

ارائه یک سیستم جدید اسکنراستریوپانوراما بر مبنای دوربین‌های استریو

وحید موسوی^{۱*}، مسعود ورشوساز^۲

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

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۷

چکیده

مدل‌های سه‌بعدی تولید شده از فضاهای شهری با توجه به کاربردهای وسیع آنها، مورد نیاز بسیاری از سازمان‌ها و ارگانها می‌باشند. در میان روشهای متعدد تولید مدل سه‌بعدی از فضاهای شهری، استفاده از تصاویر استریوپانوراما به دلیل پوشش کامل محیط اطراف بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله یک اسکنراستریوپانوراما با چینش جدید ارائه شده است که ساختار آن مبتنی بر دوربین‌های استریو است. این سیستم علاوه بر ایجاد قابلیت دید سه‌بعدی از محیط اطراف، امکان استخراج اطلاعات هندسی با دقت مناسب جهت مدل‌سازی های شهری را نیز فراهم می‌آورد. از مزایای این سیستم می‌توان به خودکارسازی فرآیند تناظریابی و تولید مدل سه‌بعدی در آن، تولید استریوپانوراما با دقت مکانی یکسان در همه نقاط و قابلیت استخراج مدل سه‌بعدی به شکل ابرنقطه با دقت بالا اشاره کرد. در این مقاله، ساختار سیستم شامل پیاده‌سازی سیستم، کالیبراسیون آن و نحوه تولید مدل سه‌بعدی از آن توضیح داده شده است. به‌علاوه نتایج تجربی ارزیابی قابلیت‌های سیستم نیز ارائه شده است. نتایج بررسی سیستم نشان می‌دهد که این سیستم قابلیت تولید مدل سه‌بعدی با دقت مناسب برای کاربردهای مدل‌سازی سه‌بعدی شهری را دارد. این نتایج نشان می‌دهند که در فاصله حدود ۱۵ متری از سیستم اسکنراستریوپانوراما، میزان خطای طول بین نقاط در حدود ۵۷ میلی‌متر است.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی تصویرمینا، کالیبراسیون، دوربین استریو، استریوپانوراما، مدل‌سازی سه‌بعدی.

* نویسنده مکاتبه کننده: وحید موسوی- تهران، خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد، پلاک ۱۳۴۶، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
 تلفن: ۰۹۱۸۶۲۰۹۹۴۶

۱- مقدمه

امروزه تولید مدل‌های سه بعدی از فضاهای شهری، نمایش محیط اطراف و اندازه‌گیری هندسی روی این مدل‌ها بسیار مورد توجه سازمان‌ها و ارگانهای مختلف قرار گرفته است. مدل‌های سه بعدی تولید شده از فضاهای شهری بایستی علاوه بر ایجاد نمایش واقعی از محیط اطراف، قابلیت استخراج اطلاعات هندسی را نیز داشته باشد. این مدل‌ها در زمینه‌های مختلف مانند صنعت بازی‌های رایانه‌ای [۱]، ناوبری و تولید نقشه برای وسایل متحرک مانند اتومبیل‌ها [۲]، تکمیل و به‌روزرسانی نقشه‌های شهری [۳]، آموزش و کاربردهای شبیه‌سازی برای مدیریت بحران [۴]، حفاظت عمرانی بناهای مهم شهری [۵]، کنترل بلایایی طبیعی و کنترل ترافیک [۶] استفاده شده و در سازمان‌های مختلفی مانند شهرداری‌ها، سازمان مدیریت بحران، سازمان برنامه‌ریزی شهری، سازمان میراث فرهنگی و سایر ارگان‌ها می‌تواند به‌طور گسترده‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد.

برای تولید مدل سه‌بعدی از فضاهای شهری روش‌های متعددی ارائه شده است که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به دو دسته روش‌های فاصله‌مبنا و تصویرمبنا تقسیم‌بندی کرد [۷]. روش‌های فاصله‌مبنا، اطلاعات هندسی شامل فاصله و مختصات را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری کرده و حجم بالایی از اطلاعات سه‌بعدی را با سرعت بالا و در مدت زمان کوتاهی تولید می‌کنند. تلفیق روش‌های فاصله مبنا و دوربین نیز تکنیک مفیدی برای بازسازی سه‌بعدی از فضاهای شهری به‌شمار می‌رود که علاوه بر مزایای زیاد آن‌ها، به دلیل وجود لیزر اسکنرها در ساختارشان بسیار پرهزینه هستند. روش‌های تصویرمبنا جایگزین مناسبی برای سیستم‌های فعال در کاربردهای بازسازی سه‌بعدی محیط شهری به‌شمار می‌آیند. در این روش‌ها اطلاعات هندسی تنها از تصویر استخراج می‌شوند و با توجه به کم‌هزینه بودن و قابلیت آن‌ها در ارائه دید واقعی و سه‌بعدی از محیط اطراف

بسیار بیشتر از روش‌های فعال مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در میان روش‌های تصویرمبنا، تکنیک‌های تصویربرداری استریوپانوراما، به دلیل ارائه میدان دید بسیار وسیع، ایجاد امکان دید سه‌بعدی از محیط اطراف و قابلیت استخراج اطلاعات هندسی از آن‌ها بسیار مورد علاقه و توجه قرار گرفته‌اند. هدف تمامی سیستم‌های تولید استریوپانوراما، رسیدن به نمایش جامع و کلی از محیط اطراف است که به بیننده قابلیت درک سه‌بعدی از محیط اطراف بدهد. برای این منظور سیستم‌های مختلف تولید استریوپانوراما با ساختارهای مختلف چپ‌نشین متعددی و با استفاده از تعداد متفاوتی دوربین ارائه شده‌اند. با این وجود هیچ‌یک از این سیستم‌ها، به دلیل وجود ضعف در ساختار فیزیکی خود، توانایی لازم برای تولید اطلاعات سه‌بعدی با دقت بالا از محیط اطراف را ندارند. بنابراین لازم است سیستمی با ساختار مناسب و با توجه به شرایط محیط شهری برای دستیابی به اطلاعات هندسی طراحی شده تا بر مشکلات موجود در این زمینه غلبه کند. در این مقاله ایده جدیدی برای چپ‌نشین دوربین‌های استریو برای غلبه بر مشکل مطرح شده ارائه شده است که امکان استخراج اطلاعات هندسی با دقت را فراهم می‌آورد.

در بخش بعدی این مقاله، مروری بر روی تحقیقات پیشین در این زمینه و بررسی سیستم‌های تولید استریوپانوراما انجام شده است. در بخش ۳ مبانی طراحی ساختار سیستم پیشنهادی مطرح شده در بخش ۴ نحوه کالیبراسیون آن توضیح داده شده است. بخش ۵ نیز روش تولید مدل سه‌بعدی از سیستم و در پایان نیز نتایج ارزیابی سیستم مطرح شده آورده شده است.

۲- مروری بر سیستم‌های تولید استریوپانوراما

در این مقاله، جهت بررسی کارایی سیستم‌های مطرح شده در تحقیقات پیشین با در نظر داشتن ساختار فیزیکی اجزای آن‌ها، دسته‌بندی و ارزیابی سیستم‌ها

یک نوار باریک از سمت چپ و یک نوار باریک از سمت راست آن انتخاب می‌شوند و با چرخش دوربین تمامی نوارهای سمت چپ و تمامی نوارهای سمت راست موزائیک شده و تولید دو پانوراما می‌نمایند. سیستم آنها مشهورترین تکنیک تصویربرداری پیوسته است که با وجود سادگی و اقتصادی بودن سخت‌افزار آن، تصاویر با کیفیت بالا ارائه می‌دهد.

با ترکیب دوربین و آینه‌های مختلف می‌توان استریو پانوراما تولید کرد. در این سیستم‌ها با استفاده از آینه‌ها تمام محیط ۳۶۰ درجه را پوشش می‌دهند. استفاده از ترکیب آینه و دوربین منجر به تولید مدل تک دید^۱ می‌شود. یکی از اولیه‌ترین سیستم‌ها در این زمینه، در سال ۱۹۹۶ توسط سوئول و همکاران [۱۰] ارائه شد. این سیستم دوربینی است که از آینه‌های هم‌محور محدب استفاده کرده است. کاربرد اصلی این سیستم در تهیه و تولید نقشه عمق از زمین است. پلج و همکاران [۱۱] سیستم جدیدی را ارائه کردند که با استفاده از یک لنز مارپیچ پیچیده، قادر است که تصاویر چندسویه به صورت آنی بدون چرخش دوربین اخذ کند. این سیستم، نور ورودی را آنچنان شکست می‌دهد که به نظر می‌رسد که از چند زاویه دید، از صحنه تصویربرداری شده است. این سیستم می‌تواند راه‌حل مناسبی برای اخذ تصاویر پانوراما از صحنه‌های دینامیک باشد. چان و همکاران [۱۲] سیستمی را ارائه کردند که در آن یک آینه دوران کرده و یک دوربین به طور پیوسته تصاویر را از صحنه اخذ می‌کند. ایده این سیستم، از سیستم‌های آندوسکوپی پزشکی الهام گرفته شده است. این سیستم برای کاربردهایی مانند ساخت فروشگاه‌های مجازی و موزه‌های مجازی طراحی شده است. آرنسپنگ با قرار دادن آینه در جلوی دوربین تصویری از محیط را در یک فریم تولید نمود. [۱۳]. در سیستم آنها، دو آینه به صورت موازی در اطراف دوربین قرار داده شد که با

با توجه به تعداد دوربین‌های به کار گرفته شده در ساختارشان انجام شده است. بر این اساس این سیستم‌ها را می‌توان به سه دسته به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- سیستم‌های تولید استریوپانوراما مبتنی بر یک دوربین
- سیستم‌های تولید استریوپانوراما مبتنی بر دو دوربین
- سیستم‌های تولید استریوپانوراما مبتنی بر ترکیب چند دوربین

۲-۱- سیستم‌های تولید استریو پانوراما مبتنی بر یک دوربین

در این سیستم‌ها تنها از یک دوربین برای تولید استریوپانوراما استفاده می‌شود. در این روش، یک دوربین را با ساختارهای متفاوتی طوری قرار می‌دهند که بتوان استریوپانوراما را از آن استخراج کرد. یکی از این روشها، برای تولید استریوپانوراما از موزائیک کردن تصاویر گرفته شده توسط یک دوربین استفاده می‌کند. در این روش، با استفاده از یک دوربین و موزائیک کردن تصاویر اخذ شده از آن، استریوپانوراما ساخته می‌شود. معمولا دوربین حول نقطه نودال آن چرخش داده می‌شود ولی ساختار بازسازی سه بعدی محیط از آن قابل استخراج نیست. اولین تلاش‌ها در این زمینه توسط ایشیگاری و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۲ انجام شد. آنها سیستم‌های تولید استریوپانوراما با استفاده از دوربین تکی ارائه نمودند. این سیستم بر مبنای دوران دوربین تکی حول محور عمودی آن برای کاربردهای هدایت روبات‌ها طراحی شده بود. پلج و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۹ ایده مطرح شده فوق را پیگیری کردند. در روش آنها یک دوربین چرخشی استفاده می‌شود که حول نقطه‌ایی در خارج مرکز تصویرش دوران می‌کند. در هر چرخش، دوربین تصاویری را اخذ می‌کند که در هر تصویر آن،

¹ Single view point

موتور دوران دهنده اول است استوار شده است. اینسورث و همکاران [۱۸] روش فوق را مجدداً بررسی کرده و سیستم دوران کننده جدیدی مبتنی بر دو دوربین ارائه کردند که مشکلات اتصال تصاویر را نسبت به سیستم قبل خودش تا حدی حل کرده است. روش مطرح شده توسط آنها می تواند تصاویر استریو-پانوراما را بر اساس موزائیک کردن قسمت های مشترک تصاویر تولید کند. برای تست این سیستم از دو سیستم دوربین دیجیتال پاناسونیک لومیکس و سیستم دوران کننده گیگان اپیک استفاده کردند. در یکی دیگر از متداول ترین روش های تولید استریو پانوراما می توان از دو دوربین معمولی قاب مینا با طول پایه مشخص استفاده کرده و با چرخش آنها استریوپانوراما تولید کرد. هوآنگ و همکاران [۱۹] با استفاده از دو دوربین چرخشی استریو پانوراما تولید کرد. همچنین ورشوساز و همکاران [۲۰] در این زمینه مطالعاتی انجام داده اند. در سیستم ورشوساز و همکاران دو دوربین قاب مینا به صورت افقی روی یک میله نصب شده و دوران حول محور میانی صورت گرفته و استریوپانوراما تولید شده است. به دلیل استفاده از دوربین های قاب مینا در این روش استریو پانورامای تولیدی دارای کیفیت مناسبی می باشد. در این روش دوربین ها طوری در کنار هم قرار می گیرند که دارای محور دوران مشترک هستند و در هنگام تصویربرداری، هر دو دوربین حول یک محور دوران می کنند.

گلاکمن و همکاران [۲۱] از دو دوربین هم محور که طول پایه عمودی دارند برای تولید استریوپانوراما استفاده کرده اند. با استفاده از این سیستم، امکان تخمین موقعیت سه بعدی یک نقطه در فضا فراهم می شود. هرچقدر مقدار طول پایه بین دو دوربین بیشتر باشد دقت تعیین موقعیت نیز بیشتر است.

هوآنگ و همکاران [۲۲] سیستمی مبتنی بر دو دوربین را در سال ۱۹۹۶ ارائه دادند. سیستم آنها که *PSI-II* نام دارد به راحتی تصاویر استریوپانورامای واقعی

محور نوری دوربین موازی است. از این سیستم برای کاربرد تهیه نقشه عمق استفاده می شود.

۲-۲- سیستم های تولید استریو پانوراما مبتنی بر دو دوربین

در این روش ها از ترکیب دو دوربین برای ساخت استریوپانوراما بهره گرفته می شود. استفاده از ترکیب دو لنز چشم ماهی و ساخت دو تصویر پانورامای کروی برای تشکیل استریوپانوراما یکی از این روشهاست. هوآ و همکاران [۱۴] سیستم استریوپانورامایی بر مبنای لنز چشم ماهی طراحی کردند به شکلی که دو دوربین با لنزهای چشم ماهی برای پوشش محیط روی یکدیگر قرار داده و با استفاده از سیستم دوران کننده محیط را اسکن کرده و استریو پانوراما تولید می کنند. در این سیستم طول پایه بین دو پانورامای تولید شده عمودی است.

در راه حل دیگر برای تولید استریوپانوراما از چینش افقی یا عمودی دوربین های آرایه خطی استفاده می کنند. لی و همکاران [۱۵] دو دوربین آرایه خطی را روی یک میله افقی با فاصله های تقریباً یکسان از محور دوران سوار کرده و به وسیله آن استریوپانوراما تولید کردند. سیستم آنها از روش خارج محوری^۱ برای تولید استریوپانوراما استفاده می کند. سیستم های تجاری دیگری که با استفاده از دوربین های آرایه خطی استریوپانوراما تولید می کنند مانند سیستم پانواسکن ام ۴ [۱۶] نیز وجود دارند که سیستم هایی داخل محوری^۲ هستند.

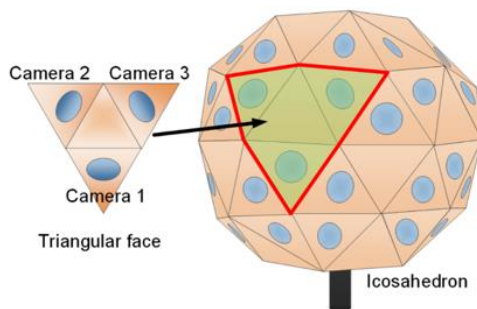
رومین و همکاران [۱۷] سکویی دوران کننده با دو درجه آزادی ارائه کردند که قادر است در دو جهت حرکت کرده و تصاویر چندسویه کروی اخذ کند. ساختار این سنسور بر پایه دوران دو دوربین آرایه خطی که مرکز محور نوری آنها عمود بر محور دوران

¹ Off axis

² In axis



شکل ۱: سیستم ارائه شده توسط یاکوتا و همکاران [۲۳]



شکل ۲: سیستم ارائه شده توسط شیمیدا و همکاران [۲۴]

اخیرا شرکت سامسونگ دوربینی را تحت عنوان *Project Beyond* ارائه کرده است [۲۷] که ادعا می‌شود اولین دوربین سه‌بعدی چند سوپه در دنیاست. این سیستم دارای ۱۶ دوربین با چینش پیشرفته است که محیط اطراف را در تمام جهات به صورت استریو تصویربرداری می‌کند. این سیستم دارای ۱۶ دوربین برای پوشش محیط اطراف و یک دوربین در قسمت بالا است که هرکدام از دوربین در رئوس یک هشت ضلعی منتظم قرار گرفته‌اند و به صورت استریو با طول پایه کوچک تصویربرداری را انجام می‌دهند. موسسه تحقیقاتی فرانسه فرنیس هرتر [۲۸] سیستم چند دوربینه بر پایه چند آینه را ارائه کرده است که قادر است تصاویر پانورامای ویدئویی دو بعدی و سه بعدی برای کاربردهای متفاوت اخذ کند. این سیستم، با نام *OmnCam-360* که قادر به پوشش محیط ۳۶۰ درجه است، از ۱۰ آینه که با زاویه ۳۶ درجه کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند تشکیل شده است که در زیر هرکدام از آینه‌ها

برای کاربردهای واقعیت مجازی تولید می‌کند. سیستم دوران‌کننده آنها از متشکل از دو دوربین است که یک دوربین در مرکز و حول نقطه نودالشان دوران می‌کند و یک دوربین دیگر در خارج از این محور دوران می‌کند که تصویری دارای پارالاکس را از محیط اخذ می‌کند.

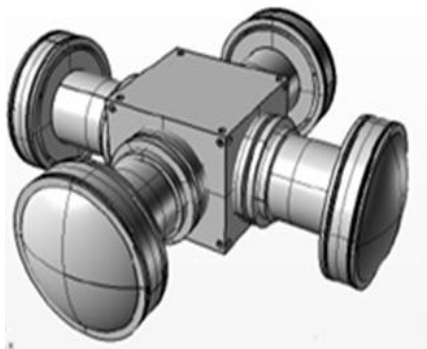
۲-۳- سیستم‌های تولید استریو پانوراما مبتنی بر چند دوربین

در این روشها از ترکیب چند دوربین برای تولید استریوپانوراما استفاده می‌شود. استفاده از دوربین‌های چندبخشی که خود ترکیبی از چند دوربین می‌باشند یکی از روشها در این دسته است. یاکوتا و همکاران [۲۳] سیستمی مبتنی بر ۳۶ دوربین به شکل یک توپ ارائه دادند که قادر است تصاویر رنگی از تمام جهات اخذ کند. سیستم چندسویه استریو آنها میدان دید کامل بدون هیچ ناحیه پنهانی در اختیار قرار می‌دهد. شکل (۱) نمایی از این سیستم را نشان می‌دهد.

روش دیگری برای تولید تصاویر استریوپانوراما در یک ساختار بیست وجهی توسط شیمیدا و همکاران [۲۴] و توسط تاناشی و همکاران [۲۵, ۲۶] ارائه شد. این سیستم قادر است تا تصاویر از همه جهات را با کمک ۶۰ دوربین اخذ کند. تمام دوربین‌ها در این سیستم با قدرت تفکیک مکانی بالا هستند و جهت قرارگیری هر دوربین بر قدرت تفکیک مکانی نهایی آن تاثیری ندارد. در این سیستم هر سه دوربین به‌عنوان یک بخش واحد در نظر گرفته شده است که قادر است نقشه عمق را با سرعت بالایی اخذ کند. همچنین در هر وجه آن، تنها از یک دوربین برای ساخت پانورامای کروی استفاده می‌شود. شکل (۲) نمایی از این سیستم را نشان می‌دهد.

ساخته شده است و قادر است که اطلاعات سه بعدی را از تمام محیط اطراف ارائه دهد و یک تصویر پانوراما را به شکل همزمان بدون هیچ نقطه پنهانی از محیط در 360×360 اخذ کند. هر تصویر اخذ شده در این روش حداقل ۹۰ درجه پوشش مشترک دارند که ارائه دهندگان این سیستم با موزائیک کردن تصاویر استریو اخذ شده بعد از حذف اعوجاجات لنز، تصویر استریو پانورامای کامل تولید می کنند. شکل (۵)

شمای این سیستم را نمایش می دهد. امینی و همکاران [۳۱] سیستم تولید استریو پانوراما مبتنی بر دوربین های استریو را ارائه نموده است. سیستم آنها دارای ۱۰ دوربین استریو است که با زاویه ای حدود ۳۶ درجه نسبت به هم قرار گرفته اند. در این سیستم از چند دوربین استریو استفاده شده است که روی محیط یک صفحه دایره ای قرار گرفته اند. در این سیستم هر زوج تصویر تشکیل یک مدل استریو می دهند. سیستم ساخته شده توسط ایشان در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۵: دوربین ارائه شده توسط فنگ و همکاران [۳۰]



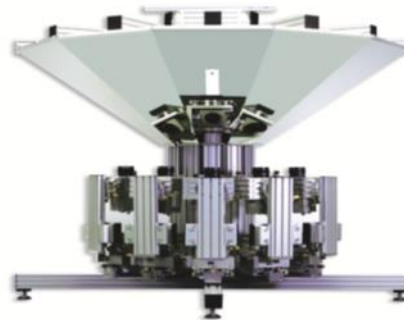
شکل ۶: سیستم ارائه شده توسط امینی و همکاران [۳۱]

دوربین هایی قرار دارند. این تصاویر اخذ شده از هر کدام از دوربین ها با یکدیگر موزائیک شده و قابلیت ضبط شدن به فرمت HD را دارد. تصویر این سیستم را شکل (۴) نمایش می دهد.

در روش دیگر از دوربین های مختلف و همزمان سازی آنها با هم، برای پوشش کامل محیط و تولید استریو پانوراما استفاده می شود. پیرس و همکاران [۲۹] دوربین چندسویه ای بر اساس پوشش سطح کروی با استفاده از تصاویر اخذ شده از چندین دوربین با زاویه باریک را پیشنهاد دادند. ایده این روش، استفاده از موزائیک کردن تصاویر اخذ شده از دو دوربین همسایه می باشد. با استفاده از این ایده، تصاویر اخذ شده از گروهی از این دوربین ها برای تشکیل پانورامای کروی سمت راست و گروهی دیگر برای تشکیل پانورامای کروی سمت چپ مورد استفاده قرار گرفته و موزائیک تصویری می شوند.



شکل ۳: دوربین ارائه شده توسط سامسونگ [۲۷]



شکل ۴: دوربین ارائه شده توسط موسسه تحقیقاتی فرانیهوفر هنریخ هرتز [۲۸]

فنگ و همکاران [۳۰] سیستم دوربین چند سویه را ارائه کردند که از ترکیب لنزهای چشم ماهی

۳- طراحی سخت‌افزاری سیستم اسکنر استریوپانوراما

با توجه به وجود عوارض متحرک در فضای شهری و لزوم پوشش آبی محیط، همچنین حذف اثرات ناشی از لرزش دوربین‌ها، سیستم اسکنر استریوپانوراما با استفاده از چند دوربین همزمان‌سازی شده طراحی شده و جز دسته روش‌های مبتنی بر چند دوربین است. در طراحی سیستم پیشنهادی، ضعف طول پایه کم دوربین‌های استریوی مورد استفاده می‌بایست به نحوی با تغییر چینش دوربین‌ها برطرف شود تا اطلاعات هندسی با دقت بالاتری قابل استخراج باشند. برای این منظور در ادامه مسائل مرتبط با طراحی سخت‌افزاری سیستم مانند حداقل فاصله برای ایجاد پوشش و زاویه بین دوربین‌های استریو مطرح می‌شوند.

۳-۱- حداقل فاصله برای ایجاد پوشش

با توجه به اینکه در این سیستم دو دوربین استریو با زاویه دید افقی Φ همزمان با هم تصویربرداری را انجام می‌دهند لذا برای هر جفت دوربین استریو در صورتی که مقدار طول پایه BI را برای لنزهای دور جفت دوربین‌های استریو و طول پایه $B2$ را برای لنزهای نزدیک در نظر گرفته شود با توجه به شکل (۸) حداقل فاصله دوربین‌های دور تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک (D) و حداقل فاصله دوربین‌های نزدیک تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک (DI) از روابط (۱ و ۲) قابل محاسبه است.



شکل ۷: سیستم ارائه شده توسط تریمبل [۳۲]

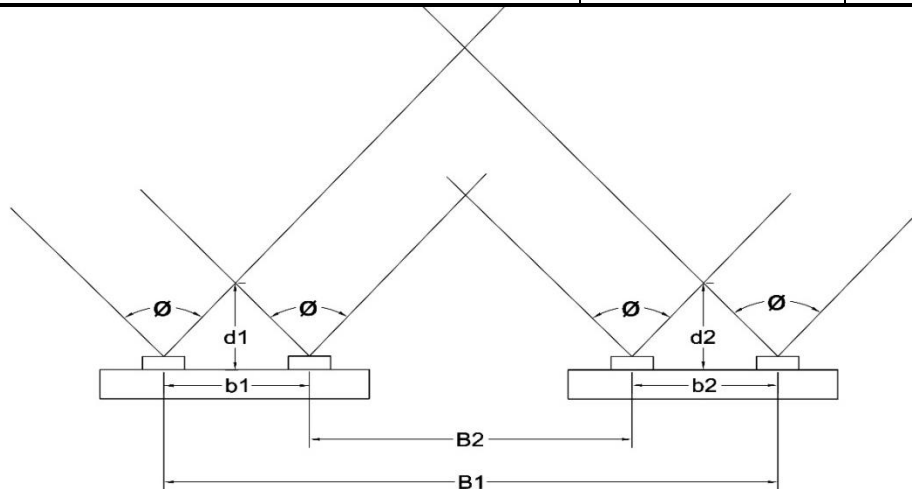
سیستم تصویربرداری تریمبل $V10$ [۳۲] محصول شرکت تریمبل از ۱۲ دوربین جهت تولید تصاویر پانورامای ۳۶۰ درجه از محیط استفاده می‌کند. این سیستم جهت مدل‌سازی سه‌بعدی از مفاهیم هندسه پانوراما استفاده می‌کند. دقت قابل حصول از این سیستم وابسته به فاصله بین ایستگاه‌های تصویربرداری و فاصله هریک از ایستگاه‌ها تا عوارض مکانی است. در صورت تامین هندسه تصویربرداری مناسب، این سیستم در فاصله ۱۰ متری از عوارض به دقت یک سانتیمتر خواهد رسید. شکل (۷) این سیستم را نمایش می‌دهد.

۲-۴- جمع‌بندی سیستم‌های ارائه شده

هریک از روش‌های مطرح شده در کنار مزایا و محاسن خود دارای نقاط ضعف و محدودیت‌هایی در به‌کارگیری آنها برای بازسازی سه‌بعدی مناطق شهری هستند که این محدودیت‌ها در انجام فرآیند مدل‌سازی مشکلات و چالش‌های فراوانی را ایجاد می‌کنند. جدول (۱) محدودیت‌ها و نقاط ضعف هریک از این سیستم‌ها را مطرح می‌کند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت که سیستم‌های موجود دارای توانایی لازم برای تولید اطلاعات سه‌بعدی از محیط شهری با دقت از محیط اطراف را به‌دلیل ضعف در ساختار فیزیکی خود ندارند. بنابراین لازم است سیستمی با سخت‌افزار مناسب و با توجه به شرایط محیط شهری برای دستیابی به اطلاعات هندسی طراحی شده تا بر مشکلات موجود در این زمینه غلبه کند.

جدول ۱: سیستم‌های موجود تولید استریوپانوراما و نقاط ضعف و محدودیت های هر یک از آنها

نقاط ضعف و محدودیت‌ها	روش تولید استریو پانوراما
<ul style="list-style-type: none"> ❖ عدم پوشش آنی ۳۶۰ درجه محیط ❖ زمان بر بودن تولید استریو پانوراما و تاثیر عوارض متحرک ❖ عدم تناسب شکل و ساختار سیستم برای محیط شهری با توجه به مکانیزم دورانی 	موزائیک کردن تصاویر تک دوربین سیستم‌های مبتنی بر تک دوربین
<ul style="list-style-type: none"> ❖ کیفیت پایین تصاویر به دلیل اعوجاجات ❖ عدم برجسته بینی در آنها با توجه به نوع ساختار ❖ نیاز به اعمال تصحیح تصاویر ❖ سختی استخراج اطلاعات هندسی در این ساختار 	ترکیب دوربین و آینه های مختلف
<ul style="list-style-type: none"> ❖ اعوجاج بسیار زیاد تصاویر حاصل ❖ نیاز به تصحیح کامل تصاویر ❖ هندسه پیچیده و سختی استخراج اطلاعات هندسی ❖ عدم برجسته بینی در آنها با توجه به نوع ساختار 	استفاده از لنز چشم ماهی
<ul style="list-style-type: none"> ❖ عدم پوشش آنی محیط ❖ زمان بر بودن تولید استریو پانوراما و تاثیر عوارض متحرک ❖ نیاز به اخذ تصاویر زیاد ❖ عدم برجسته بینی در آنها با توجه به نوع ساختار 	استفاده از سنجنده‌های آرایه خطی
<ul style="list-style-type: none"> ❖ عدم پوشش آنی محیط ❖ زمان بر بودن تولید استریو پانوراما و تاثیر عوارض متحرک ❖ عدم برجسته بینی در آنها با توجه به نوع ساختار 	استفاده از دوربین‌های فریم تاپ
<ul style="list-style-type: none"> ❖ عدم برجسته بینی در آنها با توجه به نوع ساختار ❖ دقت پایین استخراج اطلاعات هندسی به دلیل طول پایه کم 	استفاده از دوربین‌های چند بخشی



شکل ۸: حداقل فاصله دوربین‌ها تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک

به شکل زیر رابطه بین زاویه θ و Δ به صورت زیر قابل بیان است

$$2\Delta - \theta = 180 \quad \text{رابطه (۳)}$$

حداقل فاصله دوربین‌ها تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک بین دوربین‌های مجاور برای ایجاد امکان اتصال بین ابرنقاط و تصاویر (H)، با در نظر گرفتن p درصد پوشش بین تصاویر و فاصله بین دوربین‌های مجاور در روی سکوی سیستم (x) از رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

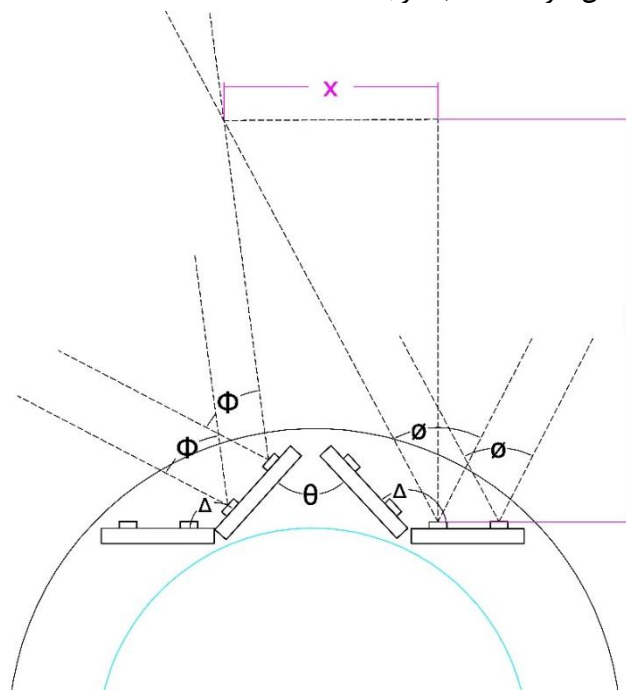
$$H = \frac{x}{2 \tan(\frac{\phi}{2})(1-p)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$D = \frac{B1}{2 \tan(\frac{\phi}{2})} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$D1 = \frac{B2}{2 \tan(\frac{\phi}{2})} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۳-۲- زاویه بین دوربین‌های استریو

برای پیاده‌سازی سیستم، می‌بایست چگونگی قرارگیری دوربین‌ها روی سکوی نگه‌دارنده تعیین شود. در این حالت شعاع سکو با توجه به رعایت پوشش دو دوربین، برای رسیدن به حداکثر طول پایه بین دو دوربین استریو نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. محل قرارگیری دو دوربین در روی سکوی نگه‌دارنده با تعیین دو زاویه θ و Δ مشخص خواهد شد. با توجه



شکل ۹: حداقل فاصله دوربین‌ها تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک بین دوربین‌های مجاور

پارامترهای طراحی سیستم اسکتر استریو به صورت زیر خواهد بود:

حداقل فاصله دوربین‌های دور تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک (D) برابر با ۸ متر و حداقل فاصله دوربین‌های نزدیک تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش مشترک ($D1$) برابر ۵ متر است. حداقل

۳-۳- ایجاد سیستم اسکتر استریوپانوراما

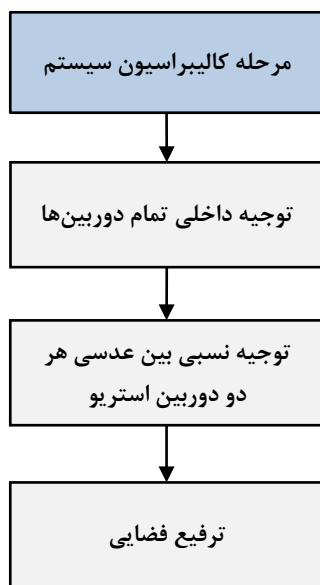
برای پیاده‌سازی سیستم اسکتر استریوپانورامای پیشنهادی، از تعداد ۱۶ دوربین استریو *Fujifilm FinePix Real 3D W3* استفاده شده است. مشخصات فنی دوربین‌ها در جدول (۲) آورده شده است. با توجه به مشخصات فنی دوربین و مسائل مطرح شده، مقادیر

۴- کالیبراسیون سیستم اسکنر استریو پانوراما
 کالیبراسیون صحیح سیستم اسکنراستریوپانوراما،
 تاثیر مهمی در نتایج حاصل شده از آن دارد. برای
 سیستم ارائه شده، باتوجه به اینکه پارامترهای
 کالیبراسیون به طور مستقیم در مراحل بعد
 مورد استفاده قرار می گیرند، این مرحله از اهمیت
 به سزایی برخوردار است. کالیبراسیون سیستم اسکنر
 استریوپانوراما شامل سه مرحله تعیین
 پارامترهای توجیه داخلی برای هر دوربین،
 تعیین پارامترهای توجیه نسبی برای زوج عدسی
 هر دوربین استریو و در نهایت انجام ترفیع فضایی برای
 استخراج پارامترهای توجیه خارجی هریک از دوربینها
 در روی سیستم اسکنر استریوپانوراما است.

فاصله دوربینها تا عارضه برای شروع ایجاد پوشش
 مشترک بین دوربینهای مجاور برای ایجاد امکان
 اتصال بین ابرنقاط و تصاویر ۴/۴ متر است.
 برای ساخت سکوی نگه دارنده دوربین های استریو از
 صفحه از جنس لترون^۱ با ضخامت یک سانتیمتر، به-
 دلیل وزن سبک و عدم انعطاف پذیری آن و ایجاد امکان
 حمل و نقل آسان سیستم و ریل های نگه دارنده دوربین
 استفاده شد. هم چنین جهت همزمان سازی دوربینها
 از یک کنترل کننده الکترونیکی با قابلیت کنترل
 از راه دور استفاده شد. شکل (۱۰) این سیستم را با ۶
 دوربین نصب شده بر روی آن نمایش می دهد.
 این سیستم با ۶ دوربین نصب شده بر روی آن
 قابلیت اخذ تصاویر با زاویه دید ۱۶۰ درجه را
 دارا می باشد.

جدول ۲: مشخصات فنی دوربین مورد استفاده

۳۶۴۸×۲۷۳۶	حداکثر رزولوشن (پیکسل)
۷۵ میلیمتر	طول پایه اسمی
۵۴ درجه	زاویه دید افقی (Φ)
۴۴ درجه	زاویه دید قائم
۶,۱۷×۴,۵۵	سایز سنسور (میلیمتر)
۱۲۴×۶۶×۲۸	ابعاد دوربین (میلیمتر)
CCD	نوع سنسور

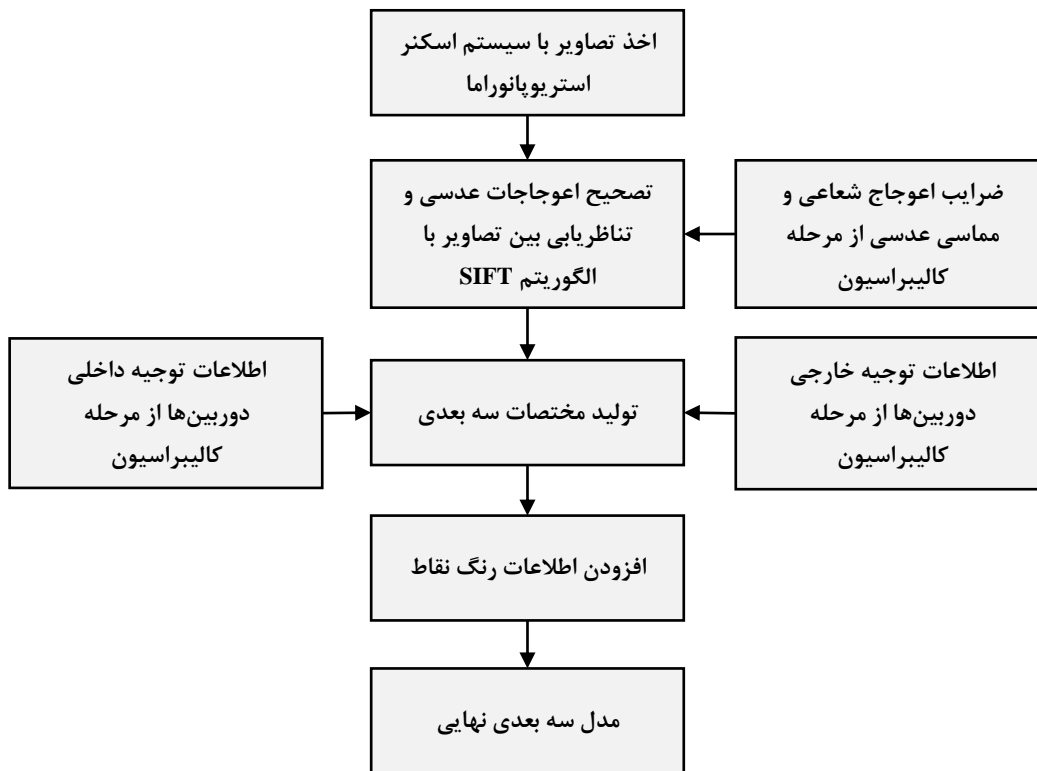


شکل ۱۱: فلوچارت روش کالیبراسیون سیستم اسکنر استریوپانوراما



شکل ۱۰: نمایشی از سیستم اسکنر استریوپانوراما ساخته شده

¹ Letron



شکل ۱۲: فلوچارت روش تولید مدل سه بعدی از سیستم اسکتر استریوپانوراما

۵- تولید مدل سه بعدی

پس از کالیبراسیون سیستم اسکتر استریوپانوراما، تصاویر اخذ شده از آن برای تولید مدل سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فلوچارت روش تولید مدل سه بعدی از سیستم اسکتر استریوپانوراما در شکل (۱۲) نمایش داده شده است. مدل‌های سه بعدی تولید شده به یکدیگر متصل می‌شوند تا مدل سه بعدی یکپارچه از محیط ایجاد شود. برای تولید مدل سه بعدی از تکنیک استریوویژن استفاده می‌شود. این تکنیک روشی برای به دست آوردن اطلاعات سه بعدی از دو یا چند تصویر پوشش دار است. برای تولید مدل سه بعدی با معلوم بودن المان‌های توجیه داخلی و خارجی هر یک از تصاویر، نیاز به تناظریابی وجود دارد. برای این منظور از الگوریتم *sift* که توسط لو و همکاران [۴۳]

ارائه شده است استفاده می‌شود. این الگوریتم نسبت به تغییرات مقیاس، روشنایی و تغییرات کوچک در زاویه دید دوربین نامتغیر است [۵۳]. پس از تناظریابی با استفاده از الگوریتم *sift* و استخراج جفت نقاط متناظر از تصاویر چپ و راست، تولید مختصات سه بعدی برای هر نقطه تصویری به صورت زیر خواهد بود. در این روابط X, Y, Z مختصات زمینی نقاط و x_1, x_2, x_3 مختصات تصویری نرمال نشده آنها می‌باشد. با اعمال ماتریس عناصر توجیه داخلی، مختصات نرمال شده \tilde{p}_n قابل محاسبه است. با توجه به آنکه \tilde{p}_n مختصات تصویری هموزن است برای به دست آوردن مختصات تصویری (x و y) می‌بایست عناصر x_1 و x_2 بر x_3 تقسیم شوند. بر این اساس داریم:

$$\underbrace{k^{-1}}_{\tilde{P}_n} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}^{world} \rightarrow \begin{cases} x = \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} \\ y = \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} \end{cases}$$

در تقاطع فضایی، با استفاده از رابطه فوق برای هر یک از تصاویر چپ و راست خواهیم داشت:

$$x_L = (r_{11(L)}X + r_{12(L)}Y + r_{13(L)}Z + t_{x(L)}) / (r_{31(L)}X + r_{32(L)}Y + r_{33(L)}Z + t_{z(L)}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$y_L = (r_{21(L)}X + r_{22(L)}Y + r_{23(L)}Z + t_{y(L)}) / (r_{31(L)}X + r_{32(L)}Y + r_{33(L)}Z + t_{z(L)})$$

$$x_R = (r_{11(R)}X + r_{12(R)}Y + r_{13(R)}Z + t_{x(R)}) / (r_{31(R)}X + r_{32(R)}Y + r_{33(R)}Z + t_{z(R)}) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$y_R = (r_{21(R)}X + r_{22(R)}Y + r_{23(R)}Z + t_{y(R)}) / (r_{31(R)}X + r_{32(R)}Y + r_{33(R)}Z + t_{z(R)})$$

ماتریس توجیه خارجی و K ماتریس المان‌های داخلی که در مرحله کالیبراسون به دست آمده‌اند و به صورت زیر هستند:

در معادلات بالا x_L و y_L و x_R و y_R به ترتیب مختصات نقاط متناظر در تصاویر سمت چپ و راست و X, Y, Z مختصات زمینی نقاط هستند. همچنین r_{11} تا r_{33} عناصر دورانی و t_x, t_y, t_z عناصر انتقالی

$$M_{ext} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \quad \text{و} \quad K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

با استفاده از روابط (۵) و (۶) داریم:

رابطه (۷)

$$\begin{pmatrix} r_{11(L)} - x_L r_{31(L)} & r_{12(L)} - x_L r_{32(L)} & r_{13(L)} - x_L r_{33(L)} \\ r_{21(L)} - y_L r_{31(L)} & r_{22(L)} - y_L r_{32(L)} & r_{23(L)} - y_L r_{33(L)} \\ r_{11(R)} - x_R r_{31(R)} & r_{12(R)} - x_R r_{32(R)} & r_{11(R)} - x_R r_{31(R)} \\ r_{21(R)} - y_R r_{31(R)} & r_{22(R)} - y_R r_{32(R)} & r_{23(R)} - y_R r_{33(R)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -t_{x(L)} + x_L t_z \\ -t_{y(L)} + y_L t_z \\ -t_{x(R)} + x_R t_z \\ -t_{y(R)} + y_R t_z \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} AX = b \\ X = (A^T A)^{-1} A^T b \end{cases}$$

طبق رابطه (۸) ارائه شده توسط [۳۳]، دقت استخراج اطلاعات هندسی در راستای محور نوری دوربین در فواصل مختلف سیستم از عوارض مکانی بالاتر خواهد بود. زیرا همانطور که در رابطه (۴) مشخص است دقت در راستای محور نوری دوربین (δ) با مجذور فاصله از عوارض مکانی (H) رابطه مستقیم و با طول پایه (b) رابطه عکس دارد. در این رابطه، f معرف فاصله کانونی دوربین و δ_p دقت اندازه‌گیری نقاط تصویری برابر با نصف ابعاد پیکسل است

با استفاده از رابطه (۷)، مختصات سه‌بعدی برای نقاط ارائه شده توسط الگوریتم تناظریابی با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات قابل محاسبه خواهد بود. استفاده از دوربین‌های استریو علاوه بر امکان ایجاد دید سه‌بعدی از محیط، باعث ایجاد افزونگی در معادلات فوق جهت تولید ابرنقطه شده و امکان استخراج ابرنقطه کامل از محیط را با توجه به وجود چهار تصویر در اختیار قرار می‌دهد. همچنین با توجه به امکان تصویربرداری با طول پایه بزرگتر با استفاده از سخت‌افزار سیستم پیشنهادی،

موجود برای هر پیکسل میانگین گیری می شود. در صورتی که پیکسلی با مختصات (x_L, y_L) در تصویر سمت چپ با پیکسلی با مختصات (x_R, y_R) در تصویر راست متناظر باشد برای هر یک از آنها اطلاعات رنگ از تصویر مربوطه استخراج شده و با میانگین گیری از این اطلاعات برای نقطه سه بعدی زمینی رنگ به صورت زیر اختصاص داده می شود.

$$(x_R, y_R) = [R_R, G_R, B_R]$$

$$\Rightarrow [R, G, B]_{XYZ} = \left[\frac{R_R + R_L}{2}, \frac{G_R + G_L}{2}, \frac{B_R + B_L}{2} \right] \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$(x_L, y_L) = [R_L, G_L, B_L]$$

هم چنین میزان دقت نهایی حاصل شده از زمین مرجع سازی مدل سه بعدی تولید شده با استفاده از نقاط کنترل زمینی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در بخش نهایی نیز کیفیت ابرنقطه تولید شده با استفاده از دوربین های مورد استفاده با ابرنقطه مرجع مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج آن ارائه می شود.

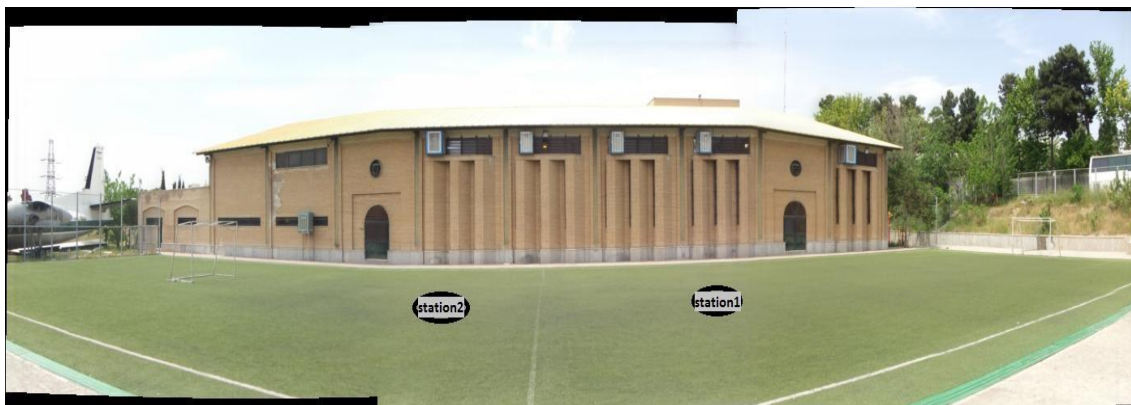
برای ارزیابی کلی سیستم اسکتر استریوپانوراما ارائه شده، از آن برای بازسازی سه بعدی ساختمان در فضاهای شهری استفاده شد. سیستم مطرح شده در مقابل ساختمان ورزشی در فضای دانشکده هوافضای دانشگاه خواجه نصیر مطابق شکل (۱۳) در دو ایستگاه قرار گرفت و از محیط اطراف تصویربرداری و با استفاده از روابط مطرح شده ابرنقطه در محیط نرم افزار مطلب تهیه شد. ابرنقطه تهیه شده در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. با وجود بافت تکراری در نمای ساختمان الگوریتم مدل سازی به خوبی عمل کرده و ابر نقطه با تقریباً کاملی تولید شده است.

$$\delta = \delta_p \cdot \frac{H^2}{b \cdot f} \quad \text{رابطه (۸)}$$

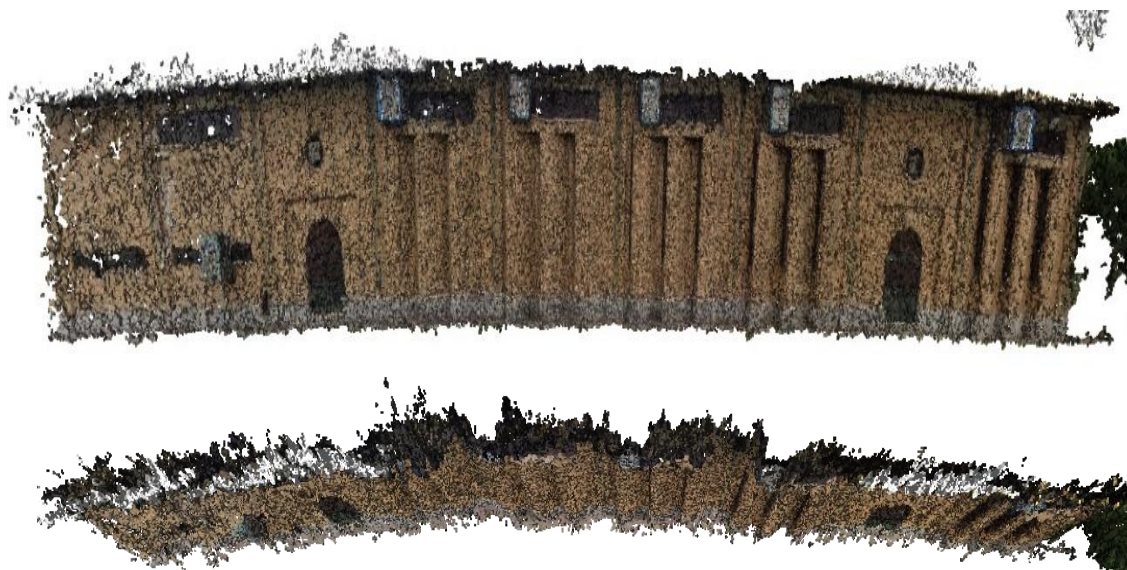
پس از تولید مختصات سه بعدی برای هر نقطه، برای واقعی تر شدن نمایش ابرنقطه، اطلاعات رنگ نقاط متناظر نیز به ابرنقطه اضافه می شود. شیوه افزودن این اطلاعات به این صورت است که برای نقاط متناظر، برای هر پیکسل اطلاعات رنگ استخراج شده و سپس برای اختصاص رنگ به ابرنقطه از درجات خاکستری

۶- ارزیابی سیستم اسکتر استریوپانوراما

همانطور که بیان شد سیستم اسکتر استریوپانوراما به گونه ای طراحی شده است که بتواند در مواجهه با مشکلات موجود در زمینه مدل سازی سه بعدی عملکرد مناسبی داشته باشد. پس از بیان چگونگی طراحی، پیاده سازی و کالیبراسیون سیستم و نحوه تولید مدل سه بعدی از آن، در این بخش قابلیت های سیستم ارائه شده در بازسازی سه بعدی محیط مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور نتایج عملکرد سیستم در چهار آزمون مجزا مورد ارزیابی قرار می گیرد. ابتدا قابلیت سیستم برای تولید مدل سه بعدی در فضای شهری و در مواجهه با ساختمان ها به صورت بصری مورد ارزیابی قرار می گیرد. سپس در آزمون بعدی عملکرد سیستم پیشنهادی در اندازه گیری های هندسی مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این راستا، میزان دقت قابل حصول از سیستم در استقرار آن در تک ایستگاه و در فواصل مختلف از شی مورد نظر بررسی می شود.



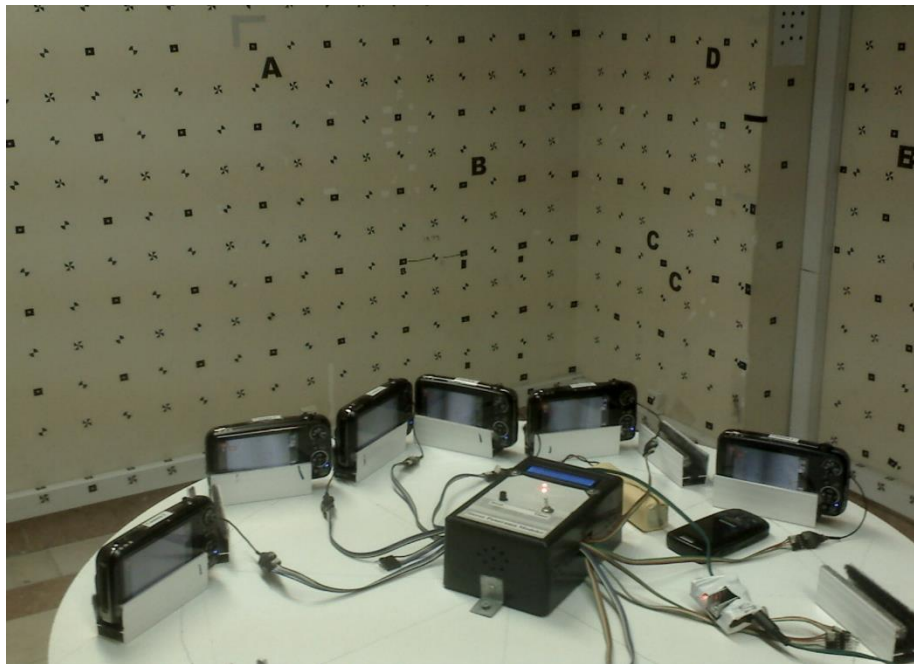
شکل ۱۳: نمایی از محل آزمون و محل قرارگیری ایستگاه‌های ۱ و ۲



شکل ۱۴: ابر نقطه تهیه شده از ساختمان ورزشی دانشکده هوافضا (بالا: نمای روبرو - پایین: نمای بالای ابر نقطه)

با تارگتهایی با مختصات زمینی معلوم استفاده شد. این میدان آزمون در تمام میدان دید سیستم گسترش پیدا کرده و در تمامی تصاویر اخذ شده تارگتهایی با مختصات زمینی معلوم وجود دارند. با تصویربرداری از این میدان آزمون با سیستم اسکنر استریوپانوراما و استفاده از معادلات ترفیع فضایی، وضعیت و موقعیت هریک از دوربین‌ها در روی سیستم مشخص شد. با تعیین توجیه خارجی هریک از دوربین‌ها در روی سکوی سیستم اسکنر استریوپانوراما، مقیاس ابرنقطه تولید شده در مرحله مدل‌سازی سه‌بعدی نیز قابل تعیین خواهد بود.

برای انجام کالیبراسیون دوربین‌ها جهت استخراج پارامترهای توجیه داخلی، تعدادی تصویر از یک میدان آزمون با طول‌های مقیاس اخذ شده و با استفاده از سرشکنی به روش دسته اشعه، با استفاده از نرم‌افزار آسترالیس، [۳۳] پارامترهای داخلی هریک از دوربین‌ها استخراج شد. هم‌چنین در این مرحله ضمن مشخص شدن پارامترهای توجیه داخلی هریک از دوربین‌ها، پارامترهای توجیه نسبی برای زوج عدسی‌ها نیز استخراج می‌شوند. پس از کالیبراسیون تمام دوربین‌ها، برای مشخص نمودن پارامترهای توجیه خارجی هریک از آنها بر روی سکوی نگه‌دارنده، از میدان آزمون وسیعی



شکل ۱۵: کالیبراسیون سیستم اسکنر استریوپانوراما پیشنهادی

نمایش می‌دهد. این ابرنقطه با استفاده از تارگت‌های کددار مقیاس‌دهی شده و با ابرنقطه تولید شده توسط دوربین مورد استفاده در سیستم اسکنر استریوپانوراما مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور، جهت انطباق دو ابرنقطه از الگوریتم *Local Best Fit* در نرم‌افزار *GOM Inspect* [۷۳] به صورت اتوماتیک استفاده شده و از معیار مقدار انحراف استاندارد^۱ برای مقایسه دو ابرنقطه استفاده شد. شکل (۱۷) مقایسه این دو ابرنقطه را نمایش می‌دهد.

با مقایسه بین این دو ابرنقطه مقدار انحراف استاندارد ابرنقطه تولید شده با دوربین مورد استفاده با ابرنقطه مرجع 0.68 میلیمتر است. این مقدار نشان می‌دهد که ابرنقطه تولید شده به کمک دوربین *FujiFilm* دارای نویز کمی است و قابلیت استفاده در مدل‌سازی سه‌بعدی را دارد. مقایسه کاملی روی کیفیت ابرنقطه تولید شده توسط سنسور استریو مورد استفاده در سیستم اسکنر استریوپانوراما در مقاله [۸۳] آورده شده است.

برای بررسی پایداری هندسی و فیزیکی سیستم اسکنر استریوپانوراما، پس از به‌کارگیری سیستم در تصویربرداری از محیط، اجزای سیستم مجدداً کالیبره شدند. بدین ترتیب که پس از کالیبراسیون اولیه سیستم و به‌کارگیری آن در محیط شهری، دوربین‌های استریو مجدداً توسط میدان آزمون کالیبره شده و پارامترهای توجیه داخلی و پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی برای هر دوربین استریو محاسبه شدند. به‌عنوان نمونه در جدول (۳) مقادیر به‌دست آمده از پارامترهای کالیبراسیون دو عدسی یکی از دوربین استریو، قبل و پس از به‌کارگیری آن در روی سکوی سیستم و تصویربرداری از محیط و میزان اختلاف آن نمایش داده شده است.

در بررسی دیگری کیفیت ابرنقطه تولید شده با دوربین استریو مورد استفاده در سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ارزیابی ابرنقطه مرجعی از نمای ساختمان فوق با استفاده از دوربین فریم تاپ نیکون دی ۳۲۰۰ با تعداد ۲۰ تصویر در نرم‌افزار ای‌جی‌آی سافت تولید شد. شکل (۱۶) نمایی از شبکه تصویربرداری جهت تولید ابرنقطه مرجع را

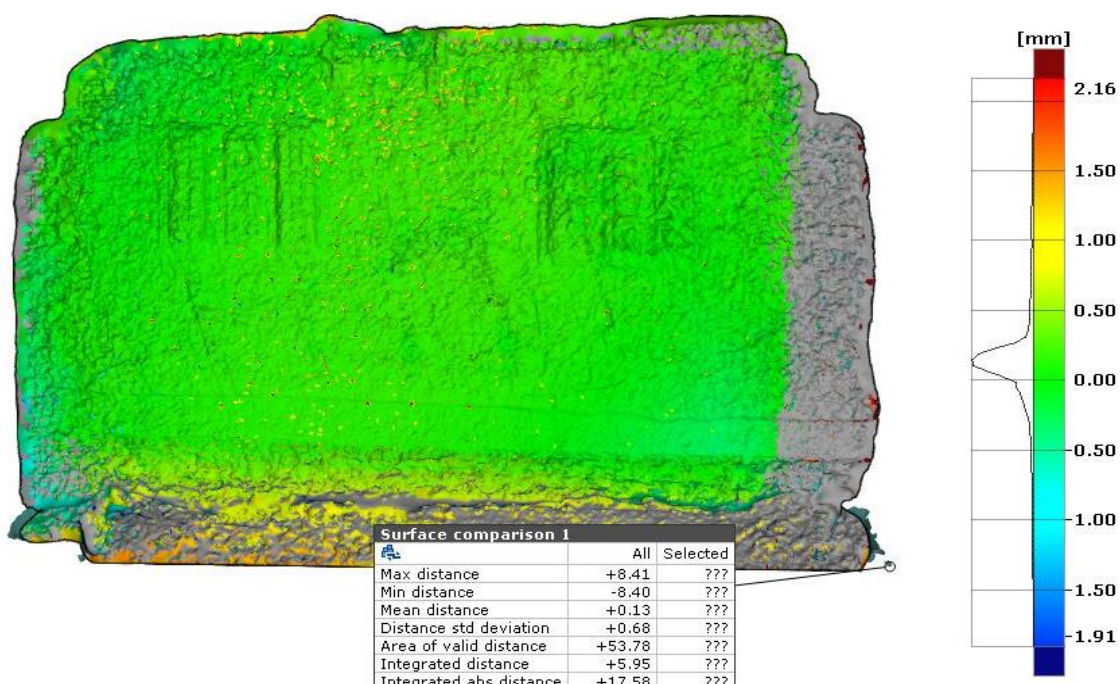
¹ Standard Deviation

جدول ۳: پارامترهای کالیبراسیون دو عدسی یکی از دوربین‌های استریو قبل و پس از بکارگیری در تصویربرداری از محیط و درصد اختلاف آنها

پارامترها	قبل از به‌کارگیری در محیط		پس از به‌کارگیری در محیط		درصد اختلاف	
	عدسی راست	عدسی چپ	عدسی راست	عدسی چپ	عدسی راست	عدسی چپ
C(mm)	۷.۴۹۶۲	۷.۴۹۶۰	۷.۴۹۶۷	۷.۵۰۸۰	۰.۰۶٪	۰.۱۵٪
(mm) x_p	-۰.۰۰۱۵	-۰.۰۵۴۴	-۰.۰۰۱۶	-۰.۰۵۹۲	۶.۶٪	۸.۸٪
(mm) y_p	-۰.۰۲۷۱	-۰.۰۳۲۲	-۰.۰۲۴۹	-۰.۰۳۰۱	۸.۱٪	۶.۵٪
K1	۲.۰۰۴e-۰۳	۲.۱۲۸e-۰۳	۲.۱۹۴e-۰۳	۲.۲۶۱e-۰۳	۸.۶۵٪	۵.۸۸٪
K2	-۱.۰۱۸e-۰۴	-۱.۰۳۸e-۰۴	-۱.۱۵۳e-۰۴	-۱.۱۰e-۰۴	۱۱.۷۰٪	۵.۲۹٪
K3	۴.۵۴۳e-۰۶	۴.۷۶۹e-۰۶	۴.۹۳۱e-۰۶	۴.۳۸۱e-۰۶	۷.۸۶٪	۸.۸۵٪
P1	۵.۲۲۸e-۰۴	-۴.۶۹۸e-۰۴	۵.۹۸۰e-۰۴	-۴.۴۹۸e-۰۴	۱۲.۵۷٪	۴.۶۷٪
P2	-۴.۳۰۰e-۰۴	-۴.۵۲۶e-۰۴	-۴.۶۴۴e-۰۴	-۴.۳۰۲e-۰۴	۷.۴۰٪	۵.۲۰٪
B1	۱.۳۳۵e-۰۲	۱.۲۷۹e-۰۲	۱.۴۴۵e-۰۲	۱.۳۱۵e-۰۲	۶.۹۶٪	۲.۷٪
B2	-۱.۰۵۸e-۰۴	-۲.۰۴۸e-۰۳	۱.۱۶۲e-۰۳	-۲.۱۶۶e-۰۴	۸.۹۵٪	۵٪
میانگین درصد اختلاف					۷.۸۸٪	۵.۳۰٪



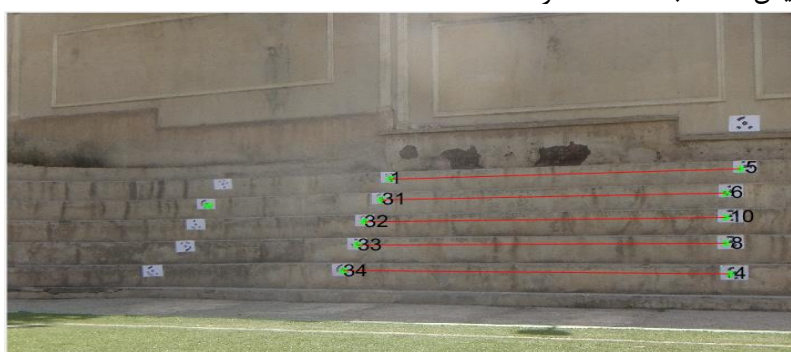
شکل ۱۶: نمایی از شبکه تصویربرداری جهت تولید ابرنقطه مرجع



شکل ۱۷: مقایسه ابر نقطه تولید شده با سیستم با ابر نقطه مرجع

مطرح شده استخراج شد و طول بین این نقاط محاسبه و اختلاف میان طول واقعی و طول اندازه‌گیری شده توسط سیستم به‌عنوان معیار اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. نتایج مقایسه بین این طول‌ها در جدول (۴) آمده است.

برای ارزیابی دقت سیستم اسکنراستریوپانوراما، فاصله بین چند نقطه که در فواصل مختلف از سیستم قرار گرفته‌اند و با تارگت‌های کددار نشانه‌گذاری شده‌اند با دقت اندازه‌گیری شد. محل قرارگیری این طول‌ها در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. سپس مختصات سه‌بعدی برای این نقاط با استفاده از معادلات



شکل ۱۸: محل قرارگیری طول‌های چک

استریوپانوراما، میزان خطای طول بین نقاط در حدود ۵۷ میلیمتر است. این میزان خطا، می‌تواند در بسیاری از زمینه‌ها پاسخگوی نیاز مدل‌سازی سه‌بعدی فضای شهری در مقیاس گسترده باشد.

همانطور که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، میزان خطا در طول بین نقاط هدف مرتبط با فاصله آن نقطه مورد اندازه‌گیری از سیستم اسکنراستریوپانوراما می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که در فاصله حدود ۱۵ متری از سیستم اسکنراستریوپانوراما، میزان خطا در طول بین نقاط هدف مرتبط با فاصله آن نقطه مورد اندازه‌گیری از سیستم اسکنراستریوپانوراما می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت که در فاصله حدود ۱۵ متری از سیستم اسکنراستریوپانوراما، میزان خطا در طول بین نقاط هدف مرتبط با فاصله آن نقطه مورد اندازه‌گیری از سیستم اسکنراستریوپانوراما می‌شود.

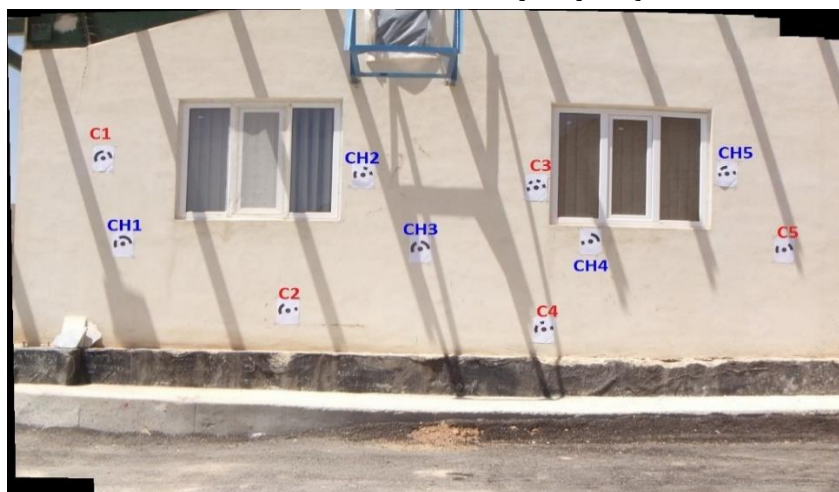
جدول ۴: میزان خطای طول‌های اندازه‌گیری توسط سیستم

مقدار خطا (متر)	طول اندازه‌گیری شده (متر)	طول واقعی (متر)	فاصله تارگت از سیستم تصویربرداری (متر)	طول بین تارگتها
۰.۰۳۷۸	۴.۸۹۹۸	۴.۸۶۲	۱۱	۳۴-۴
۰.۰۴۰۹	۴.۸۴۰۹	۴.۸۰	۱۲	۳۳-۸
۰.۰۴۹۲	۴.۹۱۶۲	۴.۸۶۷	۱۳	۳۲-۱۰
۰.۰۵۲۶	۴.۸۷۰۶	۴.۸۱۸	۱۴	۳۱-۶
۰.۰۵۷۴	۵.۱۰۰۴	۵.۰۴۳	۱۵	۵-۱

مختصات زمینی داده شد. شیوه مختصات‌دهی به این نقاط بدین صورت انجام شد که ابتدا یک شبکه ژئودتیک شامل سه نقطه، که یک مثلث را تشکیل می‌دادند، تشکیل شده و مشاهدات طول و زاویه برای این نقاط انجام شد. سپس از هر ایستگاه به نقاط قرار گرفته بر روی نمای ساختمان مختصات‌دهی شد و در نهایت تمام مشاهدات صورت گرفته در یک سیستم مختصات سرشکن شد. مختصات تصویری تارگت‌های کددار توسط نرم‌افزار *Agisoft* استخراج شده است. سپس مختصات مدلی برای هر یک از نقاط با استفاده از تصاویر اخذ شده از سیستم و روابط مطرح شده در بخش ۵ استخراج شد و با استفاده از آنان و مختصات زمینی نقاط پارامترهای زمین مرجع‌سازی محاسبه شدند.

برای انجام اندازه‌گیری در مدل سه‌بعدی تولید شده و استخراج اطلاعات هندسی در سیستم مختصات زمینی و ایجاد سیستم مختصات یکپارچه، مدل ایجاد شده باید زمین مرجع شود. برای انجام زمین‌مرجع‌سازی به نقاط کنترل نیاز می‌باشد. برای این منظور، در محیط تعداد ۱۰ نقطه به‌عنوان نقاط کنترل و چک روی نمای ساختمان در نظر گرفته شد و سعی گردید بر روی نمای ساختمان تعداد نقاط به‌طور همگن انتخاب شوند. برای این منظور از تارگت‌های کددار ارائه شده در نرم‌افزار *Agisoft* [۳۶] استفاده شد. شکل (۱۹) نمایی از محل قرارگیری این نقاط را نمایش می‌دهد.

برای تعیین مختصات زمینی این نقاط، یک شبکه ژئودتیک محلی با استفاده از دوربین توتال استیشن *Lieca TCR805* بسته شد و به هر یک از نقاط



شکل ۱۹: نمایی از محل قرارگیری نقاط کنترل و چک

محاسبه پارامترهای زمین مرجع‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته و به‌عنوان نقاط چک کنار

برای بررسی فرآیند زمین مرجع‌سازی، دقت تعیین مختصات زمینی ۵ نقطه کنترل که در

مکانی یکسان در همه نقاط و قابلیت استخراج مدل سه بعدی به شکل ابرنقطه با دقت بالا از آن به دلیل نحوه چینش جدید اجزای آن است.

قسمت‌های مختلف سیستم از جمله نحوه طراحی سخت افزاری آن، کالیبراسیون سیستم و نحوه تولید مدل سه بعدی از آن توضیح داده شده است. برای ارزیابی سیستم اسکتر استریو پانوراما، از سیستم برای تولید مدل سه بعدی در فضای شهری استفاده شد. هم‌چنین برای ارزیابی دقت سیستم اسکتر استریوپانوراما، فاصله بین چند نقطه که در فواصل مختلف از سیستم قرار گرفته‌اند و با تارگت‌های کددار نشانه‌گذاری شده‌اند با دقت اندازه‌گیری شد و با ول‌های استخراج شده از سیستم مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که در فاصله حدود ۱۵ متری از سیستم اسکتر استریوپانوراما، میزان خطای طول بین نقاط در حدود ۵۷ میلیمتر است. هم‌چنین از نظر خطای زمین مرجع‌سازی و کیفیت ابر نقطه تولیدی توسط این سیستم نتایج قابل قبولی به دست آمد که این نتایج نشان می‌دهند که این سیستم می‌تواند در بسیاری از کاربردهای مدل‌سازی شهری مورد استفاده قرار بگیرد. با توجه به آنکه روش ارائه شده جهت کالیبراسیون سیستم، روشی سریع و ساده برای استخراج پارامترهای کالیبراسیون آن بوده است پیشنهاد می‌گردد که تمام دوربین‌های مورد نیاز برای سیستم نصب شده و در مرحله کالیبراسیون، از روشهای دیگر کالیبراسیون هم‌زمان چند دوربین برای محاسبه دقیق‌تر پارامترهای توجیه خارجی هریک از دوربینهای سیستم استفاده شود و مقایسه بین دقت‌های حاصل شده انجام پذیرد.

گذاشته شده بودند. با توجه به مختصات زمینی اندازه‌گیری شده نقاط چک، اختلاف آنها در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵: اختلاف مختصات زمینی نقاط چک حاصل از اندازه‌گیری و شبکه ژئودتیک

شماره نقطه چک	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
CH1	۰.۰۲۲	۰.۰۰۹	۰.۰۲۳
CH2	-۰.۰۲۳	-۰.۰۳۲	-۰.۰۳۰
CH3	-۰.۰۲۶	-۰.۰۳۸	-۰.۰۲۶
CH4	-۰.۰۲۹	۰.۰۲۶	-۰.۰۲۰
CH5	۰.۰۳۱	۰.۰۳۵	۰.۰۲۴
RMSE	۰.۰۲۷	۰.۰۳۰	۰.۰۲۵

با توجه به نتایج حاصل از جدول (۴) مشاهده می‌شود که $RMSE$ در راستای X ، Y و Z به ترتیب ۲۷ و ۳۰ و ۲۵ میلیمتر است که با توجه به فاصله دوربین از عارضه نزدیک به مقادیر پیش‌بینی شده است.

۷- نتیجه‌گیری

با وجود ارائه سیستم‌های مختلف تولید استریوپانوراما، در این مقاله، ایده چینش جدیدی از سیستم استریوپانوراما بر اساس استفاده از دوربین‌های استریو ارائه شد که قابلیت تولید دید استریو ۱۶۰ درجه و مدل سه بعدی با دقت را به‌طور هم‌زمان فراهم می‌آورد. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که با افزایش تعداد دوربین‌های موجود بر روی آن، قابلیت ارتقای زاویه دید تا میزان ۳۶۰ درجه را داراست. این سیستم دارای مزایایی از جمله: اتوماتیک‌سازی فرآیند تناظریابی و تولید مدل سه بعدی در آن، تولید استریوپانوراما با دقت

مراجع

- [1] A. Lippman, "Movie-maps: An application of the optical videodisc to computer graphics," in ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1980, pp. 32-42.
- [2] S. E. Chen, "Quicktime VR: An image-based approach to virtual environment navigation," in Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics

- and interactive techniques, 1995, pp. 29-38.
- [3] B. Micusik and J. Kosecka, "Piecewise planar city 3D modeling from street view panoramic sequences," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on, 2009*, pp. 2906-2912.
- [4] P. Musialski, P. Wonka, D. G. Aliaga, M. Wimmer, L. van Gool, and W. Purgathofer, "A Survey of Urban Reconstruction," *Computer Graphics Forum*, vol. 32, pp. 146-177, 2013.
- [5] S. P. Singh, K. Jain, and V. R. Mandla, "Virtual 3D City modeling: Techniques and Applications," *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 1, pp. 73-91, 2013.
- [6] A. Amini, "design and development a new stereo panorama system for geometric information extraction from environment," PhD thesis, 2014.
- [7] F. Remondino and S. El - Hakim, "Image - based 3D Modelling: A Review," *The Photogrammetric Record*, vol. 21, pp. 269-291, 2006.
- [8] H. Ishiguro, M. Yamamoto, and S. Tsuji, "Omni-directional stereo," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, pp. 257-262, 1992.
- [9] P. Peer and F. Solina, "Panoramic depth imaging: Single standard camera approach," *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, pp. 149-160, 2002.
- [10] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala, and J. Reyda, "Panoramic stereo," in *icpr*, 1996, p. 378.
- [11] Y. Pritch, M. Ben-Ezra, and S. Peleg, "Optics for omnistereo imaging," in *Foundations of Image Understanding*, ed: Springer, 2001, pp. 447-467.
- [12] S. Chan and A. Clark, "Periscopic stereo for virtual world creation," 1997.
- [13] J. Arnspang, H. Nielsen, M. Christensen, and K. Henriksen, "Using mirror cameras for estimating depth," in *Computer Analysis of Images and Patterns, 1995*, pp. 711-716.
- [14] S. Hua, Q. Huang, A. Zhang, and J. Qiao, "3D measurement, reconstruction and navigation through panoramic photography," *Proceedings of International ISPRS, China*, pp. 115-118, 2008.
- [15] R. Li, L. Yan, K. Di, and B. Wu, "A new ground-based stereo panoramic scanning system," *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 723-727, 2008.
- [16] "http://www.panoscan.com/MK3/."
- [17] O. Romain, T. Ea, C. Gastaud, and P. Garda, "An omnidirectional stereoscopic sensor: spherical color image acquisition," in *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on, 2002*, pp. II-209-II-212 vol. 2.
- [18] R. A. Ainsworth, D. J. Sandin, J. P. Schulze, A. Prudhomme, T. A. DeFanti, and M. Srinivasan, "Acquisition of stereo panoramas for display in VR environments," in *IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2011*, pp. 786416-786416-15.
- [19] H.-C. Huang and Y.-P. Hung, "Panoramic stereo imaging system with automatic disparity warping and seaming," *Graphical Models and Image Processing*, vol. 60, pp. 196-208, 1998.
- [20] M. Varshosaz and A. S. Amini, "Stereo panoramas: problems and solutions," in *XXI International CIPA Symposium, Greece*. Amir Shahrokh Amini, PhD Student of Photogrammetry.: Faculty of Geodesy and Geomatic Engineering, KN Toosi University of Technology. ashamini@dena.kntu.ac.ir, 2007.
- [21] J. Gluckman, S. K. Nayar, and K. J. Thoresz, "Real-time omnidirectional and panoramic stereo," in *Proc. of Image Understanding Workshop, 1998*, pp. 299-303.
- [22] F. Huang and Z.-H. Lin, "Stereo panorama imaging and display for 3D VR system," in *Image and Signal Processing, 2008. CISP'08. Congress on, 2008*, pp. 796-800.

- [23] Y. Satoh and K. Sakaue, "Stereo Omnidirectional System (SOS) and Its Applications," *Intelligent Environments*, p. 127, 2005.
- [24] D. Shimada, H. Tanahashi, K. Kato, and K. Yamamoto, "Extract and display moving object in all direction by using stereo omnidirectional system (SOS)," in *3-D Digital Imaging and Modeling*, 2001. Proceedings. Third International Conference on, 2001, pp. 42-47.
- [25] H. Tanahashi, K. Yamamoto, C. Wang, and Y. Niwa, "Development of a stereo omnidirectional imaging system (SOS)," in *Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE, 2000*, pp. 289-294.
- [26] H. Tanahashi, D. Shimada, K. Yamamoto, and Y. Niwa, "Acquisition of three-dimensional information in a real environment by using the Stereo Omnidirectional System (SOS)," in *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on, 2001*, pp. 365-371.
- [27] "<http://thinktankteam.info/beyond>."
- [28] "<http://www.hhi.fraunhofer.de/>."
- [29] D. Pierce, S. M. Herrstadt, T. Grover, and F. Good, "Stereoscopic panoramic image capture device," ed: Google Patents, 2005.
- [30] W. Feng, B. Zhang, J. Röning, X. Zong, and T. Yi, "Panoramic stereo sphere vision," in *IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2013*, pp. 866206-866206-7.
- [31] A. S. Amini, M. Varshosaz, and M. Saadatseresht, "Evaluating a New Stereo Panorama System based on Stereo Cameras," *International Journal of Scientific Research in Inventions and New Ideas*, vol. 2, p. 1, 2014.
- [32] "<http://www.trimble.com>"
- [33] "<http://www.photometrix.com.au/australis>"
- [34] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *Computer vision, 1999. The proceedings of the seventh IEEE international conference on, 1999*, pp. 1150-1157.
- [35] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [36] "<http://www.agisoft.com>"
- [37] "<http://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>"
- [38] V. Mousavi, M. Khosravi, M. Ahmadi, N. Noori, A. H. Naveh, and M. Varshosaz, "The Performance Evaluation of Multi-Image 3d Reconstruction Software with Different Sensors," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, p. 515, 2015.



Development of a New Stereo-Panorama Scanner Based on Stereo Cameras

Vahid Mousavi ^{*1}, Masoud Varshosaz ²

1- Ms.c student of photogrammetry and remote sensing, Faculty of Surveying Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran

2- Associate professor, Faculty of Surveying Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran

Abstract

Three dimensional models generated from cities, due to their wide range of applications, are required by most organizations and institutions. Among numerous 3D reconstruction techniques of urban areas, stereo-panorama images are largely taken into consideration for their full coverage of the environment. In this paper, a new stereo panorama scanner is presented which utilizes stereo cameras. The system provides the possibility to extract accurate geometric information for 3D reconstruction of urban areas and stereo viewing of the surroundings as well. The advantages of such system are: the automation of matching and 3D modelling process, equal resolution over the whole stereo panorama and the ability to extract precise 3D models in point-cloud format. In this paper, the structure of the system is described, including system implementation, calibration and 3D model generation. Additionally, experimental results of system evaluation are provided. The evaluation results show that the system is enable to generate accurate models for 3D city reconstruction applications. The results demonstrate that once the distance from stereo scanner to the object is in the range of some 15 meters, consequently the discrepancy of the point distances would be around 57 millimetres.

Key words: image-based 3D reconstruction, calibration, stereo camera, stereo panorama