

بررسی تاثیر فاصله کالیبراسیون بر دقت استخراج مدل سه بعدی با دوربین های استریو

وحید موسوی^۱، مسعود ورشوساز^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲- دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده:

دقت مکانی ابر نقاط بدست آمده از سیستم تصاویر اخذ شده توسط دوربین های استریو، در متدهای مدل سازی سه بعدی تصویرمبنا، حساسیت بالایی نسبت به پارامترهای کالیبراسیون دوربین دارند. برای تهیه مدل سه بعدی از فضاهای شهری که در فاصله دورتری از دوربین قرار دارند، دقت پارامترهای کالیبراسیون بسیار مهم تر است و خطاهای بزرگ در برآورد این پارامترها، ممکن است تمام فرآیند مدل سازی را با شکست مواجه کند. در این مقاله، تاثیر دقت المان های توجیه داخلی دوربین های استریو را بر دقت اقلیدسی ابرنقطه تولید شده با استفاده از این پارامترها بررسی می شود. برای این منظور، دو دوربین استریو که با باز ۴۰ سانتیمتر در کنار هم قرار داده شده و با تصویربرداری از یک میدان آزمون از فاصله های مختلف پارامترهای توجیه داخلی آن ها استخراج شده است. با کمک این پارامترها و ثابت نگه داشتن توجیه خارجی دوربین ها، از منطقه شهری با بافت مناسب ابر نقطه تهیه شده و از طول های معلوم در روی ساختمان ها به عنوان معیار ارزیابی دقت ابرنقطه استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که استفاده از میانگین گیری حسابی برای پارامترهای توجیه داخلی دوربین های استریو نتایج دقیق تری را در دقت اقلیدسی ابر نقطه تولید شده ایجاد می کند

واژه های کلیدی: کالیبراسیون دوربین، مدل سازی سه بعدی، ابرنقطه



۱- مقدمه

مدل سازی سه بعدی با استفاده از روشهای تصویر مینا و هم چنین تکنولوژی های سنسور های فعال به طور گسترده- ایی برای جمع آوری اطلاعات هندسی سه بعدی از ساختار شهری مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. این اطلاعات هندسی به شکل قابل توجهی در زمینه هایی مانند معماری، مهندسی عمران و بازسازی بناهای شهری کاربرد دارند. به طور کلی روش های فعال یا فاصله مینا مانند سنسورهای نور ساخت یافته و لیزر اسکنرها روشهایی رایج و دقیق برای استخراج مدل سه بعدی از فضاهای شهری هستند ولی این سیستم ها دارای مشکلاتی مانند هزینه های بسیار زیاد، سنگینی و دشواری حمل و نقل در فضاهای شهری هستند. در طرف دیگر، روشهای تصویر مینا، روشهایی از آن قیمت، سریع و آسان برای جمع آوری اطلاعات هندسی در محیط های شهری به شمار می آیند. مطالعات بسیاری قابلیت ها و توانایی های روشهای تصویر مینای استریو و مونو را در بازسازی سه بعدی نشان داده است. برای رسیدن به دقت های بالا در روش های تصویر مینا کالیبراسیون دوربین مسئله مهمی به شمار می آید که در این مقاله بررسی روی آن صورت می گیرد.

بیشتر روشهای مدل سازی سه بعدی تصویر مینا از یک دوربین تکی استفاده می کنند. زمانی که از یک دوربین به صورت مونو برای مدل سازی استفاده می شود، مدل نهایی تولید شده دارای مقیاس نامشخصی است. این محدودیت مسئله بسیار مهمی است به خصوص زمانی که هدف از تولید مدل سه بعدی تنها نمایش و بصری سازی محیط نباشد و اندازه گیری های هندسی روی مدل تولید شده نیز مدنظر باشد. استفاده از دوربین های استریوی کالیبره شده میتواند این مشکل را حل کند. ولی چالش دیگری که در زمینه مطرح می شود کالیبراسیون دوربین استریو و حساسیت نتایج به دست آمده به دقت استخراج پارامترهای کالیبراسیون است.

کالیبراسیون دوربین فرآیند مشخص کردن یک سری از پارامترهاست که هندسه دوربین را در لحظه تصویربرداری مشخص می کند. این پارامترها را می توان به طور کلی به دو دسته پارامترهای داخلی و خارجی تقسیم بندی کرد. پارامترهای داخلی هندسه داخلی دوربین و ویژگی های اپتیکی لنز دوربین مانند فاصله کانونی، مختصات نقطه اصلی و ارتباط بین پارامترهای اعوجاج لنز را بیان می کند. در طرف دیگر پارامترهای خارجی کالیبراسیون مکان دوربین و توجیه آن را در فضای سه بعدی نمایش می دهد.

به طور کلی در مسئله بازسازی سه بعدی به کمک دوربین های استریو، سه عامل نقش مهمی در دقت نهایی مدل سه- بعدی دارند: فاصله بین دوربین ها یا همان باز، فاصله دوربین تا شی موردنظر و دقت المانهای توجیه داخلی و خارجی دوربین [۱، ۲]. در فرآیند بازسازی سه بعدی این عناصر به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته می شوند و دقت پایین در برآورد آنها باعث انباشته شدن خطاها در مدل نهایی می شود.

از مهم ترین عوامل موثر بر استخراج دقیق پارامترهای کالیبراسیون دوربین ها، طراحی مناسب شبکه تصویربرداری از میدان آزمون است. هرچه هندسه شبکه تصویربرداری قوی تر باشد، دقت نتایج حاصل از کالیبراسیون بالاتر خواهد بود [۳، ۴]. به طور وضوح مشخص است که با افزایش دقت استخراج پارامترهای توجیه خارجی، دقت مدل نهایی افزایش می باید با این وجود، عناصر توجیه داخلی نیز نقش انکارناپذیری دارند. در انجام کالیبراسیون دوربین های استریو، فاصله شی کالیبراسیون تا دوربین مسئله حائز اهمیتی است که رابطه مستقیمی با دقت پارامترهای استخراج شده دارد. این موضوع در کاربردهای نزدیک (فواصل کمتر از ۲ متر) ممکن است مشکل چندانی ایجاد نکند ولی در مسئله بازسازی سه بعدی فضاهای شهری، که فاصله شی تا دوربین زیادتر است (حدود ۱۰ تا ۱۵ متر)، تاثیر به سزایی دارد. بر این اساس، خطای ایجاد شده بازسازی سه بعدی را باید توسط افزایش دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون جبران کرد.



تحقیقات زیادی تاکنون در زمینه استخراج دقیق پارامترهای توجیه خارجی دوربین های استریو انجام شده است. Peng [۵] در سال ۲۰۱۱ یک آنالیز حساسیت در مورد پارامترهای کالیبراسیون دوربین های استریو با توجه به فاکتورهای مختلف مانند باز بین دوربین ها و فاصله بین دوربین ها تا شی کالیبراسیون انجام داده است. نتایج این آنالیز به وضوح نشان می‌دهد که زمانی که شی به دوربین نزدیک است اطلاعات سه بعدی دارای خطای کمتری بوده و با افزایش فاصله بین دوربین و شی این خطا به مراتب افزایش می‌یابد. این مطالعات تنها از تصاویر چپ و راست دوربین استریو برای استخراج اطلاعات هندسی ضروری استفاده کرده‌اند و به بررسی مدل سازی سه بعدی با استفاده از الگوریتم های SfM^۱ نپرداخته‌اند. بررسی های تئوری نشان می‌دهد که استخراج اطلاعات کالیبراسیون دوربین های استریو می‌بایست متناسب با فاصله شی تا دوربین برای مدل سازی سه بعدی بر پایه الگوریتم های SfM باشد.

این مقاله به دنبال بررسی و اعتبارسنجی این مسئله است که در فضاهای شهری با توجه به فاصله اشیا مدنظر با دوربین (حدود ۱۰ تا ۱۵ متر)، آیا باید برآورد اطلاعات کالیبراسیون دوربین ها و سیستم استریو نیز با فاصله‌ایی به همین اندازه از شی کالیبراسیون صورت پذیرد تا اطلاعات هندسی استخراج شده با خطای کمتری حاصل شوند؟. این مطالعه سعی دارد که نشان دهد که کالیبراسیون سیستم استریو در فاصله نامتناسب نسبت به فاصله شی، برای تولید مدل سه بعدی می‌تواند مقدار قابل توجهی خطا را در مدل سازی سه بعدی محیط های وسیع شهری وارد کند. برای این منظور دو دوربین استریو در فاصله‌های مختلف کالیبره شده و از اطلاعات کالیبراسیون آن‌ها برای تولید ابر نقطه استفاده می‌شود تا تاثیر کالیبراسیون مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

هدف این مقاله ارائه روشی برای برآورد دقیق تر پارامترهای توجیه داخلی دوربین و بهبود دقت مدل سه بعدی است. بنابراین مسئله ایی که مطرح می‌شود آن است که فاصله مناسب برای کالیبراسیون دوربین و استخراج پارامترهای توجیه داخلی با دقت بالاتر، چه فاصله ایی است و چگونه این پارامترها روی دقت مدل سه بعدی تاثیر گذار خواهند بود.

این مقاله از ۴ بخش تشکیل شده است. در بخش ۲ پیشینه تحقیق در مورد کالیبراسیون دوربین‌ها مطرح شده است. در بخش ۳ روش آزمایش ارائه شده برای ارزیابی دقت کالیبراسیون سیستم استریو و در بخش ۴ نتایج این آزمایش ارائه شده است.

۲- پیشینه تحقیق

روش های متعدد و متنوعی برای کالیبراسیون دوربین‌ها مطرح شده است. این متدها را برحسب ابعاد میدان آزمون مورد استفاده می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد. متدهای کالیبراسیون با میدان آزمون سه بعدی که از دو یا چند صفحه عمود بر هم تشکیل شده اند [۶]، متدهای با میدان آزمون صفحه ایی دوبعدی [۷] و متدهای یک بعدی که از چند نقطه هم خط برای کالیبراسیون استفاده می‌کنند. محققین زیادی بر روی کالیبراسیون دوربین ها تحقیق انجام داده اند که در همه آنها پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین استخراج می‌شود. Zhang [۸] تکنیکی برای کالیبراسیون دوربین ارائه کرد که با تصویربرداری چند جهته از یک الگوی شبکه ایی که روی یک صفحه قرار دارد، پارامترهای اعوجاجات شعاعی را استخراج می‌کند. Kim و همکاران [۹] از الگوهای دایره ایی شکل برای کالیبراسیون استفاده کردند. Strum و همکاران [۱۰] متدی برای کالیبراسیون ارائه کردند که از مدل‌های تصویرسازی بینایی ماشین بهره می‌گیرد. این متد تنها مدل مفهومی برای کالیبراسیون است و هیچ ارزیابی کمی روی آن صورت نگرفته است. Zhang در سال ۲۰۰۴ [۱۱] از اشپای یک بعدی برای کالیبراسیون دوربین استفاده کرد تا نیاز به صفحات کالیبراسیون دوبعدی را از بین ببرد. روش ارائه شده توسط او در صورتی که شی در محیط حرکت کند نتیجه موفقیت

^۱ Structure From Motion



آمیزی ندارد. همچنین تحقیقات مروری زیادی در حوزه کالیبراسیون دوربین های دیجیتال انجام گرفته است مانند تحقیقات صورت گرفته توسط Fryer در سال ۱۹۹۶ [۱۲] و تحقیقات Fraser در سال ۲۰۰۱ [۱۳] که مروری جامع روی روشهای کالیبراسیون انجام داده اند.

کالیبراسیون دوربین های استریو نیز شبیه به دوربین های مونو می باشد با این تفاوت که نیاز است که توجیه نسبی بین دو دوربین نیز، همراه با برآورد پارامترهای توجیه داخلی و خارجی دوربین ها، محاسبه شود. رایج ترین روش در این حالت آن است که هر دوربین مستقلاً کالیبره شود و سپس از المان های انتقال در توجیه خارجی، توجیه نسبی بین دو دوربین استخراج شود. Zhang و همکاران [۱۴]، Heikkilä و همکاران [۱۵]، Bouguet [۱۶] تحقیقات گسترده ای در این موضوع داشته اند. برای نمونه در روش Bouguet تعدادی عکس از یک صفحه شطرنجی، از مکان های متفاوت گرفته شده، سپس با استفاده از الگوریتمی، گوشه های هر یک از مربع ها مشاهده می شود، در مرحله بعدی پارامترهای توجیه داخلی و خارجی با حل سرشکنی باندل تعیین و در نهایت با استفاده از پارامترهای توجیه خارجی و پارامترهای توجیه نسبی دو عدسی نسبت به یکدیگر بدست می آید. Xiao و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۰ فرآیند دقیقی برای کالیبراسیون دوربین های استریو ارائه دادند که در آن از تارگت هایی با شکل خطوط متقاطع برای کاربردهای بازرسی صنعتی درون سایت استفاده می شد. Xu و همکاران [۱۸] امکان استفاده از الگوهای شبیه به صفحه شطرنج را به همراه متد استخراج گوشه بر مبنای حد آستانه گذاری در کالیبراسیون دوربین های استریو را بررسی کرد. نتایج تجربی در روی جعبه ابزار کالیبراسیون دوربین های استریو در نرم افزار MATLAB که بر مبنای متدهای ارائه شده توسط Zhang [۸] و همکاران Sturm [۱۰] است نتایج دقیق و پایداری را در بازهای بزرگ بین دوربین ها نشان می دهد.

متدهای مطرح شده تاکنون با موفقیت در فتوگرامتری برد کوتاه آزمایش شده و نتایج خوبی را در بازسازی سه بعدی اشیای با فاصله نزدیک (کمتر از ۲ متر) ارائه داده اند. با این وجود، چنین نتایجی در کاربردهای مدل سازی سه بعدی شهری که از فاصله دورتری تصویربرداری را انجام می دهند (فاصله بیشتر از حدود ۶ متر) قابل دستیابی نیست [۱۹]. آنالیزهای ریاضی انجام شده توسط Dang و همکاران [۲۰] در مورد حساسیت مدل سازی سه بعدی نسبت به وجود خطا در پارامترهای کالیبراسیون دوربین های استریو نشان می دهد که دقت توجیه داخلی و خارجی دوربین سهم بسزایی در دقت مدل نهایی دارد. نتایج این مطالعه در جدول (۱) آمده است. در این جدول Z نشان دهنده فاصله شی مورد بررسی تا دوربین، b باز بین دوربین، f فاصله کانونی، Cx مختصات مرکز تصویر در راستای محور x، x مختصات در راستای محور x در فضای تصویر و (x_{left}, y_{left}) مختصات های نرمال شده نقاط در فضای تصویر است. از نتایج این جدول می توان به راحتی مشاهده کرد که استخراج مختصات برای بازسازی سه بعدی، بیشترین مقدار حساسیت را نسبت به دقت مقادیر عناصر توجیه خارجی دارد. از میان این عناصر مقادیر دوران های دوربین (امگا، فی، کاپا) بیشترین تاثیر را دارند. میزان خطای ایجاد شده در بازسازی سه بعدی با خطای برآورد باز بین دوربین ها رابطه مستقیم به صورت خطی دارند ولی وجود مقداری خطا در برآورد باز بین دوربینها قابل پذیرش است.

بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط [۲، ۵، ۱۸، ۲۱] مشاهدات بسیار زیادی برای بدست آوردن میزان دقت پارامترهای کالیبراسیون انجام شده است. این مشاهدات نشان می دهد که دقت پارامترهای توجیه داخلی استخراج شده، تا حدود زیادی به فاصله شی کالیبراسیون تا دوربین بستگی دارد. بر این اساس، در این تحقیق، پارامترهای کالیبراسیون با تصویر برداری در فاصله های مختلف از صفحه کالیبراسیون، استخراج می شوند. فاصله شی کالیبراسیون (D) تا دوربین در چند فاصله مختلف تغییر می یابد و کالیبراسیون دوربین برای هر حالت انجام می پذیرد. برای تصویر برداری در هر حالت مختلف از صفحه آزمون تصویربرداری می شود



جدول ۱: حساسیت مدل سازی سه بعدی نسبت به خطای پارامترهای کالیبراسیون

عناصر توجیه خارجی		عناصر توجیه داخلی	
منبع خطا	حساسیت مدل سازی سه بعدی	منبع خطا	حساسیت مدل سازی سه بعدی
خطا در امگا	$\frac{\Delta Z}{\Delta \omega} \approx -\frac{Z^2}{b}(1 - x_{left}^2)$	خطا در مرکز تصویر	$\frac{\Delta Z}{\Delta c} \approx -\frac{Z^2}{bf}$
خطا در فی	$\frac{\Delta Z}{\Delta \phi} \approx \frac{Z^2}{b}(x_{left} y_{left})$	خطا در فاصله کانونی (تک دوربین)	$\frac{\Delta Z}{\Delta f_{left}} \approx -\frac{Z^2}{bf^2}(x_{left} - C_x)$
خطا در کاپا	$\frac{\Delta Z}{\Delta \kappa} \approx \frac{Z^2}{b}(y_{left})$	خطا در فاصله کانونی (دو دوربین)	$\frac{\Delta Z}{\Delta f} \approx -\frac{Z}{f}$
خطا در بازبین دوربین ها	$\frac{\Delta Z}{\Delta b} \approx -\frac{Z}{b}$		

۳- روش آزمایش ارائه شده

به طور کلی آزمایش ارائه شده دارای دو بخش است. بخش اول شامل جمع آوری اطلاعات کالیبراسیون مربوط به توجیه داخلی دو دوربین با تصویربرداری از فواصل مختلف از میدان آزمون و بخش دوم تولید ابر نقطه با این اطلاعات است. براین اساس، با فواصل مختلف از میدان آزمون تصویربرداری شده و داده های جمع آوری شده به عنوان ورودی الگوریتم های کالیبراسیون دوربین مورد استفاده قرار می گیرند و پارامترهای مورد نیاز استخراج می شوند. خروجی این بخش پارامترهای کالیبراسیون به ازای هر فاصله از میدان آزمون (D) است. باید توجه شود که پارامترهای لنز دوربین در هر فاصله از میدان آزمون ثابت نگه داشته شده است. در مرحله بعد، پس از تصویربرداری از میدان آزمون، از یک ساختمان در منطقه شهری با فاصله مناسب تصویربرداری انجام می شود.

در مرحله بعد، پارامترهای توجیه داخلی استخراج شده به عنوان ورودی در الگوریتم SfM وارد شده و این پارامترها در فرآیند بازسازی سه بعدی مختصات نقاط ثابت در نظر گرفته می شوند. ابرنقطه استخراج شده با استفاده از این پارامترها، در مرحله پایانی، از نظر دقت اقلیدسی مورد ارزیابی قرار می گیرند. روش ارزیابی به این صورت است که در ابر نقطه تولید شده فاصله بین طول های معلوم اندازه گیری شده و با مقدار واقعی آن مقایسه می شود. اختلاف بین طول بدست آمده و طول واقعی معیار ارزیابی دقت ابرنقطه تولید شده است. سپس در مرحله آخر از میانگین حسابی پارامترهای توجیه داخلی نیز استفاده می شود و نتایج بین حالات مختلف بررسی می شود.

اولین پارامتر متغییر در این بررسی مربوط به خصوصیات فنی دوربین مورد استفاده می شود. این پارامترها در حین جمع آوری داده های مورد نیاز بایستی ثابت باشند. در این بررسی از دو دوربین استریو استفاده شده است که فاصله کانونی آنها در تمام مراحل مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است. هم چنین لازم است دوربین از استحکام مناسبی برخوردار باشد و فاصله کانونی آنها تغییر پیدا نکند. فاصله بین دوربین ها با توجه به رابطه (۱) که توسط luhman و همکاران [۲۲] ارائه شده است برای اندازه گیری دقت مدل سازی سه بعدی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\delta_z = \frac{H^2}{b.f} \delta_{parallax} \quad (1)$$

که در آن H فاصله تا شی مورد نظر، خطای اندازه گیری مورد انتظار، خطای اندازه گیری پارالاکس و f فاصله کانونی دوربین است. دوربین های مورد استفاده در این بررسی FinePix REAL 3D W3 FUJIFILM با فاصله کانونی ثابت ۶.۳ میلیمتر است. باز اسمی بین دو لنز در این دوربین ۷۵ میلیمتر، سایز تصویر ۲۰۱۶*۳۵۸۴ پیکسل و سایز هر پیکسل ۰.۰۱۶ میلیمتر است. با در نظر گرفتن رابطه فوق دو دوربین در فاصله حدود ۴۰ سانتیمتری (فاصله بین



لنزهای چپ و راست) از هم قرار داده شده‌اند و در روی سکوی محکم نصب شدند طوری که در طی انجام تست ها بدون حرکت باشند. برای تصویربرداری همزمان دو دوربین از سیستم کنترل کننده از راه دور استفاده شد.



الف



ب

شکل ۱: دوربین مورد استفاده (الف) و نحوه قرارگیری دوربین های استریو (ب)

در مرحله بعد از میدان آزمون سه بعدی با تعداد ۴۰ تارگت برای کالیبراسیون استفاده و سه تست برای انجام کالیبراسیون در نظر گرفته شد. در این تست‌ها از میدان آزمون که در فاصله های ۲ متری، ۵ متری و ۱۰ متری از دوربین ها قرار دارد تصویربرداری شده و بدون خاموش شدن دوربین ها از یک ساختمان مسکونی شهری با بافت مناسب که در فاصله حدود ۷ متری از دوربین قرار دارد تصویر برداری صورت گرفت. در ۷ حالت مختلف از میدان آزمون تصویربرداری شد که تعداد تصاویر اخذ شده برای انجام کالیبراسیون جمعاً ۲۸ تصویر (۴ تصویر در هر حالت) خواهد شد. باید توجه شود که تصویربرداری در حالات مختلف، تنها شامل انتقال دوربین نباشد و دوران ها در زوایای مختلف نیز در حین تصویر برداری انجام پذیرد. شکل (۲) نمونه‌ایی از تصاویر گرفته شده از میدان آزمون در فاصله ۲ متری را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد از نمای ورودی ساختمان مسکونی ۴ تصویر در فاصله ۷ متری اخذ شده است. در روی ساختمان تارگت‌های کددار چسبانده شده است که برای ارزیابی دقت اقلیدسی مدل سه بعدی نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۲) تصویری از این ساختمان و محل قرار گیری این تارگت‌ها را نمایش می‌دهد.

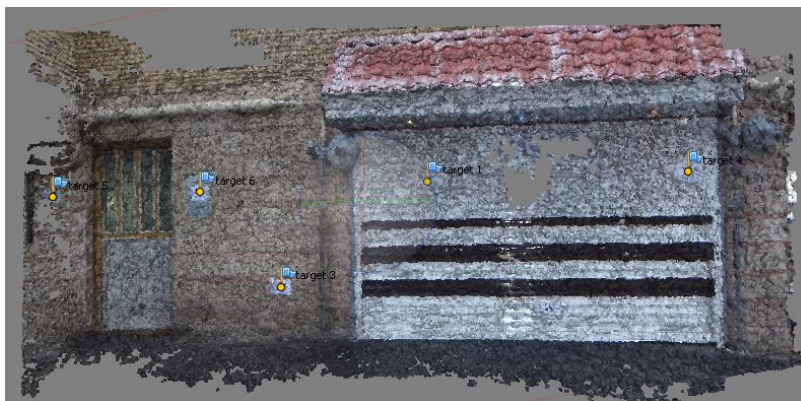


شکل ۲: نمونه تصویر میدان آزمون و محل قرار گیری تارگت‌های کددار

با استفاده از سه سری داده اخذ شده اطلاعات کالیبراسیون دوربین ها به کمک الگوریتم کالیبراسیون در نرم‌افزار Australis [۲۳] استخراج شد. هریک از پارامترهای توجیه داخلی بدست آمده به عنوان ورودی الگوریتم SfM در نرم‌افزار Agisoft [۲۴] داده شدند و این پارامترهای به عنوان پارامترهای پیش کالیبراسیون به شکل مقادیر ثابت در تهیه ابر نقطه مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای توجیه خارجی در هر مرحله نیز ثابت در نظر گرفته شد. فاصله بین تارگت‌های کددار از میانگین ۱۰ بار اندازه‌گیری بدست آمد. شکل (۳) ابر نقطه تولید شده توسط Agisoft را نمایش می‌دهد. در همه اندازه‌گیری از یک طول معلوم (فاصله بین تارگت‌های ۵ و ۶) برای مقیاس‌دهی به مدل استفاده شد و



سپس فاصله بین بقیه تارگت ها به عنوان معیار ارزیابی دقت مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه تارگت‌های کددار توسط نرم‌افزار شناسایی می‌شوند خطای نشانه‌گذاری تارگت‌ها نیز کم است.



شکل ۳- ابرنقطه تولید شده توسط نرم‌افزار Agisoft

۴- نتایج

پس از تصویربرداری از میدان آزمون و حل سرشکنی باندل پارامترهای توجیه داخلی و خارجی بدست می‌آیند. جداول زیر اطلاعات کالیبراسیون مربوط به توجیه داخلی دوربین‌ها و میزان دقت استخراج این پارامترها در فاصله‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این جداول، f فاصله کانونی، x_p و y_p مختصات مرکز تصویر، ضرایب $K1$ و $K2$ و $K3$ ضرایب اعوجاج شعاعی و ضرایب $P1$ و $P2$ ضرایب اعوجاج مماسی عدسی هستند.

جدول ۲: پارامترهای کالیبراسیون و میزان خطای آنها استخراج شده از میدان آزمون در فاصله ۲ متری

پارامترها		$f(mm)$	$x_p(mm)$	$y_p(mm)$	$K1$	$K2$	$K3$	$P1$	$P2$
دوربین اول	لنز چپ	6.2950	-0.0297	-0.0245	5.417e-03	-2.284e-04	1.006e-05	-1.325e-03	-1.648e-03
	میزان خطا	0.002	0.002	0.002	8.1972e-004	1.8793e-004	1.3339e-005	2.047e-004	2.100e-004
	لنز راست	6.2958	-0.0617	-0.1152	5.592e-03	-3.053e-04	1.541e-05	2.985e-04	-1.244e-03
	میزان خطا	0.002	0.002	0.002	8.9905e-004	2.0584e-004	1.4754e-005	1.655e-004	2.411e-004
دوربین دوم	لنز راست	6.4127	-0.2737	0.0826	2.890e-03	1.429e-04	-1.293e-05	2.060e-03	-1.513e-03
	میزان خطا	0.002	0.002	0.002	5.8395e-004	1.2150e-004	7.6975e-006	1.843e-004	1.432e-004
	لنز چپ	6.3284	-0.0972	0.0135	3.141e-03	1.920e-04	-1.612e-05	2.229e-03	-8.692e-04
	میزان خطا	0.002	0.002	0.002	6.5319e-004	1.5771e-004	1.1477e-005	1.818e-004	1.337e-004



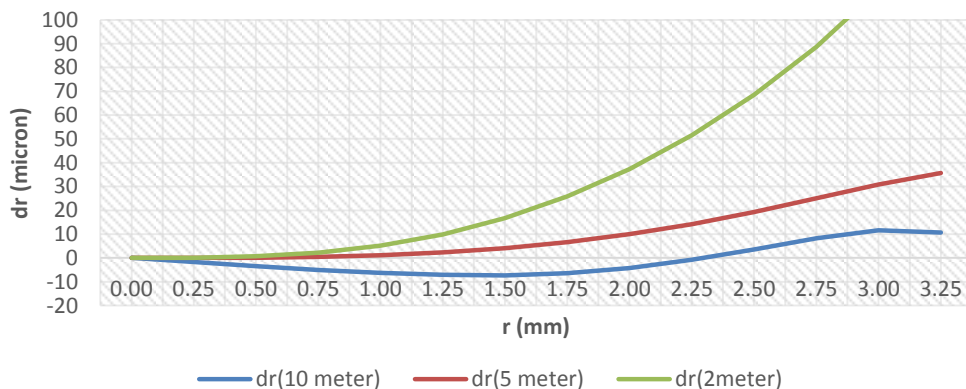
جدول ۳: پارامترهای کالیبراسیون و میزان خطای آنها استخراج شده از میدان آزمون در فاصله ۵ متری

پارامترها		$f(mm)$	$x_p(mm)$	$y_p(mm)$	$K1$	$K2$	$K3$	$P1$	$P2$
دوربین اول	لنز چپ	6.3025	-0.0109	0.0085	3.863e-03	1.738e-04	-1.364e-05	-9.212e-04	-2.722e-03
	میزان خطا	0.003	0.002	0.002	1.337e-004	1.9784e-004	1.4321e-005	1.833e-004	1.746e-004
	لنز راست	6.3007	0.0015	0.0018	5.655e-03	-2.200e-04	1.176e-05	4.427e-04	-2.834e-03
	میزان خطا	0.003	0.002	0.002	9.2108e-004	2.3754e-004	1.8763e-005	1.651e-004	1.791e-004
دوربین دوم	لنز چپ	6.3058	-0.0437	0.0080	-3.124e-04	3.068e-04	-1.524e-05	9.022e-04	-7.904e-04
	میزان خطا	0.003	0.002	0.002	1.1068e-003	3.6830e-004	3.7896e-005	2.026e-004	1.478e-004
	لنز راست	6.4072	-0.1788	0.0283	-7.391e-04	3.461e-04	-2.014e-05	3.604e-03	-1.372e-04
	میزان خطا	0.003	0.002	0.002	9.3208e-004	2.5316e-004	2.1392e-005	2.738e-004	1.316e-004

جدول ۴: پارامترهای کالیبراسیون و میزان خطای آنها استخراج شده از میدان آزمون در فاصله ۱۰ متری

پارامترها		$f(mm)$	$x_p(mm)$	$y_p(mm)$	$K1$	$K2$	$K3$	$P1$	$P2$
دوربین اول	لنز چپ	6.2997	-0.0004	-0.0008	4.276e-04	2.896e-04	-2.248e-05	2.984e-03	-1.466e-03
	میزان خطا	0.001	0.001	0.001	6.0095e-004	1.5676e-004	1.1616e-005	3.047e-004	3.002e-004
	لنز راست	6.3000	0.0005	-0.0001	-1.166e-03	7.720e-04	-6.228e-05	5.306e-03	-1.338e-03
	میزان خطا	0.001	0.001	0.001	6.9352e-004	2.1406e-004	1.8918e-005	3.001e-004	3.230e-004
دوربین دوم	لنز چپ	6.3001	-0.0008	0.0002	1.640e-03	-1.418e-04	1.265e-05	2.384e-03	-1.004e-03
	میزان خطا	0.001	0.001	0.001	6.9049e-004	1.8694e-004	1.5151e-005	3.759e-004	3.155e-004
	لنز راست	6.4100	-0.2044	0.0334	-6.412e-04	4.514e-04	-2.585e-05	5.035e-03	-8.623e-04
	میزان خطا	0.001	0.001	0.001	5.4681e-004	1.2156e-004	8.0705e-006	3.236e-004	3.223e-004

با بررسی نتایج ارائه شده در جدول فوق ملاحظه می‌شود که دقت برآورد پارامترهای فاصله کانونی و مختصات مرکز تصویر در کالیبراسیون با فاصله ۱۰ متری از صفحه آزمون، بالاتر است و میزان خطای برآورد این پارامترها ۰.۰۰۱ میلی‌متر است. نمودار (۱) مقایسه بین منحنی اعوجاج شعاعی عدسی در هر سه حالت را ارائه می‌دهد. این نمودار اعوجاج شعاعی کمتری را برای فاصله ۱۰ متری نشان می‌دهد در حالی که در فاصله ۲ متری بیشترین میزان اعوجاج برای دوربین وجود دارد.





اطلاعات کالیبراسیون مربوط به توجیه داخلی دوربین‌ها، به عنوان پارامتر ثابت در نرم افزار AgiSoft وارد شده و با کمک این اطلاعات از ساختمان مورد نظر ابر نقطه تهیه شده است. فاصله بین تارگت‌های کددار به عنوان معیار ارزیابی دقت بررسی شده اند. شکل (۲) محل قرار گیری این تارگت‌ها را مشخص می‌کند. جدول (۵) فاصله بین تارگت‌ها برای کنترل دقت اقلیدسی بدست آمده به کمک هر یک از پارامترهای کالیبراسیون را نشان می‌دهد.

جدول ۵: فاصله بدست آمده از هر تست کالیبراسیون در ابر نقطه تولید شده

شماره تارگت‌ها	طول واقعی (m)	طول بدست آمده با	طول بدست آمده با	طول بدست آمده با
		پارامترهای کالیبراسیون ۲ متری (m)	پارامترهای کالیبراسیون ۵ متری (m)	پارامترهای کالیبراسیون ۱۰ متری (m)
t5-t3	1.811	1.838	1.848	1.850
t3-t6	1.293	1.302	1.297	1.296
t5-t4	2.507	2.569	2.588	2.571
t1-t3	2.530	2.540	2.532	2.538

جدول (۶) اختلاف بین طول‌های بدست آمده با طول واقعی را برای هر یک از تست‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۶: فاصله بدست آمده از هر تست کالیبراسیون در ابر نقطه تولید شده

شماره تارگت‌ها	طول واقعی (m)	اختلاف طول بدست آمده با	اختلاف طول بدست آمده	اختلاف طول بدست آمده
		پارامترهای کالیبراسیون ۲ متری (m)	با پارامترهای کالیبراسیون ۵ متری (m)	با پارامترهای کالیبراسیون ۱۰ متری (m)
t5-t3	1.811	+0.027	+0.037	+0.039
t3-t6	1.293	+0.009	+0.004	+0.003
t5-t4	2.507	+0.062	+0.081	+0.064
t1-t3	2.530	+0.010	+0.002	+0.008

بررسی جدول (۵) و (۶) نشان می‌دهد که تغییر در فاصله کالیبراسیون از فاصله ۲ تا ۱۰ متری، دقت فاصله اقلیدسی بدست آمده در ابر نقطه تولید شده را به طور متوسط ۱ تا ۲ سانتیمتر تغییر می‌دهد. این تغییر، در فاصله بین تارگت ۱ تا ۴ که فاصله بیشتری از یکدیگر دارند محسوس‌تر است. این خطای بوجود آمده، ناشی از تغییر پارامترهای کالیبراسیون دوربین و تغییر دقت در برآورد آنها با توجه به تغییر فاصله از میدان آزمون می‌شود. با توجه به اینکه میزان خطای برآورد اطلاعات کالیبراسیون و میزان اعوجاج شعاعی در فاصله ۱۰ متری کمتر است، اختلاف طول بدست آمده با استفاده از این پارامترها قابل قبول است.

به طور کلی با توجه به اینکه در اندازه‌گیری‌ها وجود خطاهای اتفاقی امری اجتناب‌ناپذیر است، میانگین‌گیری از پارامترهای توجیه داخلی احتمال خطا را در نتایج بدست آمده کمتر می‌کند یا در صورت وجود خطا میزان آن را تعدیل می‌کند. براین اساس با توجه به مفاهیم تئوری خطاها از پارامترهای توجیه داخلی بدست آمده برای هر یک از دوربین‌ها (فاصله کانونی، مختصات مرکز تصویر و پارامترهای اعوجاج شعاعی و مماسی) میانگین حسابی گرفته شد و با استفاده از این پارامترها مدل‌سازی سه بعدی انجام گرفت. نهایتاً با کمک این پارامترها برای طول‌های اندازه‌گیری شده، نتیجه دقیق‌تری حاصل شد. جدول ۷ نتایج بدست آمده با استفاده از این پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول ۷: طول و اختلاف طول بدست آمده با مقدار واقعی با استفاده از میانگین پارامترهای توجیه داخلی

شماره تارگت‌ها	طول واقعی (m)	طول بدست آمده با	اختلاف طول بدست آمده با
		پارامترهای کالیبراسیون میانگین (m)	پارامترهای کالیبراسیون میانگین (m)
t5-t3	1.811	1.829	+0.018
t3-t6	1.293	1.292	-0.001
t5-t4	2.507	2.565	+0.058
t1-t3	2.530	2.534	+0.004



با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷ می‌توان گفت که اگرچه خطاهای سیستماتیک در کالیبراسیون دوربین بسیار مهم هستند ولی با استفاده از میانگین‌گیری از پارامترهای استخراج شده برای کالیبراسیون دوربین، می‌توان تا اندازه زیادی از میزان خطاهای اتفاقی که در حین اندازه‌گیری رخ می‌دهند کاست. به علاوه دیگر نتایج ارائه شده به وضوح نشان می‌دهند که ارتباط تنگاتنگی بین فاصله دوربین تا میدان آزمون جهت کالیبراسیون و دقت مدل تولیدی وجود دارد.

۵- نتیجه‌گیری

مدل‌سازی تصویر مینا به دلیل سرعت و قیمت مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این میان استفاده از سیستم‌های دوربین‌های استریو کالیبره شده به عنوان روش رایج در مدل‌سازی تصویر مینا بیشتر مورد استقبال و استفاده قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دقت مدل بدست آمده بسیار وابسته به پارامترهای کالیبراسیون دوربین در کاربردهای وسیع دارد. این حساسیت نشان می‌دهد که در مدل‌سازی از اشیا با فاصله دورتر از دوربین نیاز به دقت بالاتر در استخراج پارامترهای کالیبراسیون وجود دارد.

در این مقاله تاثیر پارامترهای توجیه داخلی دوربین بر روی دقت مدل تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. هدف افزایش دقت اقلیدسی مدل نهایی تولید شده که از شی با فاصله دور حاصل شده است. برای این منظور در سه مرحله از میدان آزمون مناسب در فاصله‌های ۲متری، ۵متری و ۱۰ متری تصویر برداری شد و برای هر کدام از فواصل پارامترهای توجیه داخلی دوربین استخراج شد. با حفظ پارامترهای توجیه خارجی دوربین‌ها، با تغییر پارامترهای توجیه داخلی ابر نقطه از ساختمان مسکونی با بافت مناسب تولید شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که استفاده از میانگین حسابی پارامترهای توجیه داخلی در کالیبراسیون دوربین در فواصل مختلف، دقت اقلیدسی بالاتری را ابرنقطه تولید شده ارائه می‌دهد.

مراجع

- [1]. Geiger, A., J. Ziegler, and C. Stiller. *Stereoscan: Dense 3d reconstruction in real-time*. in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*. 2011. IEEE.
- [2]. House, B. and K. Nickels, *Increased automation in stereo camera calibration techniques*. *J. Syst. Cyber. Inform*, 2006. **4**: p. 48-51.
- [3]. Fraser, C. and M. Shortis, *Vision metrology in industrial inspection: a practical evaluation*. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1994. **30**: p. 87-87.
- [4]. Fraser, C.S., *Photogrammetric measurement to one part in a million*. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1992. **58**(3): p. 305-310.
- [5]. Peng, J., *Comparison of three dimensional measurement accuracy using stereo vision*. 2011, Faculty of Graduate Studies and Research, University of Regina.
- [6]. Faugeras, O., *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*. 1993: MIT press.
- [7]. Tsai, R.Y., *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 1987. **3**(4): p. 323-344.
- [8]. Zhang, Z., *A flexible new technique for camera calibration*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2000. **22**(11): p. 1330-1334.
- [9]. Kim, J.-S. and I.S. Kweon, *Camera calibration based on arbitrary parallelograms*. *Computer Vision and Image Understanding*, 2009. **113**(1): p. 1-10.
- [10]. Sturm, P. and S. Ramalingam, *A generic concept for camera calibration*, in *Computer Vision-ECCV 2004*. 2004, Springer. p. 1-13.
- [11]. Zhang, Z., *Camera calibration with one-dimensional objects*. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2004. **26**(7): p. 892-899.
- [12]. Fryer, J., *Camera calibration*. *Close range photogrammetry and machine vision*, 1996: p. 156-179.



- [13]. Fraser, C.S., *Photogrammetric camera component calibration: A review of analytical techniques*, in *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. 2001, Springer. p. 95-121.
- [14]. Zhang, Z. *Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations*. in *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*. 1999. IEEE.
- [15]. Heikkila, J. and O. Silvén. *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction*. in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on*. 1997. IEEE.
- [16]. Bouguet, J.-Y., *Camera calibration toolbox for matlab*. 2004.
- [17]. Xiao, Z., et al., *A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view*. *Measurement*, 2010. **43**(6): p. 747-754.
- [18]. Xu, G.Y., L.P. Chen, and F. Gao. *Study on binocular stereo camera calibration method*. in *Image Analysis and Signal Processing (IASP), 2011 International Conference on*. 2011. IEEE.
- [19]. Dai, F., et al., *Comparison of image-based and time-of-flight-based technologies for three-dimensional reconstruction of infrastructure*. *Journal of construction engineering and management*, 2012.
- [20]. Dang, T., C. Hoffmann, and C. Stiller, *Continuous stereo self-calibration by camera parameter tracking*. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2009. **18**(7): p. 1536-1550.
- [21]. Strecha, C., et al. *On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery*. in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*. 2008. IEEE.
- [22]. Luhmann, T. *A historical review on panorama photogrammetry*. in *Proceedings of panoramic Photogrammetry workshop. Dresden, Germany*. 2004.
- [23]. www.photometrix.com.au.
- [24]. <http://www.agisoft.com/>.



Evaluation the effect of calibration distance on the accuracy of stereo camera 3D models

Mousavi, V. *¹, Varshosaz, M. ²

1- Ms.c student of photogrammetry in Department of Geomatics, College of Surveying Engineering, K.N.Toosi University of Technology

2- Associate Professor in Department of Geomatics, College of Surveying Engineering, K.N.Toosi University of Technology

Abstract

The Spatial accuracy of the point clouds obtained from stereo camera systems, in image-based 3D modeling methods, is very sensitive to the camera calibration parameters. To generate 3D models from urban environments, that camera is further from the objects, camera calibration accuracy is much more important so that gross errors in the estimation of these parameters may result failure in whole reconstruction process. In this paper, the effect of interior orientation parameters of stereo cameras on the Euclidean accuracy of generated point-clouds is evaluated. to do this, two stereo cameras are set next to each other with the base length of 40cm and images from different distances from the test field are taken and interior orientation parameters of each camera are extracted for each calibration distance. Using these parameters and keeping exterior orientation parameters fixed, other images from urban environment are acquired and a point-cloud is generated using structure from motion process. Known distances on the generated point-cloud are used as evaluation Criterion of the obtained point-clouds using each calibration data set. The results shows that using mean camera calibration parameters for interior geometry of the stereo cameras has better results on the Euclidean distance of the point-clouds.

Keywords: camera calibration, 3D reconstruction, point-cloud, SfM