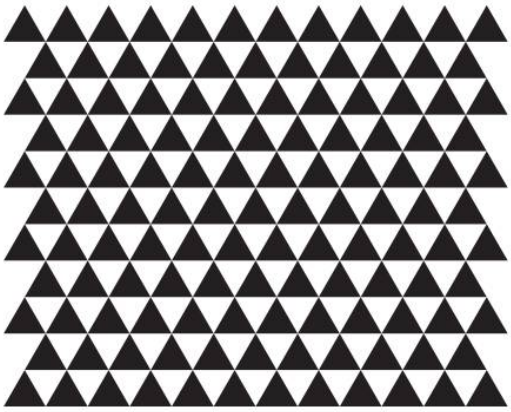
همچنین هنگامی که از آرایه متقارن استفاده می‌کنیم ابهام چرخش ۱۸۰ درجه تست فیلد را داریم که استفاده از آرایه غیر متقارن را توجیه می‌کند. سومین گروه تست فیلدها از نوع چارکو[۱] هستند [۸]. در واقع این تست فیلد ترکیبی از صفحه شطرنجی و علامت‌های آرکو[۲] است. علامت‌های آرکو برای غلبه بر خطای موقعیت گوشه‌های تست فیلد شطرنجی و همچنین ناقص بودن تارگت‌ها به خاطر وجود موانع، اضافه شده اند. بنابراین خانه‌های سیاه رنگ تست فیلد شطرنجی با علامت‌های آرکو پر شده است. نوع سوم تست فیلد به آپریل گرید[۳] موسوم است [۹]. این تست فیلد ترکیبی از علامت‌های آپریل تگ با مربع‌های کوچتر است که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. این تست فیلد پایداری بیشتری در مقابل پوشیده شدن دارد.



شکل ۲- تست فیلد آپریل گرید

۱ Charuco
۲ Aruco

تست فیلد دیگری با نام شبکه دلتیل[۴] است که الگویی از مثلث‌های منظم کنار هم چیده شده را فراهم می‌آورد که تعداد گوشه‌های بیشتری را با زوایای تیز تر فراهم می‌آورد [۱۰]. بر اساس این تحقیق استفاده از مثلث بعنوان تارگت پایداری بیشتری در مقابل تغییر منظر دوربین دارد و برای کالیبراسیون دوربین نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. در شکل ۳ نمونه‌ای از این تست فیلد نمایش داده شده است.



شکل ۳- فرم تست فیلد دلتیل برای کالیبراسیون دوربین

بطور کلی شکل و فرم تست فیلد به نوع سامانه اپتیکی که قرار است کالیبراسیون شود وابسته است. علاوه بر این دقت کالیبراسیون نهایی به دقت چاپ این علامت‌ها و استخراج زیر پیکسل موقعیت تارگت و نیز صفحه بودن سخت افزار تارگت بستگی دارد. در این مقاله به طراحی یک تست فیلد صفحه ای پرداخته شده است که از تارگت‌های سفید رنگ در زمینه سیاه استفاده شده است. استفاده از تارگت‌های سفید موجب می‌شود بازیابی فاز دچار تداخل نگردد و باعث کاهش دقت بازیابی فاز نشود. در ضمن برای کددهی نقاط تست فیلد از یک روش نوین استفاده شده است. هنگامی که از دوربین زاویه باز استفاده می‌شود کددهی تارگت‌های حاشیه تست فیلد بدلیل افزایش اعوجاج شعاعی تصویر بشدت جابجا شده و کددهی آن تارگت‌ها را با چالش جدی مواجه می‌سازد. برای حل آن از یک تبدیل دو بعدی چندجمله‌ای استفاده شده‌است.

ساختار این مقاله به شرح زیر است. در بخش دوم، مبانی و مدل ریاضی کالیبراسیون سامانه دوربین–پروژکتور ارائه می‌شود. در بخش سوم، طراحی تست‌فیلد پیشنهادی و ویژگی‌های آن تشریح می‌شود. بخش چهارم به روش

۳ AprilGrid
۴ Deltille

تشخیص، شناسایی و کددهی تارگت‌های تست‌فیلد اختصاص دارد. در بخش پنجم، عملکرد روش پیشنهادی از طریق آزمایش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل تحلیل می‌شود. در نهایت، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی در بخش ششم ارائه می‌شود.

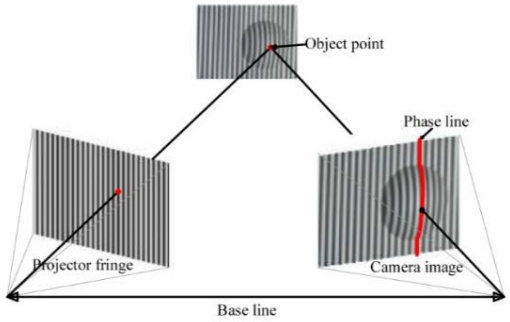
از آنجا که هدف اصلی این پژوهش، توسعه و ارزیابی یک روش برای کالیبراسیون سامانه دوربین–پروژکتور است، در ادامه ابتدا مبانی نظری و مدل ریاضی این فرایند تشریح می‌شود.

۲- کالیبراسیون دوربین-پروژکتور

یک سامانه دوربین–پروژکتور را می‌توان به‌صورت یک سامانه استریو فتوگرامتری مدل‌سازی کرد. بر اساس اصل تقارن در انتشار نور [۱]، پروژکتور از دیدگاه هندسی معادل یک دوربین مرکزی با مسیر انتشار نور معکوس است[۱۱]. بدین معنا که در حالی‌که دوربین نور بازتاب‌شده از جسم را دریافت و تصویر را ثبت می‌کند، پروژکتور تصویر را از مرکز پرسپکتیو خود بر روی سطح جسم می‌تاباند. بنابراین، همان مدل هندسی تشکیل تصویر و پارامترهای کالیبراسیون شامل پارامترهای داخلی، پارامترهای خارجی و مدل اعوجاج لنز که برای دوربین به‌کار می‌رود، برای پروژکتور نیز قابل تعریف است. تفاوت در این است که در دوربین اعوجاج لنز بر تصویر ثبت‌شده اعمال می‌شود، در حالی‌که در پروژکتور، تصویر ارسالی پس از عبور از لنز دچار اعوجاج شده و سپس بر روی سطح جسم تابانده می‌شود.

شکل ۴ اصول اندازه‌گیری در یک سامانه استریوی دوربین–پروژکتور را نشان می‌دهد. برای کالیبراسیون این سامانه، لازم است بین نقاط سه‌بعدی روی جسم و مختصات متناظر آن‌ها در صفحه تصویر دوربین و پروژکتور تناظر دقیقی برقرار شود. در دوربین، این تناظر به‌سادگی از طریق استخراج مختصات تصویری تارگت‌ها از تصویر ثبت‌شده به دست می‌آید؛ اما در پروژکتور، تصویر تارگت‌های تست‌فیلد وجود ندارد و تنها الگوی فرینج [۲] از پیش طراحی‌شده بر روی سطح تست فیلد تابانده می‌شود. ازاین‌رو، مختصات تصویر پروژکتور به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و ایجاد تناظر با آن، مهم‌ترین چالش در کالیبراسیون پروژکتور است.

۱ Principle of Reciprocity



شکل ۴- اصول اندازه گیری به روش دوربین-پروژکتور

برای رفع این چالش، یک الگوی کدگذاری‌شده فرینج در دو راستای افقی و عمودی بر روی تست‌فیلد تابانده شده و تصویر آن توسط دوربین ثبت می‌شود. پس از استخراج دقیق مرکز هر تارگت از تصویر دوربین، مقادیر فاز متناظر با آن نقطه در راستاهای افقی و عمودی از الگوهای فرینج محاسبه می‌شود. این مقادیر فاز، مختصات متناظر هر تارگت را در صفحه تصویر پروژکتور تعیین کرده و بدین ترتیب، تناظر دقیق بین نقاط جسم، تصویر دوربین و تصویر پروژکتور برای انجام کالیبراسیون فراهم می‌شود. رابطه ۱ مقدار درجه خاکستری هر پیکسل سطح که الگوی فرینج به آن تابیده شده است و همچنین رابطه ۲ محاسبه فاز هر پیکسل را نشان می‌دهد [۱۲].

$$I_i(x,y) = A(x,y) + B(x,y)\cos\left(\phi(x,y) + \frac{2\pi i}{N}\right) \qquad (۱)$$

$$\phi(x,y) = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{N} I_i \sin\left(\frac{2\pi i}{N}\right)}{\sum_{i=1}^{N} I_i \cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right)}\right) \qquad (۲)$$

در رابطه ۱، I_i درجه خاکستری ثبت شده برای هر پیکسل در مرحله iام، A *مولفه روشنایی زمینه*، B دامنه مدولاسیون الگوی فرینج، φ فاز متناظر با هر پیکسل و N تعداد شیفت‌های فاز اعمال شده به الگوی فرینج را نشان می‌دهد. در روش شیفت فاز، پروژکتور بجای نمایش یک الگوی فرینج، مجموعه ای از الگوهای یکسان را با اختلاف فاز معلوم $2\pi i / N$ به صورت متوالی بر روی سطح جسم می‌تاباند. در هر مرحله، دوربین مقدار درجه خاکستری هر پیکسل را ثبت می‌کند. بنابراین، برای هر پیکسل مجموعه

۲ Fringe

ای از مقادیر شدت روشنایی (I_1,I_2,I_3) در اختیار خواهد بود که از رابطه ۱ تبعیت می‌کند.

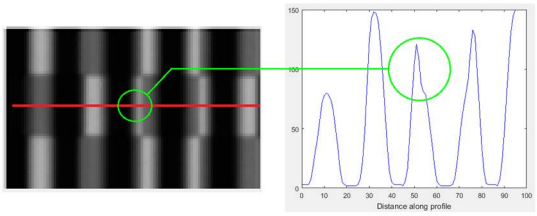
از آنجا که مولفه‌های A و B و φ در این رابطه مجهول هستند، با ثبت حداقل سه تصویر دارای شیفت فاز معلوم، دستگاه معادلات تشکیل شده و امکان برآورد فاز هر پیکسل فراهم می‌شود. در این پژوهش، مقدار فاز هر پیکسل با استفاده از رابطه ۲ و بر اساس مقادیر شدت ثبت شده در تمامی تصاویر شیفت یافته محاسبه شده است.

پس از محاسبه فاز مرکز تارگت می‌توان در تصویر مرجع پروژکتور محل متناظر آن فاز را تعیین نمود. این نقطه همان تناظر تصویری تارگت در دوربین و پروژکتور است. بنابراین یک زوج مختصات دو بعدی تصویری (دوربین-پروژکتور) و یک مختصات شیئ تست فیلد بدست می‌آید. در صورت معلوم شدن نقاط تناظر برای تمامی نقاط تست فیلد می‌توان آن را به معادلات کالیبراسیون وارد نموده و پس از سرشکنی پارامترهای داخلی دوربین و پروژکتور و همچنین پارامترهای خارجی آن‌ها را محاسبه نمود. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش طراحی یک تست‌فیلد است که امکان استخراج خودکار مختصات تصویری مراکز تارگت‌ها، برقراری تناظر دقیق بین مختصات دوبعدی آن‌ها در تصویر دوربین و مختصات شیئی متناظر، و همچنین تعیین مختصات متناظر آن‌ها در صفحه تصویر پروژکتور را فراهم سازد؛ به‌گونه‌ای که کالیبراسیون سامانه دوربین–پروژکتور با دقت بالا امکان‌پذیر شود.

۳- طراحی فرم و شکل تست فیلد

همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد، در کالیبراسیون سامانه دوربین–پروژکتور، برای ایجاد تناظر بین تصویر دوربین و تصویر پروژکتور لازم است مقدار فاز متناظر با مرکز هر تارگت با بیشترین دقت ممکن محاسبه شود. این فاز از الگوهای فرینج سینوسی که توسط پروژکتور بر روی سطح تست‌فیلد تابانده می‌شوند به دست می‌آید. با ثبت چند تصویر از الگوهای فرینج دارای شیفت فاز معلوم، ابتدا فاز پیچیده[۱] هر پیکسل محاسبه شده و سپس با اجرای فرایند بازکردن فاز[۲]، فاز مطلق استخراج می‌شود. بنابراین، دقت کالیبراسیون مستقیماً به دقت محاسبه فاز در محل مرکز تارگت‌ها وابسته است.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دقت بازیابی فاز، یکنواخت شدت روشنایی در همسایگی پیکسل مورد نظر است. هرگونه تغییر ناگهانی در بازتاب یا درجات خاکستری سطح موجب اعوجاج شکل موج سینوسی ثبت‌شده و در نتیجه کاهش دقت محاسبه فاز می‌شود [۱۳]. این موضوع در تست‌فیلدهای شطرنجی متداول از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا محل استخراج مختصات تارگت در گوشه مشترک مربع‌های سیاه و سفید قرار دارد. نقطه‌ای که در دو جهت افقی و عمودی با یک مرز دارای کنتراست بسیار زیاد احاطه شده است (شکل ۵).



شکل ۵- مقطع عرضی درجات خاکستری یک الگوی سینوسی بر روی یک تست فیلد شطرنجی که به دلیل کنتراست بالای زمینه از حالت سینوسی خارج شده است.

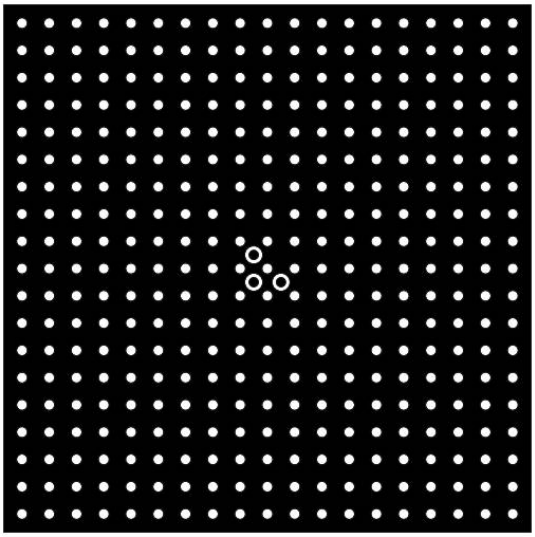
اگرچه این کنتراست زیاد موجب افزایش دقت تعیین موقعیت گوشه‌های شطرنجی می‌شود، اما برای بازیابی فاز شرایط مناسبی ایجاد نمی‌کند، زیرا تغییرات شدید شدت روشنایی در اطراف نقطه مورد نظر موجب افزایش خطای محاسبه فاز می‌شود. ازاین‌رو، استفاده از تست‌فیلدی که در محل محاسبه فاز دارای زمینه‌ای یکنواخت و روشن باشد، برای سامانه‌های دوربین–پروژکتور مناسب‌تر است. همچنین، استفاده از زمینه تیره در محل استخراج فاز به دلیل کاهش نسبت سیگنال به نویز، دقت بازیابی فاز را کاهش می‌دهد [۱۴].

بر همین اساس، در این پژوهش تست‌فیلدی متشکل از آرایه‌ای از تارگت‌های دایره‌ای سفید بر روی زمینه‌ای سیاه طراحی شده است (شکل ۶). در این آرایش، مرکز هر تارگت که محل محاسبه فاز است، در ناحیه‌ای با شدت روشنایی یکنواخت قرار می‌گیرد و از مرزهای با کنتراست زیاد فاصله دارد؛ بنابراین، خطای بازیابی فاز کاهش یافته و دقت تعیین مختصات متناظر در تصویر پروژکتور افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کنتراست زیاد بین تارگت‌های سفید و زمینه سیاه، استخراج خودکار مراکز تارگت‌ها از تصویر دوربین را نیز با

۱ Wrapped Phase

۲ Phase Unwrapping

استفاده از یک آستانه‌گذاری ساده و پایدار امکان‌پذیر می‌سازد. لازم به ذکر است که این ویژگی صرفاً به مرحله تشخیص تارگت‌ها مربوط بوده و ارتباطی با کدگذاری فرینج و محاسبه فاز ندارد.



شکل ۶- تست فیلد طراحی شده

۴- تشخیص و کددهی تارگت‌های صفحه‌ی تست فیلد

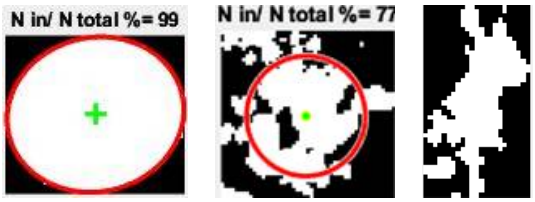
به‌منظور تشخیص خودکار تست‌فیلد، ابتدا محدوده آن از پس‌زمینه تصویر تفکیک می‌شود تا از ورود عوارض غیرمرتبط به مراحل بعدی پردازش جلوگیری شود. بدین منظور، با اعمال یک آستانه‌گذاری ساده و انتخاب آستانه‌ای برابر با نصف بیشینه درجه خاکستری تصویر، نواحی تیره شامل زمینه تست‌فیلد استخراج می‌شوند. سپس، با گروه‌بندی پیکسل‌های متصل و تشکیل مؤلفه‌های همبند، محدوده تست‌فیلد شناسایی می‌شود. از آنجا که در فرایند کالیبراسیون، تست‌فیلد به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که بخش عمده تصویر را پوشش دهد، بزرگ‌ترین مؤلفه همبند به‌عنوان محدوده تست‌فیلد انتخاب می‌شود.

پس از تعیین محدوده تست‌فیلد، فرایند تشخیص تارگت‌ها درون این ناحیه انجام می‌شود. برای این منظور، تارگت‌های سفید با استفاده از آستانه‌گذاری از زمینه تیره تفکیک شده و پس از گروه‌بندی پیکسل‌های متصل و برچسب‌گذاری مؤلفه‌های همبند، هر مؤلفه بر اساس ویژگی‌های هندسی نظیر مساحت، تقارن و میزان شباهت به دایره مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مؤلفه‌هایی که معیارهای تعیین‌شده را برآورده کنند، به‌عنوان تارگت‌های دایره‌ای معتبر شناسایی می‌شوند.

قید مساحت تارگت: مساحت یک تارگت تعداد پیکسل‌های با مقدار ۱ آن است. نسبت مساحت یک تارگت به کل صفحه تست فیلد معلوم است. بنابراین باید این نسبت در یک بازه مشخص برقرار باشد.

قید تقارن تارگت ها: طول و عرض مستطیل محاطی یک تارگت بواسطه تیلت صفحه تست فیلد یک میزان اختلاف خواهد داشت. با در نظر گرفتن حداکثر زاویه دوربین نسبت به صفحه تست فیلد یک نسبت برای ابعاد مستطیل محاطی در نظر گرفته می‌شود.

قید فیت شدن بیضی: پس از اعمال قید مساحت، به هر گروه از پیکسل‌های متصل به هم یک بیضی فیت می‌شود. اگرچه تارگت‌ها دایره ایست اما بدلیل تیلت بشکل بیضی درخواهد آمد سپس مساحت پیکسل‌های درون بیضی با تمام پیکسل‌ها مقایسه می‌شود. در صورتی که اکثریت پیکسل‌ها (۹۸ درصد) در درون بیضی فیت شده قرار بگیرند این پیکسل‌ها به یک تارگت دایره ای تعلق دارد. نمونه ای از روند تشخیص تارگت‌های تست فیلد را در شکل ۷ مشاهده می‌کنید.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۷- تشخیص تارگت‌های تست فیلد طراحی شده: (الف) شیئی که از قید مساحت عبور کرده اما در قید تقارن متوقف شده (ب) شیئ که از قید تقارن عبور کرده اما قید بیضی را و (ج) شئی که از سه قید عبور کرده است.

از سوی دیگر اگر یک تارگت به دلیل اشباع نوری بصورت ناقص در تصویر ظاهر شود توسط قیدهای در نظر گرفته شده در این مرحله حذف می‌شود. شکل ۸ بعنوان نمونه نشان می‌دهد تمامی تارگت‌های دایره ای تست فیلد طراحی شده به درستی تشخیص داده شده است.

۴-۱- تعیین مرکز دقیق تارگت ها

هنگامی که تمامی تارگت‌های تست فیلد به درستی تشخیص داده شد بایستی مرکز تست فیلد با دقت بالایی

تعیین گردد. بدین منظور از میانگین وزن دار درجات خاکستری استفاده شده است (رابطه ۳)

$$x_p = \frac{\sum x_i . I(x,y)}{\sum I(x,y)} \qquad (۳)$$
$$y_p = \frac{\sum y_i , I(x.y)}{\sum I(x.y)}$$

در این رابطه (xi, yi) مختصات پیسکل‌های متعلق به تارگت و I مقدار درجه خاکستری هر کدام از پیکسل‌ها است.

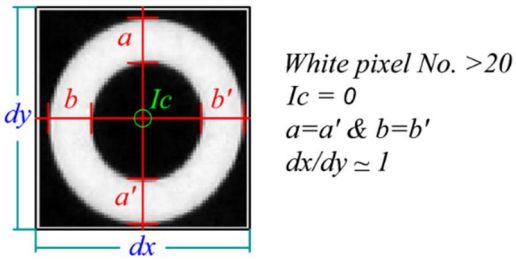


شکل ۸- تشخیص تارگت‌های دایره ای با استفاده از ویژگی‌های تصویری

۴-۲- کددهی تارگت‌های تست فیلد

دیگر چالش طراحی تست فیلد، کدگذاری تارگت‌ها در تصویر است که در هر حالت چرخش تصویر بایستی بصورت منحصر بفرد به هر تارگت اختصاص یابد. بدین منظور یک ترتیب شماره گذاری منظم سطری و ستونی برای کددهی تمام تارگت‌های صفحه تست فیلد در نظر گرفته می‌شود. برای این امر از سه تارگت با شکل متفاوت (حلقوی شکل) از بقیه تارگت‌ها بصورت یک مثلث قائم الزاویه بهره گرفته شده است. سه دلیل مهم برای انتخاب محل این سه تارگت در مرکز تست فیلد وجود دارد. اول اینکه بسیار ممکن است به دلیل جابجایی تست فیلد بخشی از حاشیه تست فیلد در میدان دید دوربین قرار نگیرد. در حالی که مرکز تست فیلد همیشه در میدان دید دوربین است. دوم اینکه اعوجاجات لنز عموما در حاشیه تصویر بالا است که موجب تغییر شکل شدید تارگت‌ها شده و ممکن است در زوایای تند قابل تشخیص نباشند. دلیل سوم پس زمینه تارگت‌ها است. در صورتی که این تارگت‌ها در حاشیه تست فیلد قرار داده شوند بایستی تمام سطح تصویر اعم از فضای خارج از تست فیلد نیز برای یافتن اتوماتیک این سه تارگت بررسی گردد که تشخیص این سه تارگت را پیچیده تر می‌کند. بنابراین سه تارگت مذکور در کمترین فاصله ممکن به مرکز تست فیلد تعبیه شده اند. در این صورت شکل و فاصله سه تارگت دچار کمترین اعوجاج شده و همیشه در میدان دید دوربین است و نیز می‌توان محدوده جستجوی این سه تارگت را در یک سوم میانی تصویر تعیین نمود.

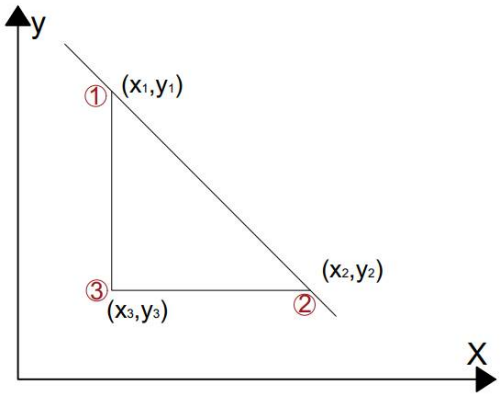
پس از شناسایی سه تارگت حلقوی مرکزی، فرایند کددهی از این تارگت‌ها آغاز می‌شود. برای تشخیص این سه تارگت، مجموعه‌ای از قیود هندسی و شدت روشنایی به‌طور هم‌زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این قیود شامل موقعیت تقریبی تارگت‌ها در ناحیه مرکزی تصویر، وجود ناحیه تیره در مرکز تارگت، نسبت ابعاد مؤلفه به میانگین ابعاد سایر تارگت‌ها و همچنین ویژگی‌های هندسی پایدار نظیر یکنواختی نسبی ضخامت حلقه، تقارن ابعاد مربع محاطی و مساحت مؤلفه است. از آنجا که در اثر تغییر زاویه دید، تارگت‌های دایره‌ای به بیضی تبدیل می‌شوند، ارزیابی این ویژگی‌ها با در نظر گرفتن تلورانس‌های از پیش تعیین‌شده انجام می‌شود تا تغییرات ناشی از پرسپکتیو و اعوجاج لنز موجب حذف نادرست تارگت‌ها نشود. علاوه بر این، با توجه به اینکه سه تارگت کددار در ناحیه مرکزی تست‌فیلد قرار دارند، در اغلب تصاویر در نزدیکی مرکز تصویر واقع شده و کمترین تأثیر اعوجاج شعاعی را تجربه می‌کنند؛ ازاین‌رو، قیود فوق از پایداری کافی برای تشخیص صحیح این تارگت‌ها برخوردار هستند. شکل ۹ این قیود را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۹- شروط بکار گرفته شده بمنظور تشخیص تارگت‌های حلقوی از میان نواحی برچسب گذاری شده.

پس از تشخیص سه تارگت حلقوی، نوبت به تعیین ترتیب شماره‌گذاری آن‌ها می‌رسد. مطابق شکل ۱۰، دو

تارگتی که بیشترین فاصله را از یکدیگر دارند به‌عنوان دو رأس وتر شناسایی شده و به‌صورت اولیه و بدون در نظر گرفتن ترتیب، با شماره‌های P_1 و P_2 مشخص می‌شوند. تارگت سوم که فاصله آن تا دو تارگت دیگر کمتر و تقریباً برابر است، به‌عنوان رأس زاویه قائم و با شماره P_3 در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که دو رأس واقع بر وتر از نظر هندسی متقارن هستند، برای ایجاد یک ترتیب یکنواخت و تکرارپذیر در تمامی تصاویر، جهت مثلث با استفاده از آزمون جهت‌گیری سه نقطه تعیین می‌شود. بدین منظور، علامت ضرب خارجی بردارهای $\overrightarrow{P_1P_2}$ و $\overrightarrow{P_1P_3}$ مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود. در صورتی که مقدار این عبارت منفی باشد، شماره‌های P_1 و P_2 با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند تا پس از شماره‌گذاری، نقطه P_3 همواره در سمت مشخصی از بردار $\overrightarrow{P_1P_2}$ قرار گیرد. این قید موجب می‌شود ترتیب شماره‌گذاری سه تارگت مرجع در تمامی تصاویر به‌صورت یکنواخت حفظ شود.



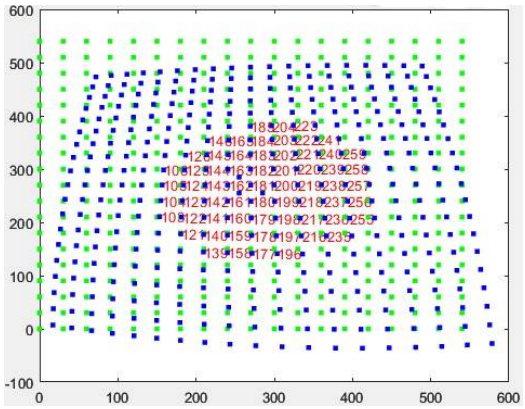
شکل ۱۰- کددهی مثلث قائم الزاویه تارگت‌های حلقوی در مرکز تست فیلد

$$\begin{aligned}&\text{if } (x_2-x_1)(y_3-y_1)-(y_2-y_1)(x_3-x_1)<0\\&\qquad (P_1,P_2)\leftarrow(P_2,P_1)\\&\text{else}\\&\qquad (P_1,P_2)\leftarrow(P_1,P_2)\end{aligned} \tag{۴}$$

پس از کددهی سه تارگت مرجع، مختصات مرکز آن‌ها با استفاده از رابطه (۳) با دقت زیرپیکسلی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مختصات این سه نقطه و مختصات متناظر آن‌ها در سیستم مختصات تست‌فیلد، یک تبدیل دوبعدی افاین بین صفحه تصویر و صفحه مرجع تست‌فیلد برقرار می‌شود. بر اساس این تبدیل، مختصات سایر تارگت‌های تصویر به صفحه مرجع منتقل شده و هر تارگت به نزدیک‌ترین تارگت متناظر در تست‌فیلد مرجع نسبت داده می‌شود.

از آنجا که تبدیل افاین قادر به مدل‌سازی کامل اثر پرسپکتیو نیست، با افزایش فاصله از سه تارگت مرجع، خطای انتقال نیز به‌تدریج افزایش می‌یابد. ازاین‌رو، فرایند کددهی به‌صورت تدریجی و از مرکز تست‌فیلد به سمت نواحی پیرامونی گسترش می‌یابد؛ به این معنا که شعاع جستجو پیرامون سه تارگت مرجع به‌تدریج افزایش داده می‌شود و در هر مرحله، تناظر تارگت‌های واقع در آن شعاع بررسی می‌گردد. تا زمانی که فاصله اقلیدسی بین یک تارگت منتقل‌شده و نزدیک‌ترین تارگت متناظر در تست‌فیلد مرجع کمتر از یک‌هشتم فاصله بین دو تارگت مجاور باشد، تناظر معتبر تلقی شده و کد آن تارگت ثبت می‌شود.

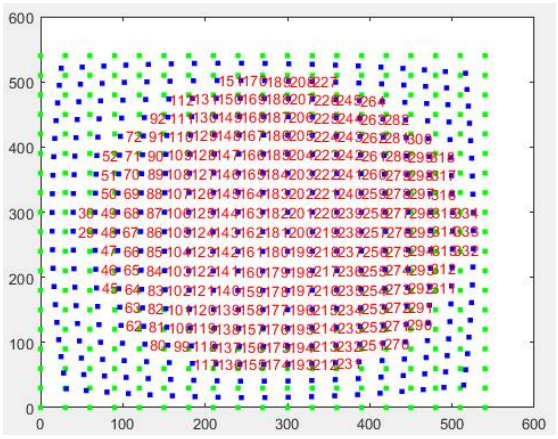
به محض آنکه برای نخستین بار این شرط برقرار نباشد، فرایند افزایش شعاع متوقف می‌شود و از کددهی تارگت‌های دورتر صرف‌نظر می‌گردد. دلیل این امر آن است که پس از افزایش خطای تبدیل افاین، ممکن است یک تارگت به اشتباه به تارگت دیگری در تست‌فیلد مرجع نزدیک‌تر شود و در صورت ادامه فرایند، کددهی نادرست به سایر تارگت‌ها نیز گسترش یابد. بنابراین، قید فاصله تنها یک معیار پذیرش تناظر نیست، بلکه به‌عنوان معیار توقف الگوریتم نیز عمل کرده و از انتشار خطا در مراحل بعدی کددهی جلوگیری می‌کند. شکل ۱۱ تارگت‌های کددهی‌شده در این مرحله را با رنگ قرمز نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- کددهی نقاط همسایگی سه تارگت کددار مرکزی. نقاط آبی رنگ نقاط تشخیص داده شده در تست فیلد که به فضای تست فیلد مرجع توسط تبدیل افاین انتقال یافته است. نقاط سبز رنگ نقاط تست فیلد مرجع. شماره‌های قرمز نقاط کددهی شده با قید فاصله.

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود خطای پرسپکتیو هنوز در نقاط آبی رنگ وجود دارد و انتقال افاین در فواصلی دورتر از مرکز نتوانسته است از عهده آن بر آید.

برای کددهی مابقی تارگت‌ها لازم است از مدل ریاضی کامل تری استفاده نمود که بتواند از عهده اعواجاجات پرسپکتیو بر آید. بنابراین از تبدیل دو بعدی پروژکتیو استفاده می‌گردد. نقاطی که در مرحله قبل متناظر شده اند تعداد قابل توجهی هستند (بیش از چهار نقطه حداقل مورد نیاز) و می‌توان پارامترهای تبدیل دو بعدی پروژکتیو را برآورد نمود. در این مرحله نیز مانند آنچه در تبدیل افاین انجام شد، فاصله شعاعی از مرکز تست فیلد به تدریج اضافه شده و فاصله نقاط تبدیل یافته تصویری با مختصات تست فیلد مرجع متناظر خود مقایسه گردید. نقاطی کددهی می‌گردند که فاصله آن تا مختصات مرجع خود کمتر از یک هشتم فاصله دو تارگت از هم باشد.



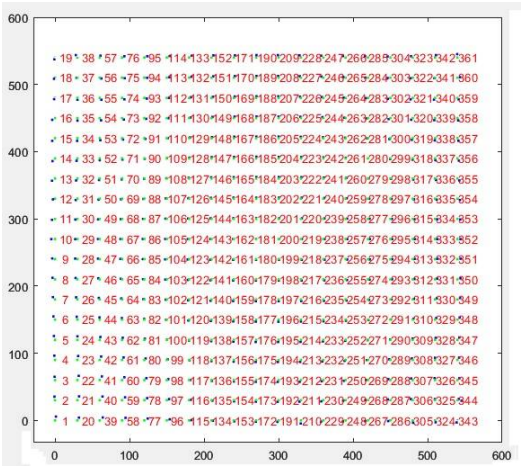
شکل ۱۲- نقاط کددهی شده تست فیلد در یک تصویر از دوربین Gopro Hero 13 پس از تبدیل پروژکتیو

نکته قابل توجه آن است که در این پژوهش از دوربین زاویه‌باز **GoPro Hero 13** با فاصله کانونی ۱۲ میلی‌متر استفاده شده است که اعواجاج شعاعی لنز آن، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای تصویر، قابل توجه است. ازاین‌رو، اگرچه تبدیل پروژکتیو اثر پرسپکتیو را تا حد زیادی جبران می‌کند، اما قادر به مدل‌سازی اعواجاج غیرخطی لنز نیست. در نتیجه، در نواحی دور از مرکز تصویر، موقعیت پیش‌بینی‌شده برخی تارگت‌ها همچنان با موقعیت واقعی آن‌ها اختلاف داشته و احتمال ایجاد تناظر نادرست افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، پس از اعمال تبدیل پروژکتیو، تارگت‌های واقع در گوشه‌های تصویر (آبی) هنوز با نقاط متناظر خود در تست‌فیلد مرجع (سبز) انطباق کامل ندارند، هرچند دامنه کددهی نسبت به تبدیل افاین به‌طور محسوسی افزایش یافته است.

به‌منظور کاهش این خطا، از مدل اعواجاج شعاعی براون [۱۵,۱۶] مطابق رابطه (۵) استفاده شد. در این مرحله هدف، کالیبراسیون کامل دوربین نیست، بلکه برآورد یک مدل اعواجاج برای بهبود دقت تناظر نقاط است.

$$xd = xu(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)$$
$$yd = yu(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (۵)$$

در این مدل، ابتدا مختصات تمامی تارگت‌هایی که در مرحله قبل با استفاده از تبدیل پروژکتیو با اطمینان کافی کددهی شده‌اند، به‌عنوان نقاط متناظر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مختصات این نقاط در تصویر، مشاهدات دستگاه معادلات را تشکیل می‌دهند، در حالی که مختصات متناظر آن‌ها در تست‌فیلد مرجع به‌عنوان مقادیر معلوم در نظر گرفته می‌شوند. سپس، با تشکیل یک مسئله کمترین مربعات، ضرایب اعواجاج شعاعی k_1، k_2 و k_3 به‌عنوان مجهولات دستگاه برآورد می‌شوند. پس از تعیین این ضرایب، مدل اعواجاج برای اصلاح مختصات تمامی نقاط تصویر اعمال شده و تصویر تست‌فیلد به‌صورت تقریبی از اثر اعواجاج شعاعی تصحیح می‌شود. در نتیجه، موقعیت تارگت‌ها در نواحی حاشیه‌ای نیز به مختصات واقعی آن‌ها نزدیک شده و همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، امکان کددهی صحیح تمامی تارگت‌های تست‌فیلد فراهم می‌شود.



شکل ۱۳- کددهی نقاط حاشیه تست فیلد پس از استفاده از مدل چندجمله‌ای براون

۵- ارزیابی روش پیشنهادی

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، مجموعه‌ای از تصاویر شبیه‌سازی‌شده از تست‌فیلد طراحی‌شده تولید و تحت شرایط مختلف تصویربرداری مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از این ارزیابی، بررسی پایداری الگوریتم در تشخیص و کددهی صحیح تارگت‌ها و همچنین تحلیل تأثیر منابع مختلف خطا بر عملکرد آن بود. بدین منظور، ۴۰۰ تصویر با اعمال ترکیب‌های تصادفی از اعوجاج‌های مختلف تولید و توسط الگوریتم پیشنهادی پردازش شدند. نمونه‌ای از این تصاویر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

در این آزمایش سه پارامتر اصلی تغییر داده شد. پارامتر (k) ضریب اعوجاج شعاعی لنز بوده و برای شبیه‌سازی دوربین‌های با میدان دید وسیع، به‌ویژه دوربین GoPro Hero 13، مورد استفاده قرار گرفت. با افزایش مقدار این ضریب، میزان اعوجاج بشکه‌ای تصویر نیز افزایش یافته و جابه‌جایی تارگت‌ها، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای تصویر، بیشتر می‌شود.

پارامتر θ زاویه دوران صفحه تست‌فیلد نسبت به محور دید دوربین است که میزان اعوجاج پرسپکتیو را کنترل می‌کند. هرچه این زاویه افزایش یابد، اثر پرسپکتیو شدیدتر شده و تغییر شکل هندسی تست‌فیلد در تصویر بیشتر خواهد بود. همچنین، پارامتر σ انحراف معیار فیلتر گوسی اعمال‌شده بر تصویر بوده و میزان تاری تصویر [۱] را شبیه‌سازی می‌کند. علاوه بر این، برای بررسی مقاومت الگوریتم در برابر نویز، نویز گوسی با انحراف معیار نسبی σ_n نیز به تصاویر افزوده شد.

نتایج حاصل از ارزیابی در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در برابر تاری تصویر و نویز تصادفی از پایداری مناسبی برخوردار است و حتی در بیشترین مقدار بررسی‌شده (σ =5) پیکسل و (σ_n =5%)، نرخ موفقیت کددهی همچنان بیش از ۹۸ درصد باقی مانده است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از تارگت‌های دایره‌ای با کنتراست مناسب و استخراج زیرپیکسلی مرکز آن‌ها، حساسیت الگوریتم را نسبت به این دو منبع خطا به میزان قابل توجهی کاهش داده است.

جدول۱- رصد موفقیت تشخیص و کددهی صحیح تارگت‌های تست‌فیلد شبیه‌سازی‌شده در سطوح مختلف اعوجاج شعاعی لنز (k)، زاویه دوران تست‌فیلد نسبت به محور دید دوربین (θ)، تاری گوسی تصویر (σ) و نویز گوسی (σ_n) .

	$\theta = 10$	$\theta = 15$	$\theta = 45$	$k = x^{-14}$	$k = x^{-12}$	$k = x^{-10}$
$\sigma = ۱\ pix$	۱۰۰%	۱۰۰%	۱۰۰%	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۰۰%
$\sigma = ۳\ pix$	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۹۵%	۹۹.۹۵%	۹۸.۹۵%	۹۶.۸۵%
$\sigma = ۵\ pix$	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۹۵%	۹۹.۹۵%	۹۸.۹۵%	۹۵.۱۰%
$\sigma_n = ۱\ \%$	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۸۰%	۹۹.۸۰%	۹۸.۰۵%	۹۴.۰۰%
$\sigma_n = ۳\ \%$	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۵۰%	۹۸.۰۰%	۹۷.۰۰%	۹۲.۴۵%
$\sigma_n = ۵\ \%$	۱۰۰%	۱۰۰%	۹۸.۰۰%	۹۸.۰۰%	۹۶.۹۰%	۹۰.۹۰%

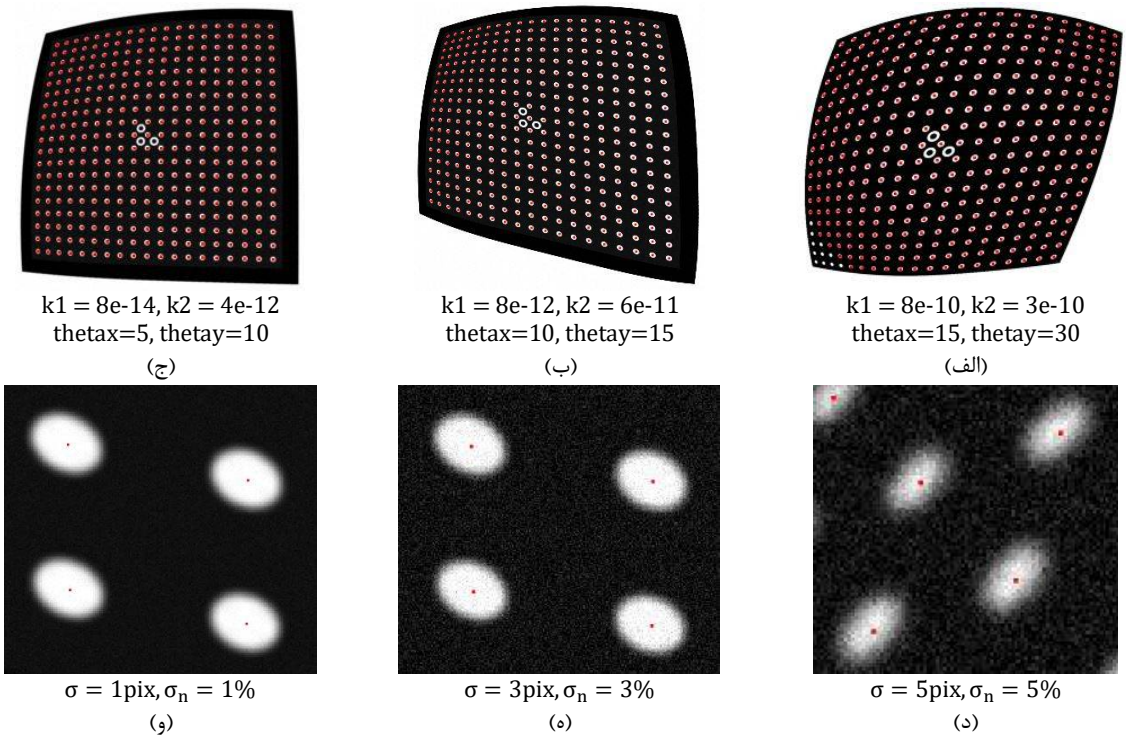
در مقابل، اعوجاج شعاعی و اعوجاج پرسپکتیو بیشترین تأثیر را بر عملکرد الگوریتم داشته‌اند. همان‌گونه که در ستون مربوط به ضریب اعوجاج (k) مشاهده می‌شود، با افزایش اعوجاج شعاعی، نرخ موفقیت کددهی به‌تدریج کاهش یافته و برای مقدار (k=10e-10) به حدود ۹۱ درصد می‌رسد. علت این موضوع آن است که با افزایش اعوجاج شعاعی، جابه‌جایی نسبی تارگت‌ها در نواحی حاشیه‌ای تصویر افزایش یافته و روابط هندسی مورد استفاده برای ایجاد تناظر به‌تدریج دقت خود را از دست می‌دهند.

رفتار مشابهی در اعوجاج پرسپکتیو نیز مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه دوران تست‌فیلد نسبت به دوربین، تغییر شکل پرسپکتیوی تصویر افزایش یافته و در نتیجه اختلاف بین موقعیت واقعی و موقعیت پیش‌بینی‌شده تارگت‌ها بیشتر می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱۴(الف) مشاهده می‌شود، نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی‌شده با زاویه دوران ۳۰ درجه نشان داده شده است که در آن اثر اعوجاج پرسپکتیو به‌خوبی قابل مشاهده است. اگرچه مقدار ۳۰ درجه در جدول ۱ گزارش نشده است، این شکل صرفاً به‌عنوان نمونه‌ای از

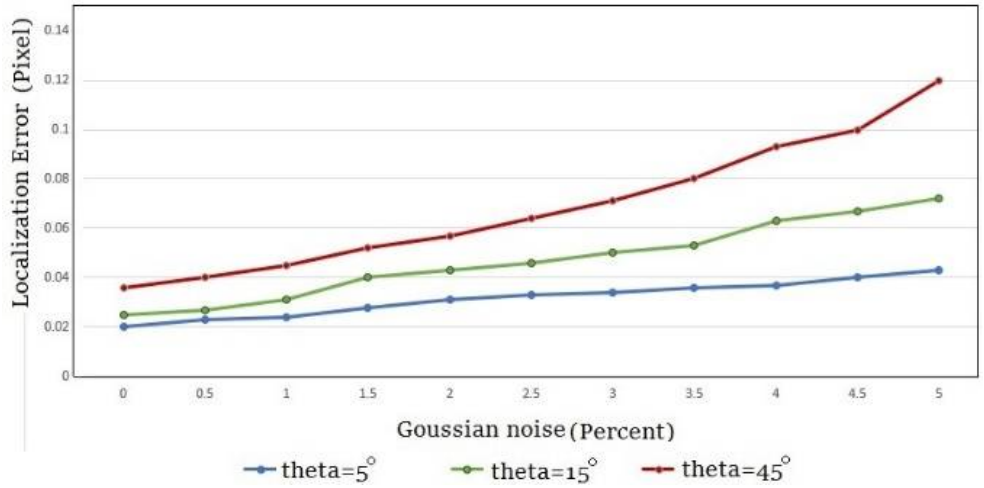
۱ Gaussian Blur

شرایط میانی آزمایش ارائه شده است. در حالی که نتایج جدول برای زوایای ۱۰، ۱۵ و ۴۵ درجه محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تا حدود ۳۰ درجه، الگوریتم همچنان از پایداری مناسبی برخوردار است، اما با نزدیک شدن زاویه دوران به ۴۵ درجه، تغییر شکل هندسی تصویر موجب کاهش نرخ موفقیت کددهی می‌شود.

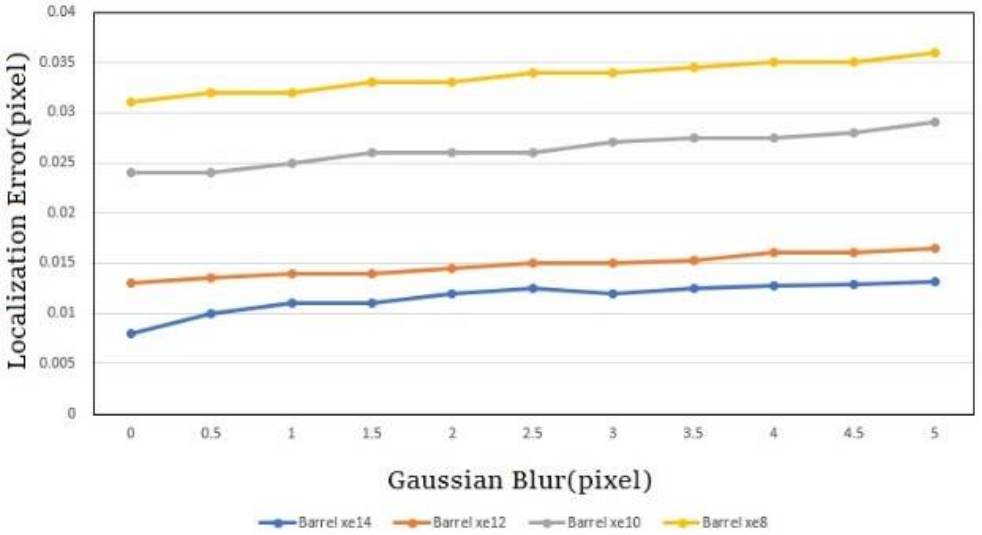
در مجموع، نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که عامل اصلی محدودکننده عملکرد الگوریتم، اعوجاج‌های هندسی ناشی از پرسپکتیو و اعوجاج شعاعی لنز است، در حالی که تأثیر تاری تصویر و نویز تصادفی در محدوده بررسی‌شده نسبتاً محدود بوده است. این نتایج بیانگر آن است که الگوریتم پیشنهادی برای شرایط معمول تصویربرداری با دوربین‌های زاویه‌باز از پایداری مناسبی برخوردار بوده و تنها در شرایط اعوجاج‌های بسیار شدید، که روابط هندسی بین تارگت‌های مرجع به میزان قابل توجهی تغییر می‌کند، احتمال کاهش دقت کددهی افزایش می‌یابد.



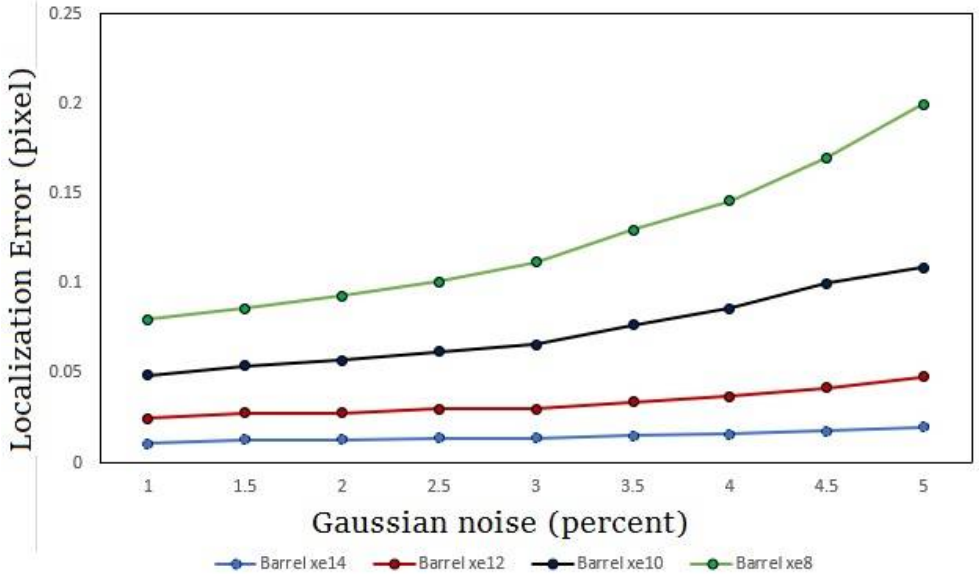
شکل ۱۴- اعمال اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی بر روی تصاویر تست فیلد بصورت شبیه‌سازی



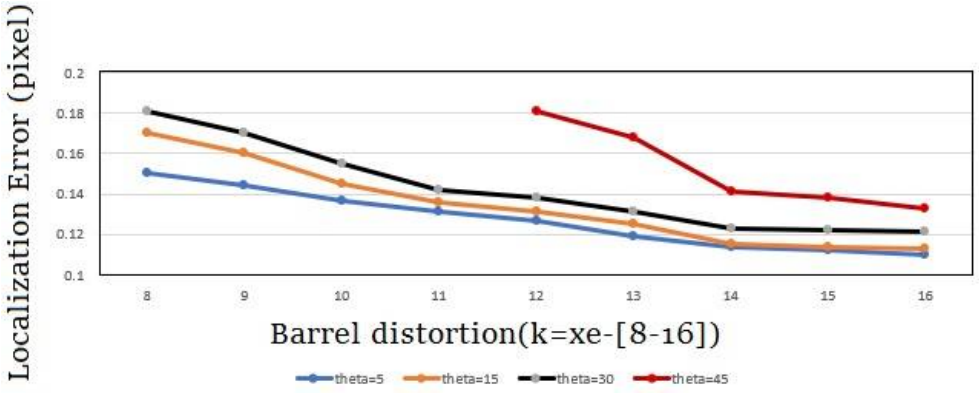
شکل ۱۵- نمودار نویز- خطای موقعیت مرکز تارگت برای تصاویر تست فیلد در زوایای دوران پرسپکتیو ۵ و ۱۵ و ۴۵ درجه.



شکل ۱۶- خطای مختصات مرکز تارگت‌های تست فیلد شبیه سازی بواسطه افزایش ماتی گوسین تصویر برای مقادیر مختلف اعوجاج شعاعی



شکل ۱۷- خطای مختصات مرکز تارگت بواسطه افزایش نویز برای مقادیر مختلف اعوجاج شعاعی



شکل ۱۸- خطای مختصات مرکز تارگت‌های تست فیلد شبیه سازی بواسطه افزایش اعوجاج شعاعی برای

همچنین میزان خطای تعیین مرکز تارگت‌های تست فیلد نیز با توجه به معلوم بودن پارامترهای اعوجاج در تصاویر شبیه سازی شده امکان پذیر است. میزان خطای اعوجاج هندسی پروزکتیو با دوران حول محورهای x و y در بازه [45-0] درجه به تصویر تست فیلد اعمال گردید. همانطور که در نمودار ۱۵ مشاهده می‌کنید، در حالتی که اعوجاج پرسپکتیو با دوران بالا در تصویر ایجاد می‌شود موجب می‌گردد مختصات مرکز تارگت با خطای حداکثر 0.12 پیکسل برآورد گردد.

همان‌گونه که در نمودار شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، افزایش میزان تاری گوسی تأثیر محسوسی بر خطای تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها ندارد و تغییرات خطا در مقایسه با اثر اعوجاج شعاعی بسیار ناچیز است. در واقع، افزایش خطای تعیین موقعیت مرکز تارگت‌ها عمدتاً ناشی از اعوجاج شعاعی تصویر بوده و سهم تاری گوسی در محدوده آزمایش‌شده بسیار محدود است.

این رفتار را می‌توان به ماهیت هندسی تارگت‌های دایره‌ای نسبت داد. اعمال تاری گوسی اگرچه موجب کاهش وضوح لبه‌ها می‌شود، اما شکل هندسی و تقارن تارگت را حفظ می‌کند؛ در نتیجه، مرز تارگت پس از آستانه‌گذاری همچنان به‌صورت یکنواخت باقی مانده و برازش بیضی با دقت مناسبی انجام می‌شود. بنابراین، مختصات مرکز تارگت با دقت زیرپیکسلی قابل بازیابی است و افزایش تاری گوسی، در محدوده مقادیر بررسی‌شده، تأثیر قابل توجهی بر دقت تعیین مرکز تارگت ندارد.

ایجاد اعوجاج شعاعی: به‌منظور ارزیابی اثر اعوجاج شعاعی بر عملکرد الگوریتم، مطابق رابطه (۵) اعوجاج شعاعی با مقادیر مختلف ضریب (k) به تصاویر تست‌فیلد اعمال شد. در این مدل، هرچه مقدار مطلق ضریب (k) بزرگ‌تر باشد یا به عبارت دیگر، توان منفی (k) کوچک‌تر باشد، شدت اعوجاج شعاعی افزایش یافته و جابه‌جایی تارگت‌ها، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای تصویر، بیشتر خواهد شد. تصاویر شبیه‌سازی‌شده در قدرت تفکیک یکسان تولید و توسط الگوریتم پیشنهادی پردازش شدند.

نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۷ نشان می‌دهد که با افزایش شدت اعوجاج شعاعی و همچنین افزایش نویز تصویر، خطای تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها به‌تدریج افزایش می‌یابد. با این حال، حتی در شدیدترین شرایط آزمایش، شامل ضریب اعوجاج (k=xe-8) و نویز گوسی ۵ درصد، حداکثر خطای تعیین مختصات مرکز تارگت از ۰.۲ پیکسل تجاوز نکرد. این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در برابر اعوجاج‌های متداول لنز و نویز تصویر از پایداری مناسبی برخوردار است.

اثر همزمان اثر دوران پرسپکتیو و اعوجاج شعاعی لنز: در ادامه، برای شبیه‌سازی شرایط واقعی تصویربرداری با دوربین‌های زاویه‌باز، اثر هم‌زمان اعوجاج پرسپکتیو و اعوجاج شعاعی مورد بررسی قرار گرفت. در این آزمایش، تصاویر تست‌فیلد در زوایای مختلف نسبت به محور دید دوربین شبیه‌سازی شدند و برای هر زاویه، مقادیر مختلف ضریب اعوجاج شعاعی (k) اعمال گردید. هدف از این آزمایش، بررسی تأثیر هم‌زمان این دو منبع اعوجاج بر دقت تعیین مختصات تارگت‌ها بود.

همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، برای هر زاویه دوران ثابت، با کاهش شدت اعوجاج شعاعی کوچک‌تر شدن مقدار مطلق ضریب (k)، خطای تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها نیز کاهش می‌یابد. همچنین، برای یک مقدار ثابت از ضریب (k)، افزایش زاویه دوران تست‌فیلد موجب افزایش خطای تعیین مختصات می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اعوجاج شعاعی و اعوجاج پرسپکتیو اثر تجمعی داشته و به‌طور هم‌زمان موجب کاهش دقت الگوریتم می‌شوند.

در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که منحنی مربوط به زاویه دوران ۴۵ درجه (منحنی قرمز) به‌طور کامل رسم نشده است. علت این موضوع آن است که در این شرایط، ترکیب اعوجاج شدید شعاعی و اعوجاج پرسپکتیو باعث تغییر شکل قابل توجه سه تارگت مرجع مرکزی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که روابط هندسی مورد استفاده برای تشخیص و کددهی این سه تارگت دیگر با دقت کافی برقرار نیست. در نتیجه، اگرچه بخشی از تارگت‌ها همچنان تشخیص داده می‌شوند، اما الگوریتم قادر به ایجاد تناظر مطمئن و کددهی صحیح همه آن‌ها نبوده و بنابراین محاسبه خطای مختصات برای تمامی تارگت‌ها امکان‌پذیر نیست. نمونه‌ای از این وضعیت در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.

در نهایت، به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شرایط واقعی، مجموعه‌ای از تصاویر تست‌فیلد توسط دو دوربین Fujifilm X-E1 مجهز به لنز ۱۸ میلی‌متری و GoPro Hero 13، به‌عنوان یک دوربین با لنز فوق‌زاویه‌باز، اخذ و پردازش شد. مشخصات فنی این دو دوربین در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج کالیبراسیون نشان داد که خطای

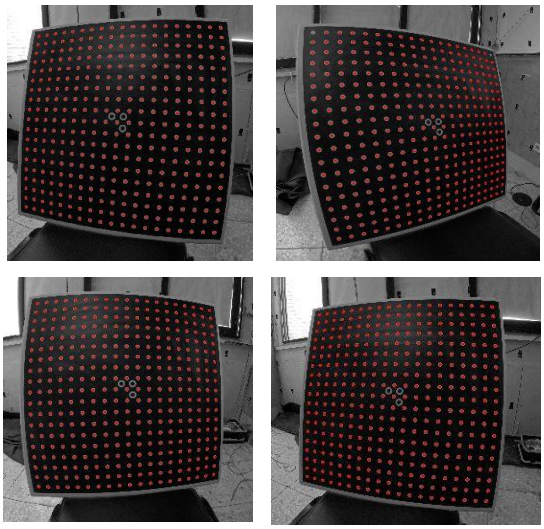
کمترین مربعات (RMSE) برای دوربین Fujifilm X-E1 برابر با 0.0987 پیکسل و برای دوربین GoPro Hero 13 برابر با 0.0778 پیکسل است. این نتایج بیانگر دقت بالای تست‌فیلد و الگوریتم پیشنهادی در کالیبراسیون دوربین‌های با مشخصات اپتیکی متفاوت، به‌ویژه دوربین‌های مجهز به لنزهای زاویه‌باز با اعوجاج شعاعی قابل توجه است.



شکل ۱۹- اعوجاج بشگه‌ای تصویر بواسطه ضرایب بزرگ k اعوجاج شعاعی و همزمان دوران ۴۵ درجه پرسپکتیو صفحه تصویر موجب اختلال در کددهی تارگت‌ها شده‌است.

جدول ۲- مشخصات فنی دوربین‌های مورد استفاده در این پژوهش

Parameter	Fujifilm X-E1 + XF 18mm	GoPro Hero 13 Black
نوع سنجنده	APS-C X-Trans CMOS	CMOS
ابعاد سنجنده (میلی‌متر)	23.6 × 15.6	6.17 × 4.55
ابعاد تصویر (پیکسل)	4896 × 3264	5568 × 4872
ابعاد پیکسل (میلی‌متر)	0.00482	0.00111
فاصله کانونی اسمی (میلی‌متر)	18.0	12.0*
فاصله کانونی واقعی	18.0	≈2.7
نقطه اصلی (پیکسل)	(2448, 1632)	(2784, 2436)
نوع لنز	Fujinon XF 18 mm F2 R	Ultra Wide



شکل ۲۰- نمونه‌هایی از تصاویر اخذ شده از تست فیلد پیشنهادی توسط دوربین Gopro Hero13 که اعوجاج لنز قابل توجهی دارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک تست‌فیلد صفحه‌ای جدید به‌منظور ایجاد یک فرایند کاملاً خودکار برای تشخیص، کددهی و تعیین مختصات زیرپیکسلی تارگت‌ها در کالیبراسیون سامانه استریوی دوربین–پروژکتور ارائه شد. در طراحی این تست‌فیلد، از تارگت‌های دایره‌ای سفید بر روی زمینه سیاه استفاده شد تا علاوه بر افزایش دقت استخراج مرکز تارگت‌ها، امکان بازیابی دقیق فاز در سامانه‌های نگاشت فرینج نیز فراهم شود. همچنین، سه تارگت حلقوی با آرایش مثلث قائم‌الزاویه در مرکز تست‌فیلد به‌عنوان مرجع اولیه کددهی در نظر گرفته شدند و فرایند تناظر تارگت‌ها به‌صورت تدریجی، از مرکز به سمت حاشیه تصویر، انجام شد.

الگوریتم پیشنهادی بر پایه مجموعه‌ای از روش‌های شناخته‌شده در حوزه فتوگرامتری و پردازش تصویر، شامل آستانه‌گذاری، تحلیل اجزای متصل، برازش بیضی، تبدیل افاین، تبدیل پروژکتیو و مدل اعوجاج شعاعی براون، توسعه یافته است. اگرچه هیچ‌یک از این روش‌ها به‌تنهایی نوآوری این پژوهش محسوب نمی‌شوند، اما تلفیق هدفمند آن‌ها در قالب یک فرایند یکپارچه و کاملاً خودکار برای ایجاد تناظر میان تست‌فیلد، تصویر دوربین و تصویر معادل پروژکتور، دستاورد اصلی این تحقیق به شمار می‌رود. این چارچوب امکان کالیبراسیون دقیق سامانه‌های دوربین–پروژکتور را بدون نیاز به مداخله کاربر فراهم می‌کند.

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم، تصاویر شبیه‌سازی‌شده با اعمال منابع مختلف خطا شامل تاری گوسی، نویز گوسی، اعوجاج پرسپکتیو ناشی از دوران تستفیلد و اعوجاج شعاعی لنز تولید و پردازش شدند. نتایج نشان داد که تاری گوسی، در محدوده مقادیر بررسی‌شده، تأثیر ناچیزی بر دقت تعیین مختصات مرکز تارگت‌ها دارد، در حالی که افزایش نویز، اعوجاج شعاعی و اعوجاج پرسپکتیو موجب افزایش تدریجی خطای اندازه‌گیری می‌شوند. بیشترین خطای تعیین مختصات در شرایط بررسی‌شده، برای اعوجاج شعاعی k=xe-8 و نویز ۵ درصد، حدود ۰.۲ پیکسل برآورد شد. همچنین، در ترکیب اعوجاج پرسپکتیو شدید (زاویه دوران ۴۵ درجه) و اعوجاج شعاعی زیاد، تغییر شکل سه تارگت مرجع مرکزی به حدی افزایش می‌یابد که فرایند کددهی اولیه با شکست مواجه شده و امکان ایجاد تناظر صحیح برای سایر تارگت‌ها نیز از بین می‌رود.

در نهایت، آزمون الگوریتم بر روی تصاویر واقعی اخذشده توسط دوربین‌های Fujifilm X-E1 و GoPro Hero 13 نشان داد که روش پیشنهادی قادر است کالیبراسیون این دو دوربین را با خطای بازپراکنش[1] کمتر از ۰.۱ پیکسل انجام دهد. این نتایج بیانگر دقت و پایداری مناسب روش پیشنهادی در کالیبراسیون سامانه‌های دوربین–پروژکتور، به‌ویژه در کاربردهای مبتنی بر دوربین‌های زاویه‌باز، است.

به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده، می‌توان با افزایش فاصله میان سه تارگت مرجع مرکزی، استفاده از آرایش‌های هندسی متمایزتر یا توسعه روش‌های مقاوم‌تر برای کددهی اولیه، پایداری الگوریتم را در برابر اعوجاج‌های بسیار شدید و زوایای دید بزرگ‌تر افزایش داد.

مراجع

[۱] Clarke, T.A. and J.G. Fryer, The development of camera calibration methods and models. The Photogrammetric Record, 1998. 16(91): p. 51–66.

[۲] Fryer, J.G. and D.C. Brown, Lens distortion for close-range photogrammetry. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1986. 52: p. 51–58.

[۳] Heikkila, J. and O. Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. in Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. 1997. IEEE.

[۴] Tsai, R ,.A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE Journal on Robotics and Automation, 2003. 3(4): p. 323–344.

[۵] Zhang, Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In Proceedings of the seventh IEEE International Conference on Computer Vision. 1999. IEEE.

[۶] Mei, C. and P. Rives. Single viewpoint omnidirectional camera calibration from planar grids. In Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. IEEE.

[۷] Meng, X. and Z. Hu, A new easy camera calibration technique based on circular points. Pattern Recognition, 2003. 36(5): p. 1155–1164.

[۸] An, G.H., et al., Charuco board-based omnidirectional camera calibration method. Electronics, 2018. 7(12): p. 421.

[۹] Olson, E. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In 2011 IEEE international conference on robotics and automation. 2011. IEEE.

[۱۰] Ha, H., et al. Deltille grids for geometric camera calibration. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 2017.

[۱۱] Moreno, D. and G. Taubin. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration. In 2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission. 2012. IEEE.

[۱۲] Zhang, S., High-resolution 3D profilometry with binary phase-shifting methods. Applied Optics, 2011. 50(12): p. 1753–1757.

[۱۳] Da, F., L. Wang, and L. Hu, Fringe projection profilometry based on complementary color-encoded fringe patterns. Optics & Laser Technology, 2012. 44(8): p. 233.۲۳۳۹–۲

۱ Reprojection RMSE

[۱۴] Shen, M., et al., Deep learning based measurement accuracy improvement of high dynamic range objects in fringe projection profilometry. Optics Express, 2024. 32(20): p. 35689–35702.

[۱۵] Leotta, M.J., D. Russell, and A. Matrai. On the maximum radius of polynomial lens distortion. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2022.

[۱۶] Duane, C.B., Close-range camera calibration. Photogramm. Eng., 1971. 37(8): p. 855–866.