مجله علمی-پژوهشی رایانش نرم و فن‌آوری اطلاعات

جلد ۵، شماره ۲، تابستان سال ۱۳۹۵ شاپا: ۱۰۰۶-۲۳۸۳

ارائه روشی نوین در بازسازی بصری و هندسی محیط بر مبنای روش استریو پانوراما

امیر شاهرخ امینی

استادیار، گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

sh_amini@azad.ac.ir

چکیده- مدل‌سازی مناطق شهری با قابلیت دسترسی به اطلاعات هندسی و بصری، مورد استقبال و کاربرد بسیاری از سازمان‌ها قرار دارد. در این میان، استفاده از روش استریو پانوراما به عنوان یک روش تصویر مبنا به دلیل سادگی و ارائه دید واقعی و کامل از محیط مورد توجه بسیاری از تولید کنندگان و کاربران نقشه‌های شهری است. در این مقاله، یک سیستم نوین استریو پانوراما بر مبنای دوربین‌های استریو (که ثبت اختراع شده است) ارائه و چگونگی بازسازی سه‌بعدی محیط‌های شهری به کمک این سیستم بیان شده است. در این مقاله، همچنین فرآیند انجام یکپارچه‌سازی بین تصاویر استریو پانوراما در ایستگاه‌های مختلف برای پوشش و مدل‌سازی کامل یک منطقه نیز تشریح شده است. در نهایت، بازسازی هندسی و بصری قسمتی از یک خیابان در منطقه شهری توسط سیستم استریو پانوراما‌ی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بازسازی محیط با استفاده از سیستم پیشنهادی نشان داد که بر خلاف غالب سیستم‌های استریو پانوراما‌ی موجود که در آنها امکان دست‌یابی به اطلاعات هندسی بعضا دشوار است، در روش پیشنهادی علاوه بر فراهم ساختن یک فضای بصری مناسب از محیط، امکان اندازه‌گیری‌های هندسی به‌راحتی میسر شده و دست‌یابی به دقت های مدنظر در استخراج اطلاعات هندسی که در پروژه‌های شهری مورد نیاز است (نقشه‌های بزرگ مقیاس ۱:۱۰۰۰) ممکن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: دوربین استریو، استریو پانوراما، بازسازی سه‌بعدی، رجیستریشن.

۱- مقدمه

فرآیند مدل‌سازی فضای محیط اطراف، نمایش و استخراج اطلاعات هندسی مورد نیاز از این مدل‌ها مورد توجه و کاربرد بسیاری از سازمان‌ها است. یک مدل غنی، مدلی است که بتواند نمایشی مناسب و جامع از محیط را ارائه داده، به کاربر امکان دسترسی به عوارض مختلف محیط را بدهد، و نهایتا قابلیت اندازه-گیری‌های هندسی در آن فراهم شده باشد. مدل‌های سه‌بعدی تهیه شده در مناطق شهری می‌توانند در زمینه‌های گوناگون مانند تکمیل و غنی‌سازی نقشه‌های موجود، تهیه مدل‌های شهری، کنترل و رباتیک، ناوبری، مدل‌های مجازی سه‌بعدی، سیستم‌های هوشمند با قابلیت درک از محیط و تصمیم‌گیری، و ... کاربردهای متنوعی داشته باشند [۱]. در تولید نقشه‌های مناطق شهری، به-طور موضوعاتی مانند پیچیدگی‌های این مناطق، موانع، عوارض متحرک، سرعت برداشت، حجم داده‌های تولید شده، پوشش کامل برای دسترسی به تمام محیط، قابلیت دید و تفسیر عوارض استخراج شده، دقت استخراج اطلاعات هندسی و هزینه در زمره مسائل مطرح می‌باشند.

در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های بازسازی محیط به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. در روش‌های مستقیم مانند تاکئومتری و اسکن لیزری، پارامترهای هندسی مورد نیاز مانند طول و مختصات به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی سه‌بعدی محیط با استفاده از عوارض هندسی و رابطه بین آنها انجام می‌پذیرد [۲]. روش‌های غیر مستقیم غالبا بر مبنای تصویر بوده و در آنها محیط با استفاده از چندین تصویر حقیقی بازسازی می‌شود و سپس اطلاعات هندسی مورد نیاز، از تصاویر استخراج می‌شوند [۳].

استفاده از روش‌های تصویرمبنا به‌عنوان روشی غیرمستقیم در تهیه مدل‌های شهری با توجه به ارائه دید واقعی از محیط مورد توجه می‌باشند [۴، ۵]. در این روش‌ها، تصاویر واقعی می‌توانند درک واقعی از محیط را به کاربر منتقل نموده و بعنوان داده‌های

مناسب برای تکمیل اطلاعات هندسی مورد استفاده قرار گیرند که از مزیت‌های استفاده از روش تصویرمبنا است [۶].

در میان روش‌های تصویر مبنا در بازسازی محیط، تصویربرداری پانوراما یکی از روش‌های رو به گسترش است. یک تصویر پانوراما، یک تصویر از محیط با زاویه عموما ۳۶۰ درجه از محیط اطراف دوربین است [۷]. ترکیب دو تصویر پانوراما‌ی پوشش‌دار (که از دو مکان نزدیک به هم اخذ شوند) برای تولید یک استریو پانوراما از جمله روش‌های نوین مدل‌سازی سه‌بعدی محیط است. یک مدل استریو پانوراما، از دو پانوراما، یکی برای دید چشم چپ و دیگری برای دید چشم راست تشکیل یافته است. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک استریو پانوراما دیده می‌شود.

شکل ۱: نمونه‌ای از یک مدل استریو پانوراما‌ی آناگلیف

چگونگی تولید این دو تصویر و نحوه ترکیب آنها سیستم‌های متعددی را برای تولید استریو پانوراما ایجاد نموده است. بر این اساس و به‌طور خلاصه، مهمترین روش‌ها و سیستم‌های اخذ تصاویر برای تولید یک استریو پانوراما عبارتند از استفاده از تک دوربین، استفاده از زوج دوربین‌های قاب مبنا، استفاده از دوربین-های آرایه خطی، استفاده از دوربین‌های ماهی چشمی[1]، استفاده از دوربین چندسویه[2]، و استفاده از دوربین‌های چندبخشی[3]، که خواننده می‌تواند با مراجعه به مراجع [۸] الی [۱۷] از جزئیات آنها اطلاع یابد. نقاط ضعف و محدودیت هر یک از این روش‌ها در به-کارگیری آنها برای بازسازی بصری و هندسی محیط در جدول ۱ بیان شده است.

با توجه به بررسی چالش‌های روش‌ها و سیستم‌های تولید استریو پانوراما، می‌توان گفت هیچ یک از ساختارهای موجود توانایی برآورده ساختن نیازهای یک سیستم استریو پانوراما‌ی کامل که با هدف اندازه گیری هندسی در مناطق شهری توسعه یابد را ندارند. بنابراین، لازم است تا یک سیستم سخت‌افزاری اخذ تصاویر استریو پانوراما با توجه به نیازهای تولید مدل بصری مناسب و دستیابی به اطلاعات هندسی در مناطق شهری طراحی شده و بر مشکلات خاص این مناطق غلبه نماید.

در این مقاله سیستمی برای تولید استریو پانوراما پیشنهاد شده است که می‌تواند تا حد ممکن بر مشکلات سیستم‌های موجود غلبه نماید. سیستم پیشنهادی که به آن مدل‌ساز استریو پانوراما گفته می شود (ثبت اختراع شده است) از چندین دوربین استریو با چینش افقی تشکیل شده است.

جدول ۱: سیستم‌های موجود استریو پانوراما و نقاط ضعف و محدودیت‌های هر یک از آنها.

روش تولید استریو پانوراما	نقاط ضعف و محدودیت‌ها
استفاده از تک دوربین	عدم پوشش کامل ۳۶۰ درجه بصورت آنی نیاز به تعداد تصاویر بسیار بالا تاثیر عوارض متحرک در محیط عدم ثبات فیزیکی ناشی از دوران سیستم
استفاده از زوج دوربین‌های قاب مبنا	عدم پوشش کامل ۳۶۰ درجه بصورت آنی تاثیر عوارض متحرک در محیط عدم ثبات فیزیکی ناشی از دوران سیستم عدم دید برجسته‌بینی در ساختار عمودی
استفاده دوربین‌های آرایه خطی	عدم پوشش کامل ۳۶۰ درجه بصورت آنی تاثیر عوارض متحرک در صحنه عدم ثبات فیزیکی ناشی از دوران سیستم عدم دید برجسته‌بینی در ساختار عمودی
استفاده از دوربین‌های چشم ماهی	اعوجاج بسیار زیاد تصاویر حاصل نیاز به اعمال تصحیحات کامل تصاویر هندسه پیچیده و سختی استخراج اطلاعات عدم دید برجسته‌بینی در ساختار عمودی
استفاده از ترکیب آینه و دوربین	کیفیت پایین و اعوجاج زیاد تصاویر حاصل نیاز به اعمال تصحیحات کامل تصاویر سختی استخراج اطلاعات هندسی عدم دید برجسته‌بینی در ساختار عمودی
استفاده از دوربین‌های چندبخشی	عدم دید برجسته‌بینی با توجه به ساختار چینش عمودی آن

به‌طور کلی، نوآوری روش پیشنهادی را در چهار موضوع می-توان خلاصه نمود: اول، ارائه یک سیستم استریو پانوراما بر اساس دوربین‌های استریو که چنین سیستمی با این نوع ترکیب تاکنون ارائه نشده است. دوم، ساختار خاص این سیستم محدودیت سیستم‌های استریو پانوراما‌ی دیگر شامل اثرات چرخش و لرزش، عوارض متحرک و پوشش آنی ۳۶۰ درجه محیط را به‌صورت یکجا می‌پوشاند. سوم، ساختار سیستم پیشنهادی موجب تسهیل و اتوماسیون تولید مدل بصری استریو پانوراما شده و این فرآیند را می‌تواند از تناظریابی بی‌نیاز سازد. چهارم، ساختار سیستم موجب تسهیل و اتوماسیون بازسازی هندسی محیط شده و استخراج اطلاعات هندسی توسط آن قابل انجام خواهد بود.

[1] Fish-eye
[2] Omni-directional
[3] Modular

در ادامه مقاله، چگونگی پیاده‌سازی سیستم پیشنهادی، به‌کارگیری سیستم در بازسازی بصری و هندسی محیط و همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی صورت گرفته تشریح می‌شود.

۲- توسعه یک سیستم نوین استریو پانوراما

همانطور که گفته شد، در این مقاله یک سیستم استریو پانورامای افقی ارائه شده است که بر مبنای دوربین استریو استوار است. یک دوربین استریو، از حداقل دو عدسی در قالب یک بدنه تشکیل یافته که هر عدسی دارای سیستم تصویربرداری جداگانه است. دو عدسی در دوربین استریو دارای ثبات موقعیت نسبت به یکدیگر می‌باشند و با توجه به تصویربرداری آنها به‌صورت موازی با یکدیگر، دید استریو را فراهم می‌سازند. در شکل ۲، تصویر دوربین استریوی به‌کار رفته در سیستم (دوربین Fuji W3) نشان داده شده است.

شکل ۲: دوربین استریوی Fuji W3 بکار رفته در سیستم استریو پانوراما.

قرارگیری این دوربین‌ها در سیستم مدل‌ساز استریو پانوراما (شکل ۳) بر روی محیط یک صفحه دایره‌ای شکل است، به‌گونه‌ای که تمام دوربین‌ها نسبت به مرکز صفحه به‌صورت متقارن و به یک فاصله بوده و فاصله و زاویه بین هر دو دوربین استریو پانوراما یکسان است. درساخت سیستم، از تعداد ۱۰ دوربین استریو که با زاویه ۳۶ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته و با یکدیگر حداقل ۲۰ درصد پوشش دارند استفاده شده است تا بتوان تصاویر را به یکدیگر متصل نمود.

برای ایجاد قابلیت فرمان‌پذیری دوربین‌ها و انجام هم‌زمانی آنها، یک کنترل کننده الکترونیکی برای سیستم طراحی شد. این کنترل کننده دارای یک منبع تغذیه برق بوده و توسط کنترل از راه دور فرمان‌دهی به سیستم انجام می‌شود که موجب عدم دخالت دست و در نتیجه عدم تغییر موقعیت دوربین‌ها بر روی سیستم خواهد شد. در سیستم پیشنهادی، هم‌زمانی دوربین‌ها با دقت ۰/۰۱ ثانیه انجام شد.

در سیستم ارائه شده، از آنجایی که دوربین‌ها به‌صورت ثابت بر روی صفحه قرار گرفته و تصاویر هم‌زمان اخذ می‌شوند، اثرات ناشی از لرزش سیستم تصویربرداری و همچنین تاثیر عوارض متحرک در تصاویر متوالی از بین می‌روند. همچنین، با توجه به ساختار چینش دوربین‌ها، استریو پانورامای افقی تولید می‌شود که در نتیجه امکان دید استریو را برای کاربر فراهم می‌سازد. با توجه به اینکه هر نقطه از محیط، حداقل در دو دوربین قابل رویت است، استخراج اطلاعات هندسی از استریو پانورامای تولید شده امکان‌پذیر است. ضمن آن که با توجه به تقارن دوربین‌ها نسبت به مرکز سیستم، مدل استریو پانورامای تولید شده دارای توان تفکیک یکسان تصویری در تمام نقاط است.

شکل ۳: سیستم مدل‌ساز استریو پانوراما.

۳- کالیبراسیون سیستم

کالیبراسیون دقیق سیستم استریو پانورامای پیشنهادی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه مقادیر حاصل از پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی (سه انتقال و سه دوران) به‌عنوان مقادیری ثابت در مراحل بعدی تولید مدل بصری و همچنین استخراج اطلاعات هندسی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند، دقت تعیین پارامترهای کالیبراسیون تاثیر بسزایی در دقت استخراج اطلاعات هندسی خواهد داشت. کالیبراسیون سیستم استریو پانوراما شامل دو مرحله ابتدا تعیین پارامترهای توجیه داخلی برای هر دوربین و تعیین پارامترهای توجیه نسبی برای زوج عدسی هر دوربین استریو، و سپس تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین هر دو دوربین استریوی متوالی است. کالیبراسیون سیستم استریو پانوراما با استفاده از یک میدان آزمون که از چندین تارگت و همچنین تعدادی طول مقیاس تشکیل شده است، مطابق شکل ۴ انجام شد. لازم به ذکر است می‌توان کلیه

مراحل کالیبراسیون را در یک فرآیند سرشکنی و با استفاده از یک میدان آزمون ۳۶۰ درجه تعیین نمود، اما از آنجا که عملا امکان اعمال دوران به سیستم با توجه به حجم زیاد و سنگینی آن وجود ندارد و در نتیجه شبکه مناسب تصویربرداری در این حالت تامین نخواهد شد، تصمیم بر آن شد که این فرآیند در دو مرحله انجام شده و برای تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دوربین‌های استریوی متوالی از دوران میدان آزمون استفاده کرد.

شکل ۴: تصویربرداری از میدان آزمون برای تعیین پارامترهای توجیه داخلی و توجیه نسبی بین لنزها.

جهت تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین لنزها، از یک روش بهبود یافته بر مبنای سرشکنی دسته اشعه که توسط امن‌زاده، امینی و سعادت‌سرشت [۲۲] ارائه شده است، استفاده شد. در این روش، با توجه به اینکه پارامترهای توجیه نسبی عدسی چپ و راست در دوربین‌های استریو ثابت می‌باشند، می‌توان پارامترهای مجهول را با اعمال قید ثابت بودن توجیه نسبی بین دو عدسی در هر یک از ایستگاه‌های تصویربرداری کاهش داد، به طوری که با کاهش تعداد مجهولات، در عین ثابت بودن تعداد معادلات، درجه آزادی بالاتر و استحکام معادلات بیشتر می‌شود. بر اساس این قید، در روش بهبود یافته پیشنهادی، پارامترهای توجیه خارجی تمام ایستگاه‌های عدسی سمت راست، با سه پارامتر دوران و سه پارامتر انتقال به پارامترهای توجیه خارجی ایستگاه سمت چپ وابسته می‌شوند و پارامترهای توجیه نسبی دو عدسی در هر ایستگاه ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، با توجه به معادلات پایه شرط هم‌خطی به‌صورت زیر:

$$F_x = x_a - \Delta x + f\left\{\frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)}\right\} = 0$$

$$F_y = y_a - \Delta y + f\left\{\frac{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)}{m_{31}(X_A - X_0) + m_{32}(Y_A - Y_0) + m_{33}(Z_A - Z_0)}\right\} = 0 \quad (۱)$$

برای نقاط موجود در تصاویر عدسی چپ، از ۹ پارامتر که شامل پارامترهای توجیه خارجی و مختصات زمینی نقطه مورد نظر می‌باشد، به‌صورت رابطه زیر مشتق گرفته می‌شود:

$$F_x = F_{x0} + \frac{\partial F_x}{\partial X_0}.\Delta X_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Y_0}.\Delta Y_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Z_0}.\Delta Z_0 + \frac{\partial F_x}{\partial \omega}.\Delta\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi}.\Delta\varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa}.\Delta\kappa + \frac{\partial F_x}{\partial X_A}.\Delta X_A + \frac{\partial F_x}{\partial Y_A}.\Delta Y_A + \frac{\partial F_x}{\partial Z_A}.\Delta Z_A = 0$$

$$F_y = F_{y0} + \frac{\partial F_y}{\partial X_0}.\Delta X_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Y_0}.\Delta Y_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Z_0}.\Delta Z_0 + \frac{\partial F_y}{\partial \omega}.\Delta\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi}.\Delta\varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa}.\Delta\kappa + \frac{\partial F_y}{\partial X_A}.\Delta X_A + \frac{\partial F_y}{\partial Y_A}.\Delta Y_A + \frac{\partial F_y}{\partial Z_A}.\Delta Z_A = 0 \quad (۲)$$

در رابطه فوق، پارامترهای $\frac{\partial F_x}{\partial X_0}$، $\frac{\partial F_x}{\partial Y_0}$، $\frac{\partial F_x}{\partial Z_0}$، $\frac{\partial F_x}{\partial \omega}$، $\frac{\partial F_x}{\partial \varphi}$، $\frac{\partial F_x}{\partial \kappa}$ مشتق نسبت به پارامترهای توجیه خارجی، $\frac{\partial F_x}{\partial X_A}$، $\frac{\partial Fx}{\partial Y_A}$، $\frac{\partial F_y}{\partial Z_A}$ مشتق نسبت مختصات زمینی نقاط مجهول، F_{x0} ،F_{y0} تابع به ازای مقادیر اولیه پارامترها، ΔX_0، ΔY_0، ΔZ_0، $\Delta\omega_0$، $\Delta\varphi_0$، $\Delta\kappa_0$ ، مقادیر تصحیحات پارامترهای توجیه خارجی و ΔX_A، ΔY_A، ΔZ_A مقادیر تصحیحات مختصات زمینی می‌باشند. اما برای خطی کردن معادلات شرط هم خطی برای نقاط موجود در تصاویر عدسی راست، از سه پارامتر انتقال و سه پارامتر دوران بین دو عدسی به صورت زیر مشتق گرفته می‌شود:

$$F_x = F_{x0} + \frac{\partial F_x}{\partial X_0}.\Delta X_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Y_0}.\Delta Y_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Z_0}.\Delta Z_0 + \frac{\partial F_x}{\partial \omega}.\Delta\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi}.\Delta\varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa}.\Delta\kappa + \frac{\partial F_x}{\partial BX}.\Delta BX + \frac{\partial F_x}{\partial BY}.\Delta BY + \frac{\partial F_x}{\partial BZ}.\Delta BZ + \frac{\partial F_x}{\partial \omega'}.\Delta\omega' + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi'}.\Delta\varphi' + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa'}.\Delta\kappa' + \frac{\partial F_x}{\partial X_A}.\Delta X_A + \frac{\partial F_x}{\partial Y_A}.\Delta Y_A + \frac{\partial F_x}{\partial Z_A}.\Delta Z_A + = 0$$

$$F_y = F_{y0} + \frac{\partial F_y}{\partial X_0}.\Delta X_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Y_0}.\Delta Y_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Z_0}.\Delta Z_0 + \frac{\partial Fy}{\partial \omega}.\Delta\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi}.\Delta\varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa}.\Delta\kappa + \frac{\partial F_y}{\partial BX}.\Delta BX + \frac{\partial F_y}{\partial BY}.\Delta BY + \frac{\partial F_y}{\partial BZ}.\Delta BZ + \frac{\partial F_y}{\partial \omega'}.\Delta\omega' + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi'}.\Delta\varphi' + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa'}.\Delta\kappa' + \frac{\partial F_y}{\partial X_A}\Delta X_A + \frac{\partial F_y}{\partial Y_A}.\Delta Y_A + \frac{\partial F_y}{\partial Z_A}.\Delta Z_A = 0 \quad (۳)$$

رابطه ۳ شامل پارامترهای تعیین شده در رابطه ۲ و پارامترهای $\frac{\partial F_x}{\partial \kappa'}$، $\frac{\partial F_x}{\partial \varphi'}$، $\frac{\partial F_x}{\partial \omega'}$، $\frac{\partial F_x}{\partial BZ}$، $\frac{\partial F_x}{\partial BY}$، $\frac{\partial F_x}{\partial BX}$ مشتق نسبت به پارامتر-

های توجیه نسبی بین دو عدسی دوربین استریو و ΔBX، ΔBY، ΔBZ، $\Delta\omega'$، $\Delta\varphi'$، $\Delta\kappa'$ مقادیر تصحیحات پارامترهای توجیه نسبی می‌باشند. در جدول ۲، متوسط خطای تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی هر دوربین استریو و همچنین متوسط خطای تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین عدسی دوربین‌های استریوی متوالی در فرآیند کالیبراسیون سیستم آورده شده است.

جدول ۲: متوسط خطای تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی هر دوربین استریو و متوسط خطای تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین عدسی دوربین‌های استریوی متوالی.

پارامترها	خطای بین دو عدسی هر دوربین	خطای بین عدسی دوربین‌های متوالی
Δω (degree)	0.02395	0.02482
Δφ (degree)	0.00624	0.02376
Δκ (degree)	0.01893	0.03950
XΔ (mm)	0.36924	0.61392
YΔ (mm)	0.24870	0.55771
ZΔ (mm)	0.52352	0.68844

با توجه به مقادیر جدول فوق، در تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی هر دوربین استریو میانگین خطای برآورد پارامترهای دورانی ۰/۰۱۶ درجه و میانگین خطای برآورد پارامترهای انتقالی ۰/۳۸۱ میلیمتر و در تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین عدسی دوربین‌های استریوی متوالی میانگین خطای برآورد پارامترهای دورانی ۰/۰۲۹ درجه و میانگین خطای برآورد پارامترهای انتقالی ۰/۶۱۹ میلیمتر به‌دست آمد. می‌توان گفت، دقت تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی هر دوربین استریو بهتر از دقت تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دو دوربین استریوی متوالی است. دلیل اصلی این مسئله، انعطاف پذیری بیشتر در شبکه اخذ تصاویر و شبکه مناسب‌تر تصویربرداری است. زیرا در تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین هر دو دوربین استریوی متوالی، سیستم ثابت بوده و میدان آزمون دوران داده شد.

۴- بازسازی بصری

تصاویر گرفته شده از محیط حاصل از دوربین‌های استریو ممکن است دارای اختلاف رنگ و درجه روشنایی باشند. در این تحقیق ابتدا تصحیحات رادیومتریک روی تصاویر به دو روش مدل قطری و مدل خطی انجام شده [۷] و با استفاده از آنها تصاویر از لحاظ اختلاف رنگ و روشنایی متوازن می‌شوند. با توجه به اینکه در سیستم پیشنهادی، اخذ تصاویر هم‌زمان بوده و تغییرات شدید روشنایی بین تصاویر بوجود نمی‌آید. در نتیجه دو روش مدل قطری و مدل خطی به‌عنوان روش‌هایی ساده و سریع نیازهای سیستم استریو پانوراما پیشنهادی را برطرف می‌نماید و در این تحقیق از این دو روش استفاده شده است. در مرحله بعد برای هر زوج تصویر دوربین استریو یک مدل استریوی آناگلیف تشکیل می‌شود. مهم‌ترین فرآیند در این زمینه تعیین نقاط متناظر بین زوج تصویر برای تعریف رابطه تبدیل دو تصویر است که با توجه به قابلیت مناسب روش سیفت[1] [۱۸، ۱۹] در تناظریابی، از این روش جهت تعیین نقاط متناظر استفاده شده است. همچنین برای کنترل فرآیند تناظریابی و حذف نقاط نامناسب تناظریابی شده از الگوریتم رنسک[2] [۲۰] استفاده می‌گردد. پس از تعیین نقاط متناظر، تابع تبدیل هم نگاری بین هر زوج تصویر به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\lambda\begin{bmatrix}x'\\y'\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3}\\H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3}\\H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\\1\end{bmatrix} \qquad (۴)$$

در این تبدیل، x,y و x',y' به‌ترتیب مختصات تصویر عکس چپ و راست می‌باشند و $H_{i,j}$ ها پارامترهای تبدیل ماتریس هم‌نگاری هستند. پس از اعمال این تبدیل و هم صفحه نمودن زوج تصویر، تصویر استریو بصورت آناگلیف از باند سبز-آبی تصویر سمت چپ و باند قرمز تصویر سمت راست تولید می‌شود.

پس از تشکیل مدل استریوی آناگلیف برای هر دوربین استریو، اتصال تصاویر به یکدیگر و تولید یک مدل استریو پانوراما یکپارچه انجام می‌شود. با توجه به زاویه چینش دوربین‌های استریو روی صفحه سیستم، بین تصاویر هر دو دوربین استریوی متوالی حداقل ۲۰ درصد پوشش وجود دارد و برای اتصال تصاویر متوالی از ناحیه مشترک بین آنها استفاده می‌شود.

پس از تعیین نقاط متناظر، ماتریس تبدیل هم نگاری بین دو تصویر متوالی مطابق رابطه ۴ تعیین خواهد شد. سپس این تبدیل به مدل استریوی دوم اعمال می‌شود تا در صفحه مدل استریوی اول قرار گیرد و یکپارچه شوند. به همین ترتیب، مدل استریوی بعدی به مدل یکپارچه شده اتصال می‌یابد. در شکل ۵ نمونه‌ای از تناظریابی و اتصال بین دو تصویر متوالی دیده می‌شود.

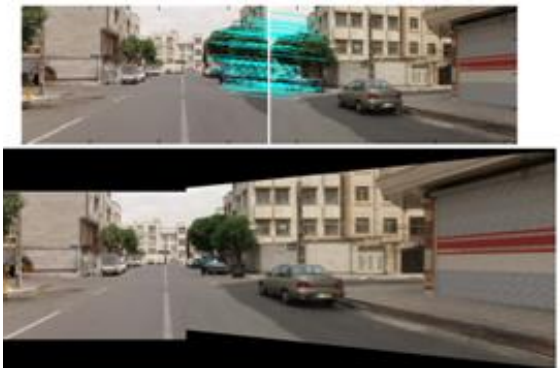
یکی از مشکلات استفاده از تناظریابی، امکان عدم تعیین نقاط کلیدی به‌علت بافت خاص تصاویر است. در سیستم استریو

[1] Sift
[2] Ransac

پانوراماي پیشنهادی، با توجه به پوشش بیش از ۹۵ درصدی بین زوج تصویر هر دوربین استریو، معمولا تناظریابی در مرحله تشکیل مدل استریو با مشکل مواجه نمی‌شود. اما با توجه به ناحیه پوشش کم بین دو تصویر متوالی، تعداد نقاط مشترک پیدا شده بین دو تصویر کاهش خواهد یافت و حتی ممکن است تعداد نقاط کافی و با پراکندگی مناسب یافت نشود. یکی از مزایای مهم سیستم پیشنهادی این است که با توجه به اینکه پارامترهای دورانی و انتقالی بین دوربین‌های استریوی متوالی که از مرحله کالیبراسیون قبلا تعیین شده است، ثابت می‌باشند، می‌توان از این اطلاعات برای تعیین ماتریس تبدیل هم نگاری بین دو تصویر متوالی استفاده نمود که این موضوع تولید استریو پانوراما را از فرآیند تناظریابی بی‌نیاز می‌سازد. با داشتن پارامترهای توجیه داخلی و پارامترهای توجیه نسبی، می‌توان ماتریس تبدیل هم نگاری را از رابطه زیر به‌دست آورد [۲۱]:

$$\begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ 0 & 0 & -1/f \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{2,1} & -(m_{1,1}X_0 + m_{2,1}Y_0 + m_{3,1}Z_0) \\ m_{1,2} & m_{2,2} & -(m_{1,2}X_0 + m_{2,2}Y_0 + m_{3,2}Z_0) \\ m_{1,3} & m_{2,3} & -(m_{1,3}X_0 + m_{2,3}Y_0 + m_{3,3}Z_0) \end{bmatrix}}_{B} \quad (۵)$$

در رابطه فوق، ماتریس A حاوی پارامترهای توجیه داخلی و ماتریس B حاوی پارامترهای توجیه نسبی (دوران و انتقال‌ها) است.



شکل ۵: تناظریابی بین دو تصویر متوالی (بالا) و اتصال آنها به یکدیگر (پایین).

۵- بازسازی هندسی

بخش بازسازی هندسی محیط شامل پیاده‌سازی الگوریتم‌های زمین مرجع‌سازی مدل استریو پانوراماي تولید شده و یکپارچه-سازی این مدل‌ها است. در سیستم پیشنهادی، با توجه به ثبات اجزای سیستم از اطلاعات مرحله کالیبراسیون به‌عنوان مقادیر ثابت در فرآیند زمین مرجع سازی استفاده می‌شود که از مزایای مهم ساختار پیشنهادی است.

بازسازی هندسی در سیستم استریو پانوراماي پیشنهادی شامل سه مرحله ایجاد سیستم مختصات مدلی برای هر دوربین استریو؛ برقراری ارتباط بین سیستم مختصات‌های مدلی دوربین‌های استریو و ایجاد سیستم مختصات یکپارچه استریو پانوراما؛ و ایجاد ارتباط بین سیستم مختصات استریو پانوراما و سیستم مختصات زمینی است. روش کارآمد فرآیند بازسازی هندسی، استفاده از یک سرشکنی یکجا به روش دسته اشعه است. اما در سیستم پیشنهادی، به این صورت عمل شده است که ابتدا هندسه هر دوربین مستقلا تشکیل شده و سپس تمامی آنها یکپارچه شده و زمین مرجع شده اند. دلیل استفاده از این روش این است که اولا سیستم پیشنهادی در حرکت مستقیم در خیابان تصویربرداری انجام می‌دهد که در این‌صورت شبکه مناسب تصویربرداری جهت سرشکنی یکجا به‌وجود نخواهد آمد. همچنین گفته شد که یکی از مزایای سیستم پیشنهادی، ثبات اجزای آن نسبت به یکدیگر است که در صورت تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین دوربین‌ها از قبل، تشکیل سیستم‌های مختصات و به طور کلی مراحل بازسازی هندسی تسهیل می‌شود. لذا در مراحل بازسازی هندسی از روش تشکیل مستقل مدل‌ها، یکپارچه‌سازی آنها و زمین مرجع سازی استفاده شد.

۵-۱- تشکیل سیستم مختصات مدلی هر دوربین استریو

چنانچه سیستم مختصات مدلی بر اساس مبنای عدسی سمت چپ تعریف شود، می‌توان مقادیر پارامترهای موقعیت و دوران‌ها را برای دوربین سمت چپ برابر صفر در نظر گرفت. ($X_0^1 = Y_0^1 = Z_0^1 = \omega_0^1 = \varphi_0^1 = \kappa_0^1 = 0$). با در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای توجیه نسبی حاصل از مرحله کالیبراسیون (دوران‌ها و انتقال‌ها) عدسی سمت راست دوربین استریو نسبت به عدسی سمت چپ و نوشتن معادلات شرط هم‌خطی برای دو نقطه متناظر در زوج تصویر دوربین استریو خواهیم داشت:

$$\begin{cases} x_1 + \Delta x_1 + f_1 \dfrac{X}{Z} = 0 \\ y_1 + \Delta y_1 + f_1 \dfrac{Y}{Z} = 0 \\ x_2 + \Delta x_2 + f_2 \dfrac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0 \\ y_2 + \Delta y_2 + f_2 \dfrac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Z - Z_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0 \end{cases} \quad (۶)$$

در رابطه فوق، x, y مختصات تصویری دو نقطه متناظر در زوج عکس استریو، f فاصله اصلی، Δx Δy چند جمله‌ای حاوی پارامترهای توجیه داخلی، X_0، Y_0 Z_0 پارامترهای انتقال و $m_{i,j}$

درایه‌های ماتریس دورانی توحیه نسبی بین دو عدسی دوربین استریو، و X، Y، Z مختصات مدلی نقطه می‌باشند.

۵-۲- تشکیل سیستم مختصات استریو پانوراما

با توجه به اینکه سیستم مختصات مدلی برای هر دوربین استریو با مبدا عدسی چپ تعریف شده است و با استفاده از مقادیر پارامترهای انتقالی و دورانی بین دو عدسی چپ هر دو دوربین استریوی متوالی که از مرحله کالیبراسیون به‌دست آمده است، می‌توان یک سیستم مختصات مدلی یکپارچه برای استریو پانوراما تعریف نمود. مبدا این سیستم مختصات یکپارچه سیستم مختصات مدلی دوربین استریوی اول سیستم استریو پانوراما در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از مقادیر پارامترهای توجیه نسبی بین دوربین-های استریوی متوالی، مختصات مدلی نقطه در سیستم مختصات مدلی یک دوربین استریو را می‌توان به سیستم مختصات مدلی دوربین استریوی اول (مبدا سیستم مختصات یکپارچه استریو پانوراما) با استفاده از رابطه زیر انتقال داد:

$$\begin{aligned} Z_1 &= M_1 Z_2 + T_1 \\ Z_1 &= M_1(M_2 Z_3 + T_2) + T_1 \\ &\vdots \\ Z_1 &= M_1(M_2(\ldots(M_{i-1}(Z_i) + T_{i-1}) + T_{i-2}) + \ldots) + T_1 \end{aligned} \qquad (۷)$$

در آخرین سطر رابطه ۷، Z_1 بردار مختصات مدلی در سیستم مختصات دوربین استریوی اول، Z_i بردار مختصات مدلی در سیستم مختصات دوربین i ام، و T_{i-1} و M_{i-1} به ترتیب بردار انتقال و ماتریس دوران بین دوربین استریوی $i-1$ ام و دوربین استریوی i ام است.

۵-۳- زمین مرجع‌سازی و رجیستریشن بین مدل‌های استریو پانوراما

انجام زمین مرجع سازی نیازمند نقاط کنترل زمینی است. در مرحله زمین مرجع سازی، با استفاده از مختصات مدلی نقاط کنترل در سیستم مختصات یکپارچه استریو پانوراما و همچنین مختصات زمینی آنها، با استفاده از تبدیل همسان سه‌بعدی[1] می-توان ارتباط بین سیستم مختصات مدلی یکپارچه استریو پانوراما و سیستم مختصات زمینی را برقرار نمود.

برای پوشش کامل یک منطقه، نیاز به اخذ مدل‌های استریو پانوراما از ایستگاه‌های مختلف است. برای کاهش نیاز به نقاط کنترل و افزایش استحکام سرشکنی، می‌توان مدل‌های استریو پانوراما تولید شده را در یک فرآیند سرشکنی به همراه یکدیگر رجیستر و زمین مرجع نمود. برای انجام این فرآیند، علاوه بر استفاده از نقاط کنترل موجود در محیط، از نقاط گرهی مشترک بین دو استریو پانوراما نیز استفاده می‌شود که موجب افزایش درجه آزادی و استحکام سرشکنی خواهد شد. مختصات این نقاط کنترل و گرهی در سیستم مختصات مدلی استریو پانوراما مربوطه مطابق توضیحات بخش‌های قبلی تعیین می‌شود.

با بکارگیری مقادیر اولیه پارامترهای زمین مرجع سازی، رابطه‌ای که برای هر نقطه کنترل در هر استریو پانوراما نوشته می‌شود، به صورت رابطه ۸ خواهد بود که از بسط معادلات تبدیل همسان سه‌بعدی بدست آمده است:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \lambda} & \frac{\partial F}{\partial \Omega} & \frac{\partial F}{\partial \Phi} & \frac{\partial F}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial F}{\partial T_X} & \frac{\partial F}{\partial T_Y} & \frac{\partial F}{\partial T_Z} \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} & \frac{\partial G}{\partial \Omega} & \frac{\partial G}{\partial \Phi} & \frac{\partial G}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial G}{\partial T_X} & \frac{\partial G}{\partial T_Y} & \frac{\partial G}{\partial T_Z} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} & \frac{\partial H}{\partial \Omega} & \frac{\partial H}{\partial \Phi} & \frac{\partial H}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial H}{\partial T_X} & \frac{\partial H}{\partial T_Y} & \frac{\partial H}{\partial T_Z} \end{bmatrix}^{(O)}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta\Omega \\ \Delta\Phi \\ \Delta\mathrm{K} \\ \Delta T_X \\ \Delta T_Y \\ \Delta T_Z \end{bmatrix}}_{\Delta P} = \underbrace{\begin{bmatrix} -F^{(O)} \\ -G^{(O)} \\ -H^{(O)} \end{bmatrix}}_{C} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق، ماتریس A حاوی مشتق معادلات نسبت به پارامترهای زمین مرجع سازی به ازای مقادیر اولیه آنها، ماتریس ΔP حاوی مقادیر تصحیحات پارامترها، و ماتریس C حاوی مقادیر معادلات به ازای مقادیر اولیه پارامترها می‌باشند. اما برای هر نقطه گرهی، می‌بایست در بسط معادلات تبدیل همسان سه‌بعدی، علاوه بر پارامترهای زمین مرجع سازی، نسبت به مختصات زمینی نقاط آنها نیز مشتق گرفت:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \lambda} & \frac{\partial F}{\partial \Omega} & \frac{\partial F}{\partial \Phi} & \frac{\partial F}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial F}{\partial T_X} & \frac{\partial F}{\partial T_Y} & \frac{\partial F}{\partial T_Z} \\ \frac{\partial G}{\partial \lambda} & \frac{\partial G}{\partial \Omega} & \frac{\partial G}{\partial \Phi} & \frac{\partial G}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial G}{\partial T_X} & \frac{\partial G}{\partial T_Y} & \frac{\partial G}{\partial T_Z} \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} & \frac{\partial H}{\partial \Omega} & \frac{\partial H}{\partial \Phi} & \frac{\partial H}{\partial \mathrm{K}} & \frac{\partial H}{\partial T_X} & \frac{\partial H}{\partial T_Y} & \frac{\partial H}{\partial T_Z} \end{bmatrix}^{(O)}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta\Omega \\ \Delta\Phi \\ \Delta\mathrm{K} \\ \Delta T_X \\ \Delta T_Y \\ \Delta T_Z \end{bmatrix}}_{\Delta P} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial X} & \frac{\partial F}{\partial Y} & \frac{\partial F}{\partial Z} \\ \frac{\partial G}{\partial X} & \frac{\partial G}{\partial Y} & \frac{\partial G}{\partial Z} \\ \frac{\partial H}{\partial X} & \frac{\partial H}{\partial Y} & \frac{\partial H}{\partial Z} \end{bmatrix}^{(O)}}_{B} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}}_{\Delta D} = \underbrace{\begin{bmatrix} -F'^{(O)} \\ -G'^{(O)} \\ -H'^{(O)} \end{bmatrix}}_{C} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق، ماتریس B حاوی مشتق نسبت به مختصات زمینی نقاط گرهی به ازای مقادیر اولیه، و ماتریس ΔD حاوی مقادیر تصحیحات مختصات زمینی نقاط گرهی می‌باشند. نهایتا برای n نقطه کنترل موجود در استریو پانوراما اول، m نقطه کنترل موجود در استریو پانوراما دوم و p نقطه گرهی مشترک بین دو استریو پانوراما تعداد ((3n+3p)+(3m+3p)) معادله و (3p+7+7) مجهول وجود خواهد داشت. با حل دستگاه معادلات فوق، پارامترهای زمین مرجع سازی هر استریو پانوراما و مختصات زمینی نقاط گرهی یکجا به‌دست خواهند آمد.

[1] 3D Similarity Transformation

۶- ارزیابی سیستم استریو پانوراما

برای ارزیابی قابلیت سیستم استریو پانوراما در بازسازی بصری و هندسی محیط شهری، سیستم مورد نظر پس از کالیبراسیون اجزای آن، بدون تغییر در بازسازی قسمتی از یک خیابان با عرض ۱۸ متر مورد بررسی قرار گرفت. در محیط مورد نظر، توسط سیستم پیشنهادی از دو ایستگاه به فاصله حدود ۱۵ متر از یکدیگر تصویربرداری شد. سپس مطابق مطالب بخش‌های گذشته، برای تصاویر هر ایستگاه، مدل‌های استریو تولید شده و با اتصال آنها به یکدیگر، نهایتا دو مدل بصری استریو پانوراما ایجاد شد. در مرحله تولید مدل‌های استریو ، بطور متوسط تعداد ۱۲۸ نقطه متناظر بین هر دو تصویر و در مرحله اتصال مدل‌های استریو بطور متوسط تعداد ۲۹ نقطه متناظر بین هر دو تصویر تعیین شدند که دلیل کاهش تعداد نقاط متناظر در دومی، پوشش ۲۰ درصدی بین مدل‌های متوالی بود.

سپس همان‌طور که گفته شد، استریو پانوراما به هر دو روش استفاده از نقاط متناظر و بدون استفاده از آنها با استفاده از اطلاعات پارامترهای کالیبراسیون تولید شد. در شکل ۶، دو استریو پانورامای تولید شده از تصاویر مربوط به ایستگاه اول نشان داده شده است.

شکل ۶: دو استریو پانورامای تولید شده با استفاده از اتصال به روش تناظریابی (بالا) و روش استفاده از اطلاعات کالیبراسیون (پایین).

با بررسی کیفیت دو استریو پانورامای تولید شده، مشاهده شد که هر دو استریو پانوراما دارای یکپارچگی و دید بصری مناسب می‌باشند. همچنین، دوربین‌های سیستم در تصویربرداری هر ایستگاه، به‌صورت کاملا هم‌زمان عمل می‌نمایند که موجب شده است عوارض متحرک در محیط خللی در تناظریابی، اتصال تصاویر و تولید استریو پانوراما ایجاد نکنند که این مسئله از مزایای مهم سیستم پیشنهادی است. اما استریو پانورامای حاصل اتصال به روش تناظریابی دارای نتایج بهتری خصوصا در قسمت‌های مرزی بوده و از یکپارچگی مطلوب‌تری برخوردار است. دلیل نتایج بهتر روش تناظریابی این است که با توجه به تامین تعداد نقاط متناظر مورد نیاز و همچنین دقت‌های زیر پیکسل در تناظریابی، ماتریس‌های تبدیل به‌دست آمده دارای دقت بالایی می‌باشند؛ حال آنکه در استفاده از روش بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون، تعیین ماتریس‌های تبدیل وابسته به دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون است. از این رو بهتر است در مناطقی که نقاط متناظر به تعداد کافی یافت می‌شوند، از روش تناظریابی برای تعیین ماتریس تبدیل استفاده نمود و از روش بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون در مناطقی که تناظریابی با مشکل مواجه است، به عنوان یک روش جایگزین مناسب استفاده کرد.

برای بازسازی هندسی، در محیط مذکور، تعداد ۱۶ نقطه به عنوان نقاط کنترل روی نمای ساختمان‌های محیط در نظر گرفته شد و مختصات آنها در یک شبکه ژئودتیک با دقت ۱ سانتیمتر تعیین شد. تعداد ۹ نقطه از این نقاط به‌عنوان نقاط کنترل انتخاب شده و ۷ نقطه نیز به عنوان نقاط چک در نظر گرفته شدند. در شکل ۷ نقاط کنترل در نظر گرفته شده روی نمای ساختمان‌ها مشاهده می‌شود. همچنین، تعداد ۴۲ نقطه متناظر مناسب بین دو استریو پانوراما به‌عنوان نقاط گرهی و با تناظریابی اتوماتیک تعیین شدند.

شکل ۷: نقاط کنترل در نظر گرفته شده روی نمای ساختمان‌ها.

زمین مرجع سازی دو استریو پانوراما، طی یک فرآیند سرشکنی و به‌صورت هم‌زمان انجام شد و پارامترهای زمین مرجع سازی محاسبه شدند. در این راستا، متوسط خطای مختصات زمینی نقاط گرهی در راستای X، Y و Z به ترتیب برابر ۴۰ میلیمتر، ۵۲ میلیمتر و ۴۳ میلیمتر به‌دست آمد. جهت بررسی دقت و ارزیابی سیستم پیشنهادی، دقت تعیین مختصات نقاط چک مورد بررسی قرار گرفت. از ۷ نقطه چک، دو نقطه دلیل وجود مانع تنها در یک استریو پانوراما و ۵ نقطه دیگر در هر دو استریو پانوراما دیده می‌شدند.

با توجه به مختصات زمینی اندازه‌گیری شده نقاط چک و همچنین مختصات زمینی آنها حاصل از شبکه ژئودتیک، در جدول ۳ اختلاف مختصات این نقاط نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از جدول فوق مشاهده می‌شود که متوسط فاصله نقاط چک از ایستگاه تصویربرداری اول ۱۷/۱۲ متر و متوسط فاصله نقاط چک از ایستگاه تصویربرداری دوم ۱۰/۲۵ متر است و RMSE در راستای X، Y، و Z به‌ترتیب ۷۸، ۱۰۱ و ۵۳ میلیمتر به‌دست آمد.
با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود که بیشترین خطا مربوط به نقاطی است که تنها در یک استریو پانوراما دیده شده و اندازه‌گیری شده‌اند، خصوصا نقطه C5 که از فاصله ۲۲ متری

اندازه‌گیری شده است و همچنین زاویه بین هر یک از این دو نقطه و دو ایستگاه تصویربرداری کوچک است. برای نقطه C14، با توجه به اینکه فقط از ایستگاه دوم دیده شده و امتداد اندازه‌گیری آن موازی محور X ها بوده است، دارای مولفه خطای بزرگی در این راستا است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین خطا در راستای محور Y سیستم مختصات زمینی رخ داده است که یکی از دلایل آن این است که امتداد بین دو ایستگاه تصویربرداری تقریبا موازی محور Y است. خطا برای نقاطی که در هر دو استریو پانوراما رویت شده و اندازه‌گیری شده‌اند، در محدوده قابل قبولی و زیر ۱۰۰ میلیمتر است.

جدول ۳: اختلاف مختصات زمینی نقاط چک حاصل از اندازه-گیری و حاصل از شبکه ژئودتیک.

شماره نقطه چک	فاصله از ایستگاه اول (متر)	فاصله از ایستگاه دوم (متر)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
C3	14.803	7.149	22	-17	22
C5	22.413	12.556	68	235	97
C12	19.280	11.870	-45	48	41
C13	15.377	10.953	60	66	53
C14	16.636	11.228	-174	-72	-56
C15	11.132	8.855	-9	-56	-34
C16	20.218	9.108	-34	-39	41

علاوه بر بررسی مختصات نقاط چک، دقت اندازه‌گیری طول بین چند نقطه چک نیز بررسی شد. برای این منظور، طول بین چند نقطه از نقاط چک موجود اندازه‌گیری و مقدار آن با طول محاسبه شده آنها از مختصات به‌دست آمده از شبکه ژئودتیک مقایسه شد. در شکل ۸، طول‌های چک اندازه‌گیری شده در محیط نشان داده شده است.

شکل ۸: طول‌های چک اندازه‌گیری شده در محیط.

در جدول ۴، طول‌های اندازه‌گیری شده بین نقاط چک و اختلاف آنها با طول‌های محاسبه شده از مختصات به‌دست آمده از شبکه ژئودتیک آورده شده است. همان‌طور که در نتایج ستون اختلاف در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین خطا در اندازه‌گیری طول-های C5-C16 و C13-C14 است که دلیل آن این است که یکی از نقاط دو سر این طول‌ها نقاطی هستند که مختصات آنها تنها در یک استریو پانوراما مشاهده و اندازه‌گیری شده است. همچنین، خطای طول C12-C13 نیز نسبتا زیاد (۱۵۳ میلیمتر) است. می-توان گفت، دلیل عمده خطای اندازه‌گیری این طول آن است که نقاط دو سر آن در تصاویر مربوط به دوربین‌های ۷ به بعد دو استریو پانوراما دیده می‌شوند که در نتیجه خطای انتقال سیستم مختصات این دوربین‌ها به سیستم مختصات دوربین اول زیاد بوده است.

جدول ۴: طول‌های اندازه‌گیری شده بین نقاط چک و اختلاف آنها با طول‌های محاسبه شده از مختصات بدست آمده از شبکه ژئودتیک.

شماره طول	مقدار محاسباتی (متر)	مقدار اندازه‌گیری شده (متر)	اختلاف (متر)
C3-C15	5.088	5.014	0.074
C5-C16	5.265	4.958	0.307
C12-C13	4.926	4.979	-0.153
C13-C14	2.458	2.689	-0.231
C13-C15	18.662	18.619	0.043
C12-C16	18.150	18.229	-0.079

با توجه به نتایج ارزیابی سیستم می‌توان گفت، یکی از ضعف‌های سیستم پیشنهادی، باز کم بین دو عدسی هر دوربین استریو است که در اندازه‌گیری مختصات نقاطی که تنها در یک استریو پانوراما دیده می‌شوند، دقت خصوصا در راستای محور تصویربرداری کاهش می‌یابد. لذا باید طراحی شبکه تصویربرداری مناسبی در مدل‌سازی محیط در بکارگیری سیستم مورد نظر انجام داد که هر نقطه از محیط حداقل در تصاویر دو ایستگاه دیده شود. لذا چنانچه دو یا چند استریو پانوراما مجاور با یکدیگر در یک سرشکنی یکجا زمین مرجع شوند، اولا نیاز به نقاط کنترل کاهش می‌یابد و دوم نقاط بیشتری درگیر فرآیند سرشکنی شده و استحکام آن افزایش می‌یابد. نهایتا اگر استخراج اطلاعات هندسی مانند مختصات و طول به کمک استریو پانوراماهای مجاور نیز انجام شود، دقت برآورد آنها در حد قابل قبول و مدنظر در مناطق شهری (۲۰ سانتیمتر برای تولید نقشه‌های ۱:۱۰۰۰) است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم مدل‌ساز استریو پانوراما ارائه شد که با توجه به نیازهای بصری و هندسی مدل‌سازی در مناطق شهری می‌تواند تا حدود زیادی نقاط ضعف سیستم‌های موجود را برطرف نماید. سیستم پیشنهادی بر مبنای استریو پانوراما افقی استوار است و در آن از چند دوربین استریو استفاده شده است. در این راستا، ابتدا سیستم مورد نظر کالیبراسیون شد و سپس در بازسازی بصری و هندسی محیط مورد ارزیابی قرار گرفت.

در مرحله بازسازی بصری محیط دیده شد که با توجه به اخذ تصاویر به‌صورت هم‌زمان، اولا تولید استریو پانوراما یکپارچه به-

صورت ۳۶۰ درجه میسر شد و ثانیا عوارض متحرک در تولید استریو پانوراما تاثیرگذار نبودند، خصوصا چنانچه از تناظریابی برای اتصال تصاویر استفاده شده باشد این مسئله اهمیت بیشتری می-یابد. همچنین با توجه به ثبات دوربین‌ها بر روی سیستم، اثرات ناشی از لرزش سیستم تصویربرداری همانند برخی سیستم‌های متداول بوجود نیامده است. نهایتا با توجه به استفاده از پارامترهای توجیه نسبی بین دوربین‌ها، امکان اتصال تصاویر بدون نیاز به تناظریابی نیز بوجود آمد که موارد اشاره شده همگی از مزایای روش پیشنهادی هستند.

در بازسازی هندسی محیط، با توجه به اینکه پارامترهای توجیه نسبی بین دوربین‌ها از مرحله کالیبراسیون به‌دست آمد، تعریف سیستم مختصات مدلی دوربین استریو و تعیین سیستم مختصات مدلی یکپارچه استریو پانوراما تسهیل شد که از مزایای سیستم پیشنهادی است. در بررسی خطای نقاط چک و طول‌های چک حاصل از مرحله بازسازی هندسی، ملاحظه شد که بیشترین خطا مربوط به نقاطی هستند که تنها در یک استریو پانوراما دیده شده و اندازه‌گیری شدند. همچنین، نقاطی که در راستای امتداد دو ایستگاه تصویربرداری اندازه‌گیری شده بودند و زاویه آنها با دو ایستگاه کوچک بود، دقت مختصاتی پایینی داشتند. نتایج حاصل از بررسی خطا نشان داد، در مواردی که از ایستگاه‌های مجاور نیز در اندازه‌گیری‌ها استفاده شد، خطاهای اندازه‌گیری مختصات و طول‌ها در حد زیر ۱۰ سانتیمتر به‌دست می‌آید.

با توجه به نتایج حاصل از بازسازی محیط می‌توان نتیجه گرفت، سیستم مدل‌ساز استریو پانوراما می‌تواند بخوبی در فرآیند بازسازی بصری و هندسی در مناطق شهری مورد استفاده قرار گرفته و بسیاری از نیازها در این زمینه را برطرف نماید.

بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در آینده در خصوص توسعه فرآیند بازسازی هندسی توسط سیستم با استفاده از روش سرشکنی دسته پرتو و همچنین بهبود فرآیند رجیستریشن با استفاده از سایر عوارض هندسی مانند خطوط و رجیستریشن در فضایی غیر از تصویر مانند انجام آن در فضای شیئی تحقیق و توسعه انجام شود.

مراجع

[1] D. Cobzas, and H. Zhang, H., "Mobile Robot Localization using Planar Patches and a Stereo Panoramic Model", *Vision Interface*, pp. 94-99, 2001.

[2] S. E. Chen, "QuickTime VR – An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation", *22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH 95, pp. 29-38, 1995.

[3] D. Gledhill, G. Y. Tian, D. Taylor, and D. Clarke, "3D Reconstruction of a Region of Interest using Structured Light and Stereo Panoramic Image", *IEEE Eighth International Conference on Information Visualization*, pp. 1007-1012, 2004.

[4] H. C. Huang, and P. Hung, "SPISY: The Stereo Panoramic Imaging System", *Third Workshop on Real-Time and Media Systems*, Taiwan, pp. 71-78, 1997.

[5] M. Varshosaz, and A. Sh. Amini, "Stereo Panoramas: Problems and Solutions", *XXI International CIPA Symposium*, Athens, 2007.

[6] T. T. Lin, Y. K. Hsiung, G. L. Hong, H. K. Chang, and F. M. Lu, "Development of a Virtual Reality GIS Using Stereo Vision", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 63, pp. 38–48, 2008.

[7] D. Gledhill, *3D Panoramic Imaging for Virtual Environment Construction*. PhD Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, School of Computing and Engineering, the University of Huddersfield, UK, 149 pages, 2009.

[8] S. Peleg, and M. Ben-Ezra, "Stereo Panorama with a Single Camera", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 395-401, 1999.

[9] D. Gledhill, G. Y. Tian, D. Taylor, and D. Clarke, "Panoramic Imaging—a Review", *Computers & Graphics*, Vol. 27, pp. 335-345, 2003.

[10] Y. Qu, W. L. Khoo, E. Molina, and Z. Zhigang, "Multomodal 3D Panoramic Imaging using a Precise Rotating Platform", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 260-265, 2010.

[11] J. Amiri Parian, and A. Gruen, A., "Sensor Modeling, Self-Calibration and Accuracy Testing of Panoramic Cameras and Laser Scanners", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 65, 60-76, 2010.

[12] R. Li, L. Yan, K. Di, and B. Wu, "A New Ground-Based Stereo Panoramic System", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37(B5), pp. 723–727, 2008.

[13] R. Benosman, T. Maniere, and J. Devars, *Panoramic Stereovision Sensor*. Chapter 9 in Panoramic Vision (Eds. R. Benosman & S. B. Kang), Springer, New York, USA, 449 pages, pp. 161–168, 2001.

[14] S. Hua, Q. Huanga, A. Zhang, and J. Qiaoa, "3D Measurement, Reconstruction and Navigation through Panoramic Photography", *International Conference of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, China, pp. 115-118, 2008.

[15] H. Kawasaki, K. Ikeuchi, and M. Sakauchi, "Automatic 3D City Reconstruction using Omni Camera", *IEEE International conference on Multimedia and Expo*, USA, pp. 1653-1656, 2000.

[16] E. Cabral, P. Oliveira, and J. Junior, "An Omnidirectional Stereo Vision System". *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, pp. 643-652, 2008.

[17] A. Goshtasby, "Grover W. Design of a Single-Lens Stereo Camera System", *Pattern Recognition*, Vol. 26, pp. 923–937, 1993.

[18] D. G. Lowe, "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features", *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, pp. 1150–1157, 1999.

[19] D. G. Lowe, "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", *Computer Vision*, Vol. 60, pp. 91–110, 2004.

[20] M. A. Fischler, and R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography", *Communications of the ACM*, Vol. 24(6), 381–395, 1981.

[21] G. H. Seedahmed, and A. F. Habib, "Linear Recovery of the Exterior Orientation Parameters in a Planar Space", *ISPRS Congress*, Commission III, WG III/I, 2002.

[۲۲] میلاد امن‌زاده، محمد سعادت‌سرشت، امیر شاهرخ امینی، "ارائه روشی بهبودیافته برای کالیبراسیون دوربین‌های استریو"، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره اول شماره ۳، ۱۳۹۰.

Providing a New Method for Visual and Geometric Reconstruction of Environment based on Stereo Panorama

Amir Shahrokh Amini
Department of Surveying Engineering, Islamic Azad University – South Tehran Branch, Piroozi Street, Abuzar Boulevard, Dehhaghi Avenue, P. O. Box: 1777613651, Tehran, Iran.
sh_amini@azad.ac.ir

Abstract- 3D urban reconstruction with access to geometric and visual information is used by many organizations. In this regard, using stereo panorama as an image-based method is attended by many manufacturers and users of the urban maps because of the simplicity and providing real visibility. In this paper, a new stereo panorama system based on stereo cameras (that is patented) is presented and three-dimensional reconstruction of urban environments using the system is expressed. Moreover in this article, the process of registration between the stereo panoramic images at different stations is also described to cover whole area. Finally, geometric and visual reconstruction of part of a street was evaluated by the mentioned stereo panorama system. The results of the reconstruction of the environment revealed that unlike most stereo panorama systems in which access to geometric information is sometimes difficult, in the proposed method, in addition to providing a visual space of the environment, geometric measurements is easily possible and achieving the desired accuracy that is needed in urban projects (large map with scale of 1:1000) is possible.

Keywords- Stereo Camera, Stereo Panorama, 3D Reconstruction, Registration.