

ارائه یک روش نوین در توجیه مطلق فریم‌های متوالی ویدیو به منظور تهیه نقشه نماهای معابر شهری

آلاله فلاح^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
alaleh.fallah@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
msaadat@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۳، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۳)

چکیده

در سالهای اخیر، بازسازی سه بعدی جزئیات محیط با استفاده از روش‌های ویدیوگرامتری مطرح در بینایی کامپیوتر بسیار مورد توجه جامعه فتوگرامتری برد کوتاه قرار گرفته است. از اینرو، در این تحقیق یک روش کارا جهت توجیه مطلق فریم‌های متوالی ویدیو به منظور تهیه نقشه نمای معابر شهری با دقت بالا ارائه گردیده است. به طور کلی تولید مدل سه بعدی از دنباله تصاویر ویدیویی شامل پنج گام اصلی کالیبراسیون دوربین، استخراج فریم‌های کلیدی، توجیه اولیه و نسبی فریم‌ها، توجیه نهایی و مطلق و در نهایت بازسازی سه بعدی کامل جزئیات می‌باشد. در این مقاله پیش فرض این است که گام‌های کالیبراسیون دوربین و استخراج فریم‌های کلیدی قبلاً انجام شده و هدف توجیه مطلق فریم‌های کلیدی با روشی کارا است. روش ارائه شده از ترکیب روش‌های ویدیوگرامتری و نقشه برداری کلاسیک جهت توجیه مطلق فریم‌ها بهره می‌گیرد. بدین صورت که پس از توجیه نسبی فریم‌ها و تشکیل یک مدل سرشکن شده از نمای مورد نظر به روش ویدیوگرامتری، به کمک نقاط کنترل موجود در فریم‌ها که مختصات آن‌ها از نقشه‌برداری کلاسیک به دست آمده است، پارامترهای توجیه مطلق فریم‌های تصویری محاسبه می‌شود. طراحی و پیاده‌سازی بخش‌های مختلف روش پیشنهادی به گونه‌ای بوده است که بتواند برای نماهای شهری دارای بافت ضعیف و تکراری و شرایط نامناسب نوری نیز دقت کافی را ارائه نماید. بررسی‌ها نشان از سرعت بالای انجام پردازش‌ها و میزان دقت نقاط سه بعدی بازسازی شده در حدود سانتی‌متر دارند به گونه‌ای که برای مولفه‌های مسطحاتی (موازی صفحه تصویر) خطای کمتر از ۶ سانتی‌متر با انحراف معیار حدود ۳ سانتی‌متر و برای مولفه ارتفاعی (در راستای محور اپتیکی) خطای کمتر از ۷ سانتی‌متر با انحراف معیار ۲ سانتی‌متر به دست آمد. از اینرو روش پیشنهادی می‌توان بصورت عملی برای تهیه نقشه‌های بزرگ مقیاس نمای معابر شهری استفاده نمود.

واژگان کلیدی: تناظریابی تصاویر، توجیه نسبی فریم‌ها، فریم کلیدی، ویدیوگرامتری، نقشه نماهای شهری، بازسازی سه بعدی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

در دنیای امروز شهرها به سرعت در حال پیشرفت و گسترش هستند و طراحان و مدیران شهری برای نظارت و تصمیم‌گیری نیازمند مدلی هستند که هم از نظر هندسی و هم از نظر بصری تا حد امکان به محیط واقعی شهری نزدیک باشد. گرچه فاصله مسطحاتی بین عوارض برداشت شده از طریق نقشه قابل استخراج است، اما اندازه‌گیری جزئیات قابل مشاهده از دید عابر پیاده مانند ابعاد در و پنجره‌ها، تابلوها، ارتفاع ساختمان‌ها، فاصله تا عوارض خاص و مواردی از این نوع، نیازمند مدل سه بعدی است. برای تولید مدل سه بعدی نماهای شهری گذشته از روشهای کلاسیک نقشه برداری مانند توتال استیشن و RTK GPS، تا کنون روش‌های پیشرفته‌تری مانند 3D LiDAR Mobile Mapping, UAV Imaging, Terrestrial Laser Scanning, Spherical Panoramic Imaging مطرح و عملیاتی شده است. مشکل اساسی روشهای کلاسیک زمان بر بودن و هزینه‌های بالای اپراتوری است در مقابل روشهای پیشرفته از تجهیزات گران قیمت برخوردار بوده و نیاز به آموزشهای خاص دارند. در این مقاله بازسازی سه بعدی نماهای شهری با استفاده از یک روش کم هزینه و کاربرپسند از تلفیق پیمایش مختصات با نقشه برداری زمینی و برداشت جزئیات با ویدیوگرامتری پیشنهاد داده شده است.

به طور کلی باید گفت نقشه‌برداری زمینی شامل دو مرحله پیمایش و برداشت است. در پیمایش، مختصات زمینی ایستگاه‌های نقشه‌برداری تعیین می‌شود و در مرحله برداشت، جزئیات هندسی و توصیفی عوارض به صورت سه بعدی به روش تاکنومتری جمع‌آوری می‌شود. این روش دارای مشکلات زیر است: (۱) برداشت جزئیات در آن زمانبر است و به کار میدانی زیادی نیاز دارد (۲) پس از انجام عملیات نقشه‌برداری و بازگشت به دفتر، دسترسی به جزئیات امکان‌پذیر نیست (۳) لزوم اعتماد به شخص نقشه‌بردار (۴) عدم امکان دید همه نقاط از یک ایستگاه و نیاز به ایستگاه‌گذاری جدید. به علاوه در روش ویدیوگرامتری که در آن تصاویر ویدیویی به منظور استخراج مختصات سه بعدی و تفسیر عوارض مشاهداتی به کمک روش‌های فتوگرامتری تفسیر می‌شوند، نیز مشکلاتی مشاهده می‌شود که از آن جمله می‌توان به (۱)

عدم امکان انجام توجیه خارجی به گونه‌ای که فریم‌ها را فقط می‌توان به صورت نسبی توجیه نمود و برای توجیه مطلق به ابزار دیگری نیاز داریم (۲) افزایش تصادفی خطاها اشاره نمود. بنابراین انتظار می‌رود با تلفیق این دو روش بتوان به نتایج مطلوبی در زمینه بازسازی مدل سه بعدی از روی تصاویر که بخش اصلی آن یافتن پارامترهای توجیه خارجی تصاویر است، رسید.

بازسازی مدل سه بعدی از تصاویر دو بعدی یکی از مسائل مهم در بینایی کامپیوتری است. Zhao و Li در [۱] تخمین پارامترهای توجیه نسبی تصاویر را توسط دو روش استفاده از ماتریس ضروری^۱ و استفاده از هندسه اپی‌پولار برای یک دوربین کالیبره شده مورد بررسی قرار داده اند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از ماتریس ضروری گرچه به تعداد نقاط متناظر بیش تری نسبت به روش استفاده از هندسه اپی‌پولار در زوج تصاویر نیاز دارد، اما نتایج آن از نظر دقت اندکی مطلوب تر است. Prakoonwit در [۲] بازسازی سطوح سه بعدی را با استفاده از تصاویر اخذ شده از زوایای دید مختلف و بکارگیری روش منحنی‌های لبه^۲ انجام داده است. لزوم نیاز به استخراج منحنی‌های لبه در کار وی، استفاده از دوربین‌های دارای قدرت تفکیک بالا را دیکته می‌نماید ضمن آنکه برای تصاویر اخذ شده‌ای که دارای مات شدگی باشند محاسبات با مشکل مواجه خواهد شد. Pollefeys در [۳] مدل سه بعدی از دنباله تصاویر را از یک دوربین کالیبره نشده و از طریق بازسازی پروژکتیو و انجام سلف کالیبراسیون با کیفیت بالا، استخراج کرده است. Nistér در [۴] مدل سه بعدی را از دنباله تصاویر استخراج نموده هم چنین پارامترهای توجیه داخلی دوربین و موقعیت دوربین‌ها در لحظه اخذ تصاویر را محاسبه نموده است. در [۳] و [۴] توجیه نسبی فریم‌ها به این صورت است که ابتدا دو فریم اول با الگوریتم پنج نقطه توجیه می‌شوند و پس از تقاطع مختصات مدلی نقاط این دو فریم به دست می‌آیند و با استفاده از این نقاط، ترفیع تصویر بعدی انجام می‌شود و این روند ادامه پیدا می‌کند که موجب افزایش تجمعی خطاها می‌شود. همچنین در [۵] با معلوم فرض کردن پارامترهای توجیه داخلی و با استفاده از الگوریتم پنج

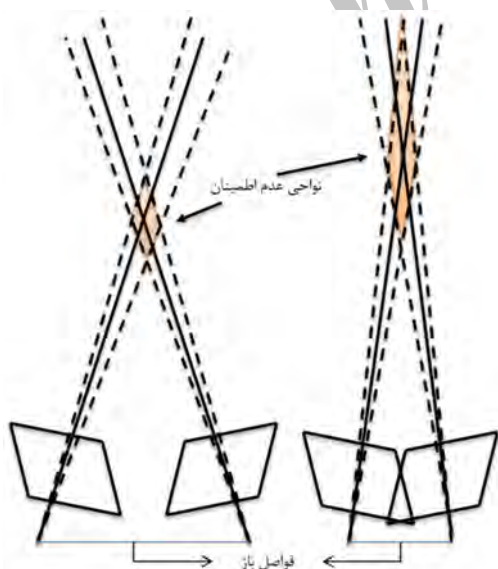
^۱ Essential matrix

^۲ Edge contours



شکل ۱- مراحل کلی روش پیشنهادی

فریم‌ها به عنوان نماینده کل فریم‌ها در دنباله ویدیو تحت عنوان فریم‌های کلیدی انتخاب شوند که بهترین ساختار را برای بازسازی ایجاد کنند. هرچه باز تصاویر بیشتر شود، بازسازی ساختار قوی‌تر شده ولی در عوض کاهش تعداد عوارض نظیر و دقت تجانس‌یابی موجب کاهش دقت بازسازی می‌شود [۱۴]. در شکل (۲) رابطه باز تصویر و میزان عدم اطمینان در نتایج مثلث‌بندی نشان داده شده است.



شکل ۲- ارتباط بین فاصله باز و عدم اطمینان مثلث‌بندی

از طرفی برای برقراری هندسه اپی‌پولار بین تصاویر، حرکت دوربین و ساختار نقاط باید شرایط خاصی داشته

نقطه توجیه نسبی تصاویر و سپس بازسازی‌متریک را انجام داده است. Mordohai و همکارانش در [۶] روشی برای بازسازی سه بعدی نماها از طریق ویدیوی برداشت شده و GPS/INS لحظه‌ای^۱ ارائه کردند که استفاده از این تجهیزات هزینه بر است. در تحقیق پیش رو مراحل مختلف توجیه مطلق فریم‌های متوالی ویدیو با دقت بالا جهت بازسازی مدل سه بعدی نمای یک ساختمان از طریق فیلمبرداری از نما در ترکیب با داده‌های نقشه‌برداری زمینی ارائه خواهد شد تا پارامترهای توجیه خارجی یک مدل زمین مرجع با دقت بالا استخراج شوند و امکان انجام محاسبات زمینی واقعی فراهم گردد. طراحی و پیاده سازی بخش‌های مختلف روش پیشنهادی به گونه‌ای بوده است که بتواند برای نماهای شهری دارای بافت ضعیف و تکراری و شرایط نامناسب نوری نیز دقت کافی را ارائه نماید. در ادامه به بیان مراحل مختلف روش پیشنهادی می‌پردازیم.

۲- روش پیشنهادی

به طور کلی تولید مدل سه بعدی مترابند از دنباله ویدیویی شامل پنج گام اصلی کالیبراسیون دوربین، استخراج فریم‌های کلیدی، توجیه اولیه و نسبی فریم‌ها، توجیه نهایی و مطلق و در نهایت بازسازی سه بعدی کامل جزئیات می‌باشد. در شکل (۱) مراحل مختلف روش پیشنهادی نشان داده شده است. گام اول مربوط به کالیبراسیون دوربین فیلمبرداری است که با فیلمبرداری از یک صفحه آزمون (از فاصله‌ای تقریباً برابر با فاصله برداشت داده) و معرفی تصاویر حاصل از فیلم به نرم افزار australis انجام می‌شود. به این ترتیب پارامترهای کالیبراسیون دوربین جهت استفاده در مراحل بعدی به دست می‌آید.

گام دوم مربوط به استخراج فریم‌های کلیدی از دنباله ویدیوی اخذ شده است. از آنجاییکه بازسازی سه بعدی با استفاده از همه فریم‌های یک دنباله ویدیویی به توان پردازشی بسیار بالایی نیاز دارد [۱۰]، باید تعدادی از

^۱ Real time

باشد و اگر این شرایط برقرار نباشد، موارد چند حالتی^۱ رخ می‌دهد. چند حالتی حرکت^۲ مربوط به وقتی است که دوربین بدون جابه‌جایی حول محورش بچرخد و چند حالتی ساختار^۳ وقتی رخ می‌دهد که همه نقاط سه بعدی هم صفحه باشند. بنابراین سه عامل باز، چند حالتی حرکت و چند حالتی ساختار باید در تعیین فریم‌های کلیدی در نظر گرفته شوند. روش‌هایی که هر سه حالت ذکر شده را در انتخاب فریم‌های کلیدی مد نظر قرار می‌دهند، روش‌های مبتنی بر انتخاب مدل^۴ هستند که بر مبنای اینکه ارتباط بین دو تصویر با مدل هموگرافی یا ماتریس اساسی^۵ بهتر برقرار می‌شود، فریم کلیدی را انتخاب می‌کنند. توضیح کامل این روش در [۱۰] و [۱۵] آمده است. در این پژوهش پیش فرض این است که مراحل کالیبراسیون دوربین و انتخاب فریم‌های کلیدی قبلاً انجام شده‌اند. همانگونه که از شکل (۱) پیداست، گام سوم روش پیشنهادی توجیه اولیه و نسبی فریم‌های کلیدی است که طی آن مدل نسبی تشکیل می‌شود و در گام چهارم توجیه نهایی و مطلق جهت برآورد پارامترهای توجیه خارجی بین زمین و عکس انجام می‌شود. از آنجاییکه تمرکز این تحقیق بر روی گام‌های سوم و چهارم است در بخش‌های بعدی به صورت کامل جزئیات این دو مرحله بیان می‌شود. گام پنجم که مربوط به بازسازی سه بعدی کامل جزئیات است، در تحقیقات آینده مدنظر قرار خواهند گرفت.

طبق پیش فرض‌های در نظر گرفته شده، در ادامه فرض بر این است که منظور از دنباله تصاویر، دنباله فریم‌های کلیدی استخراج شده از دنباله دیدیویی در گام دوم است.

۲-۱- توجیه اولیه و نسبی فریم‌ها

توجیه اولیه و نسبی فریم‌ها از اصلی‌ترین بخش‌های فرایند توجیه مطلق فریم‌های متوالی ویدیو است که خود دارای زیر بخش‌هایی است که در ادامه به توضیح جزئیات هریک از آن‌ها می‌پردازیم.

۲-۱-۱- استخراج عوارض

برای پیدا کردن رابطه بین زوج تصاویر به نقاط تصویری که دارای کیفیت مناسب جهت تناظریابی باشند، نیاز داریم. نقطه‌ای دارای کیفیت مناسب است که اولاً پایدار بوده و در طول زمان تغییر نکند و ثانیاً از همسایه‌های خود قابل تفکیک باشد تا بتوان نظیر آن را به صورت یکتا در تصاویر دیگر پیدا کرد [۶]. از جمله روش‌هایی که نقاط تصویری را استخراج می‌کنند، می‌توان به (SIFT (Scale Invariant Feature Transform ، SURF (Speeded-Up Robust Features ، Harris اشاره نمود که جزئیات پیاده سازی آن‌ها به ترتیب در [۷] ، [۱۶] و [۱۷] آمده است.

۲-۱-۲- تناظریابی عوارض استخراج شده

پس از استخراج عوارض (نقاط) در کلیه فریم‌های تصویری، نقاط می‌بایست بین زوج فریم‌ها تناظریابی شوند. روش تناظریابی با توجه به روش استخراج عارضه متفاوت خواهد بود. در مورد نقاطی که با استفاده از الگوریتم‌هایی همچون Harris استخراج می‌شوند، برای یافتن تناظرها می‌توان از معیار کورلیشن نرمال شده^۶ استفاده نمود. اما در مورد روش‌هایی مانند SURF و SIFT که در آن‌ها برای هر نقطه بردار ویژگی^۷ استخراج می‌شود، روش متفاوتی برای تناظریابی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر مبنای تعیین فاصله اقلیدسی بین بردارهای ویژگی هر نقطه است. به این ترتیب برای هر یک از نقاط در هر تصویر یک بردار با m آرایه محاسبه می‌شود. اگر تصویر اول را به عنوان تصویر مرجع و تصویر دوم را به عنوان تصویر هدف در نظر بگیریم، به ازای محاسبه فاصله اقلیدسی بردار ویژگی هر عارضه در تصویر مرجع از بردار ویژگی همه نقاط در تصویر هدف، یک بردار با n درایه خواهیم داشت که n تعداد عوارض در تصویر هدف است. پس از محاسبه این بردار چند استراتژی برای محاسبه نقطه متناظر در تصویر هدف وجود دارد. در استراتژی اول همه نقاطی که فاصله اقلیدسی برای آن‌ها با نقطه مورد نظر در تصویر مرجع از یک حدآستانه‌ای کمتر است، به عنوان نقطه متناظر در نظر گرفته می‌شوند. در استراتژی دوم نقطه با کوچکترین فاصله اقلیدسی به عنوان نقطه متناظر در نظر

^۱ Degenerate cases

^۲ Motion degeneracy

^۳ Structure degeneracy

^۴ Model selection

^۵ Fundamental matrix

^۶ Normalized Cross Correlation (NCC)

^۷ feature

سپس ماتریس ضروری (E) از روی ماتریس اصلی (F) و ماتریس کالیبراسیون (K) محاسبه می‌شود:

$$E = K^T F K \quad (3)$$

درایه‌های ماتریس K که یک ماتریس ۳×۳ است، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$K = \begin{bmatrix} \frac{f}{s_x} & f s_\theta & O_x \\ 0 & \frac{f}{s_y} & O_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه (۴) f فاصله کانونی دوربین، s_θ در صورتی به کار می‌رود که پیکسل‌های تصویر مربع نباشند و در اکثر کارهای عملی مقدار آن صفر است، s_x و s_y طول و عرض پیکسل‌های تصویر می‌باشند و O_x و O_y مختصات نقطه اصلی^۲ نسبت به سیستم مختصات رقومی تصویر برحسب پیکسل است.

از روی ماتریس E با توجه به متد ارائه شده در [۱۱] دو ماتریس دوران و دو ماتریس انتقال بین دوربین‌ها محاسبه می‌شود و از ترکیب آن‌ها ۴ ماتریس برای توجیه نسبی بین هر زوج فریم خواهیم داشت که هر ماتریس شامل ۳ دوران و ۳ انتقال خواهد بود و از بین این ۴ ماتریس، آن ماتریسی که عمق نقاط مدل را مثبت تعیین کند، به عنوان ماتریس توجیه نسبی بین فریم‌ها در نظر گرفته می‌شود.

از آنجاییکه در توجیه نسبی بین زوج فریم‌ها، دوران و انتقال‌های فریم اول صفر فرض می‌شود (فریم اول ثابت در نظر گرفته می‌شود) و دوران و انتقال فریم دوم نسبت به فریم اول محاسبه می‌شود، در هر زوج فریم، برای فریم اول ماتریس دوران، انتقال و ماتریس توجیه نسبی به ترتیب R، T و Pcam ارائه شده در رابطه (۵) خواهند بود.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, Pcam = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

گرفته می‌شود و در استراتژی سوم ابتدا فواصل از کمترین به بیشترین مرتب می‌شوند سپس اگر اولین کمترین مقدار را d_1 و دومین کمترین مقدار را d_2 بنامیم آن گاه داریم:

$$NNDR = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

در رابطه (۱) اگر NNDR از یک حدآستانه‌ای کمتر بود، نقطه با کمترین d به عنوان نقطه متناظر در نظر گرفته می‌شود [۷]، که این روش مورد استفاده در این تحقیق نیز هست. البته در روش‌های دیگر می‌توان از تلفیق روش‌های مختلف مانند Harris-SIFT به منظور استخراج و تناظریابی عوارض نیز استفاده نمود.

۲-۱-۳ حذف اشتباهات تناظریابی به روش RANSAC

تناظریابی عوارض هر قدر هم که با دقت صورت بگیرد، باز هم عواملی مانند تکرار عوارض مشابه، حرکت نسبی متفاوت عوارض به علت دوری یا نزدیکی تا دوربین و بازتاب‌ها، موجب اشتباه در فرآیند تناظریابی می‌شود و محاسبات مربوط به تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین فریم‌ها را با مشکل روبرو خواهد نمود. برای حذف این اشتباهات می‌توان از الگوریتم‌های کارآمدی مانند RANSAC در ترکیب با توابع دیگر استفاده نمود [۸]، [۹]. در روش پیشنهادی برای یافتن نقاط متناظر از ترکیب RANSAC با الگوریتم برقراری هندسه اپی‌پولار بین زوج تصاویر استفاده می‌شود.

۲-۱-۴ برآورد پارامترهای توجیه نسبی

روش پیشنهادی، جهت برآورد پارامترهای توجیه نسبی فریم‌ها، ابتدا باید ماتریس ضروری (E) از روی ماتریس اصلی (F) تعیین شود بنابراین ابتدا به تعریف ماتریس اصلی می‌پردازیم. ماتریس اصلی یک ماتریس با ابعاد ۳*۳ با رنک^۱ دو است که اگر نقطه X در فضای سه بعدی، در تصویر اول معادل با x و در تصویر دوم معادل با x' باشد، آن گاه ماتریس اصلی (F) از رابطه (۲) تعیین می‌شود.

$$x'^T F x = 0 \quad (2)$$

^۲ Principal point

^۱ rank

تصاویر، یک در نظر گرفته شده که در این بخش مقدار واقعی این مقیاس باید محاسبه و اعمال شود تا نقاط مشترک مدل‌ها در سیستم‌های مختصات مجزا، پس از انتقال به یک سیستم مختصات مشترک، بر هم منطبق شوند.

رابطه (۱۰) ارتباط بین عکس و زمین را بیان می‌کند.

$$X = \lambda R x + \gamma T \quad (10)$$

که در آن λ ، مقیاس ساختار^۲ و γ مقیاس حرکت است که برای تصویر دوم مقدار آن طبق فرض قبلی یک در نظر گرفته شده است و به کمک تصویر سوم مقدار واقعی آن باید محاسبه شود. در محاسبه γ اگر X مشخص باشد، با ضرب طرفین معادله در \hat{x} داریم:

$$\hat{x} X = \hat{x} \gamma T \quad (11)$$

اگر x یک بردار سه صورت $x = [x_1, x_2, x_3]$ باشد، آن گاه \hat{x} طبق (۱۲) تعریف می‌شود:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

از نوشتن رابطه (۱۱) برای هر نقطه یک γ قابل محاسبه است که γ نهایی از میانگین همه γ ها محاسبه می‌شود. X که آن را معلوم فرض کردیم، در واقع مقادیر مختصات نقاط مشترک بین سه تصویر متوالی (دو مدل) است که در فضای تصویر اول از زوج اول محاسبه شده و با استفاده از رابطه (۱۳) به فضای تصویر اول از زوج دوم انتقال داده شده است.

$$X_2 = R_2 X_1 + T_2 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، X_2 مختصات مشترک بین سه تصویر در فضای تصویر دوم، X_1 مختصات محاسبه شده نقاط مشترک از زوج تصویر اول و R_2 و T_2 دوران و انتقال از تصویر اول به تصویر دوم هستند. γ محاسبه شده، در ستون آخر ماتریس Pcam ضرب می‌شود و بدین ترتیب ماتریس‌های توجیه نسبی بین زوج فریم‌ها با باز جدید به روز رسانی می‌شوند [۱۸].

دوران و انتقال و ماتریس توجیه نسبی فریم دوم در هر زوج فریم، با فرض یک بودن مقیاس حرکت^۱، نسبت به فریم اول محاسبه می‌شود.

با فرض اینکه Pcam و Pcam' ماتریس‌های توجیه نسبی تصاویر اول و دوم باشند و x و x' نقاط متناظر عکسی باشند و مختصات سه بعدی نقطه در فضای مدل (X) مجهول باشد، معادلات (۶) تا (۸) در محاسبه X مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$x = PX \Leftrightarrow x \times (PX) = 0 \quad (6)$$

در رابطه (۶) داریم:

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, Pcam X = \begin{bmatrix} Pcam_1^T \\ Pcam_2^T \\ Pcam_3^T \end{bmatrix} X \quad (7)$$

$$X = \begin{bmatrix} Pcam_1^T X \\ Pcam_2^T X \\ Pcam_3^T X \end{bmatrix}$$

و در نهایت معادله (۸) از معادله (۶) قابل استخراج است:

$$\begin{bmatrix} x(Pcam_3^T) & -Pcam_1^T \\ y(Pcam_3^T) & -Pcam_2^T \\ x'(Pcam_3^{T'}) & -Pcam_1^{T'} \\ y'(Pcam_3^{T'}) & -Pcam_2^{T'} \end{bmatrix} X = 0 \Leftrightarrow AX = 0 \quad (8)$$

برای حل X در رابطه (۸)، پس از محاسبه (Singular Value Decomposition) ماتریس A ، مقادیر X ستون آخر ماتریس D خواهد بود [۱۸].

$$S V D^T = SVD(A) \quad (9)$$

۲-۱-۵- برآورد مقیاس نسبی بین مدل‌ها

آنچه که در انتهای بخش قبلی توضیح داده شد، روش محاسبه مختصات مدل نقاط متناظر یک زوج عکس است که در سیستم مختصات عکس اول در هر زوج فریم محاسبه می‌شود. اما برای داشتن یک مدل پیوسته باید همه این مختصات‌ها در یک سیستم مختصات مرجع محاسبه شوند. از طرفی در محاسبه مختصات مدل طبق آنچه که در بخش قبلی ارائه شد، مقیاس حرکت زوج

^۲ Structural scale

^۱ Motion scale

۲-۱-۶- توجیه نسبی تصاویر متوالی و تشکیل مدل

پیوسته

پس از اینکه مقیاس حرکت که در واقع همان مقیاس نسبی مدل هاست محاسبه شد، نوبت به تشکیل مدل پیوسته می‌رسد. از روی این ماتریس‌های نسبی به روز رسانی شده که در بخش قبل تولید شدند، ماتریس‌های مطلق (شامل ماتریس دوران و انتقال) نسبت به سیستم مختصات مدل، محاسبه می‌شوند. شیوه محاسبه در روابط (۱۴) تا (۱۶) آمده است.

$$R_{abs_i} = R_{abs_{i-1}} * R_{relative_{i-1,i}} \quad (14)$$

$$T_{abs_i} = R_{abs_{i-1}} * T_{relative_{i-1,i}} + T_{abs_{i-1}} \quad (15)$$

$$Pcam_{abs_i} = [R_{abs_i} | T_{abs_i}] \quad (16)$$

در روابط فوق اندیس abs نشان دهنده مطلق بودن پارامتر و اندیس relative نشان دهنده نسبی بودن پارامتر است. بدین ترتیب با استفاده از این مقادیر، کلیه مختصات‌ها که در سیستم‌های مختصات مجزا بودند، به یک سیستم مختصات انتقال خواهند یافت. با توجه به بخش‌های پیشین این سیستم مختصات مرجع، سیستم مختصات تصویر اول از دنباله تصاویر است. در نهایت یک مدل پیوسته خواهیم داشت که مسلماً دارای خطاهایی است که باید سرشکن شوند.

۲-۱-۷- باندل اجسمنت جهت بهبود دقت در فضای

مدل

به منظور سرشکنی خطاها از روش باندل اجسمنت استفاده می‌کنیم که توضیحات کامل آن در [۱۲] و [۱۳] آمده است. در این پژوهش از ماتریس‌های توجیه مطلق که در بخش قبلی محاسبه شدند، به عنوان مقادیر اولیه پارامترهای توجیه خارجی و از مختصات محاسبه شده در فضای مدل به عنوان مختصات اولیه نقاط گرهی استفاده می‌کنیم. پس از انجام سرشکنی در مرحله اول هنوز مشاهدات اشتباهی وجود دارند که روی نتیجه نهایی کار تاثیر می‌گذارند و برای حذف آن‌ها از یک روش تکراری استفاده می‌شود. این فرایند تکراری به این صورت است که ابتدا حد مجاز خطای بازتابش (t) برای نقاط مدل تعیین می‌شود. از سویی به علت تاثیری که نقاط اشتباه بر نقاط

درست می‌گذارند، حذف یکباره نقاط با خطای بیش‌تر از t موجب از دست رفتن مشاهدات درست نیز می‌شود. لذا باید مشاهدات اشتباه در چند مرحله و با شروع از حد آستانه‌ای بزرگتر از t حذف شوند. بنابراین ابتدا باید تعداد مراحمی که باید مشاهدات اشتباه حذف شوند، باتوجه به سرعت پردازنده یا دقت مورد نیاز، مشخص شود (n_b). به این ترتیب پس از انجام باندل اجسمنت اول تعداد مشاهداتی (n_e) که از خطای t بیش‌تر هستند، به دست می‌آید و این مشاهدات اشتباه باید در n_b مرحله حذف شوند. در مرحله اول باید تعداد n_e/n_b از بزرگترین آن‌ها حذف شوند. پس از حذف این مشاهدات اشتباه دوباره باندل اجسمنت انجام می‌شود و مجدداً تعداد مشاهدات دارای خطای بیش‌تر از t محاسبه و به تعداد $n_e/n_b - 1$ از مشاهدات حذف می‌شوند و این روند تا جایی که همه اشتباهات حذف شوند، ادامه پیدا می‌کند [۱۴].

۲-۲- توجیه نهایی و مطلق

تا اینجا کار مختصات نقاط متناظر عکسی در فضای مدل محاسبه شدند و در واقع توجیه دقیق فریم‌های ویدیویی نسبت به هم و نسبت به یک سیستم مختصات دلخواه به دست آمده است.

برای انتقال این مختصات در فضای مدل، به مختصات در فضای زمینی و تولید مدل سه بعدی زمین مرجع از نمای شهری باید مراحل زیر را طی کنیم.

۲-۲-۱- مشاهده نقاط کنترل زمینی در فریم‌های

موردنظر

برای انتقال مدل پیوسته تشکیل شده در مرحله قبلی به فضای زمینی به تعدادی نقطه کنترل نیاز داریم که مختصات آن‌ها در هر دو فضا مشخص باشد. در انتهای بخش ۲-۱-۷ پارامترهای توجیه خارجی تصاویر نسبت به سیستم مختصات مدل محاسبه شد. که با استفاده از این پارامترها و مختصات عکسی متناظر برای هر نقطه دلخواه، مختصات در فضای مدل قابل محاسبه است. بنابراین به مختصات متناظر نقاط کنترل در دو عکس ابتدایی و دو عکس انتهایی برای یافتن مختصات مدلی آن‌ها نیاز داریم. این نقاط متناظر می‌توانند به صورت دستی یا به صورت اتوماتیک و به کمک روش‌های تناظریابی در فضای

تصویری استخراج شوند و مختصات آن‌ها در فضای مدل از طریق معادلات تقاطع محاسبه می‌شود. مختصات زمینی نقاط کنترل نیز با استفاده از نقشه‌برداری زمینی برداشت می‌شود.

۲-۲-۲- توجیه مطلق

در انتقال بین دو فضای سه بعدی می‌توان از تابع quaternion که انتقال، دوران و مقیاس را بین دو فضا محاسبه می‌کند استفاده نمود. برای استفاده از این تابع حداقل ۳ نقطه مشترک بین دو فضا باید وجود داشته باشد تا بتوان ۷ پارامتر مجهول (سه دوران، سه انتقال و یک مقیاس) را محاسبه نمود. مقیاس بین دو فضا از رابطه (۱۷) تعیین می‌شود:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i X_i'^2}{\sum_i x_i'^2}} \quad (17)$$

که در آن S مقیاس، x' مجموعه نقاط در فضای دوم نسبت به مرکز ثقل مجموعه و X' مجموعه نقاط در فضای اول نسبت به مرکز ثقل مجموعه است و هدف یافتن مقیاس، دوران و انتقال از فضای دوم به فضای اول است. برای محاسبه ماتریس دوران بین دو فضا، داریم:

$$M = x' * X' \quad (18)$$

M یک ماتریس ۳×۳ است و از روی آن N طبق رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$N = \begin{bmatrix} \text{trace}(M) & M_{23} - M_{32} \\ M_{23} - M_{32} & M_{11} - M_{22} - M_{33} \\ M_{31} - M_{13} & M_{12} + M_{21} \\ M_{12} - M_{21} & M_{31} + M_{13} \\ M_{31} - M_{13} & M_{12} - M_{21} \\ M_{12} + M_{21} & M_{31} + M_{13} \\ -M_{11} + M_{22} - M_{33} & M_{23} + M_{32} \\ M_{23} + M_{32} & -M_{11} - M_{22} + M_{33} \end{bmatrix} \quad (19)$$

اگر q را بردار ویژه نظیر بزرگترین مقدار ویژه ماتریس N تعریف کنیم و

$$\begin{aligned} q_0 &= q(1), & q_x &= q(2), \\ q_y &= q(3), \\ q_z &= q(4), \\ q_t &= 2 \arccos(q_0) * 180 / \pi \end{aligned} \quad (20)$$

آن گاه ماتریس دوران از رابطه (۲۱) تعیین می‌شود:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2(q_x * q_y - q_0 * q_z) \\ 2(q_y * q_x + q_0 * q_z) & q_0^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 \\ 2(q_x * q_z - q_0 * q_y) & 2(q_y * q_z + q_0 * q_x) \\ 2(q_x * q_z + q_0 * q_y) & 2(q_y * q_z - q_0 * q_x) \\ q_0^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

و برای محاسبه انتقال بین دو فضا از رابطه (۲۲) می‌توان استفاده نمود:

$$T = G - S * R * g \quad (22)$$

در رابطه فوق، T ماتریس انتقال، g مرکز ثقل مجموعه دوم و G مرکز ثقل مجموعه اول است.

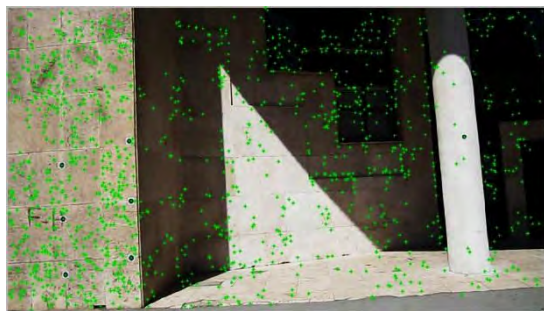
بدین ترتیب به کمک مقیاس، دوران و انتقال محاسبه شده بین فضای مدل و فضای زمین، کلیه نقاط از فضای مدل به فضای زمین انتقال می‌یابند.

۲-۲-۳- باندل اجسمنت جهت برآورد دقیق پارامترهای توجیه خارجی بین عکس و زمین

پس از انتقال مختصات کلیه نقاط از فضای مدل به فضای زمین، جهت بهبود نتایج نهایی یک بار دیگر باندل اجسمنت پیاده‌سازی می‌شود. این سرشکنی این بار بین نقاط زمین و عکس با در نظر گرفتن مقادیر اولیه نقاط زمینی برای مختصات سه بعدی نقاط گرهی و نیز اعمال دوران و انتقال بین مدل و زمین به پارامترهای توجیه مطلق در فضای مدل، به عنوان مقادیر اولیه پارامترهای توجیه خارجی بین عکس و زمین انجام می‌پذیرد و بدین ترتیب یک مدل سه بعدی نهایی زمین مرجع سرشکن شده تولید خواهد شد که می‌توان اندازه‌گیری‌های زمینی مورد نیاز را روی آن انجام داد.

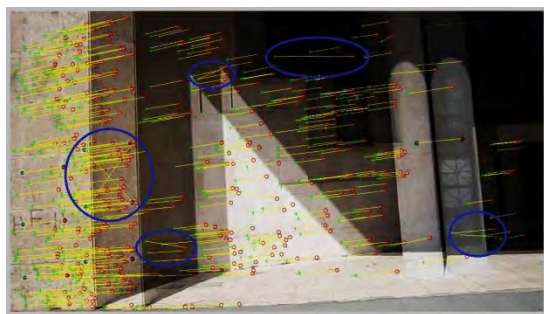
۳- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این پژوهش از یک دوربین Canon PowerShot A2200 برای فیلمبرداری از نمای ساختمان استفاده شد. برای کالیبراسیون دوربین موردنظر، عمل فیلمبرداری از یک صفحه آزمون انجام گردید. سپس با استفاده از نرم افزار australis پارامترهای کالیبراسیون دوربین محاسبه شد که مقادیر به دست آمده در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۴- نقاط استخراج شده در تصویر اول به روش SIFT

پس از استخراج نقاط مناسب در کلیه تصاویر، تناظریابی دو به دوی تصاویر انجام شد و حد آستانه بیان شده در بخش ۲-۱-۲ برای تناظریابی نقاط استخراج شده از SIFT، $0/4$ در نظر گرفته شد. نقاط متناظر اولیه برای زوج تصویر اول در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) پیداست یکسری تناظرهای اشتباه که تعدادی از آنها را با دوایر آبی رنگ نشان داده‌ایم به وجود آمده است که در مرحله بعدی حذف خواهند شد.



شکل ۵- نقاط متناظر اولیه به دست آمده برای زوج تصویر اول

اشتباهات تناظریابی برای هر یک از زوج فریم‌ها، با استفاده از ترکیب روش RANSAC و روابط برقراری هندسه اپی‌پولار بین دو تصویر، حذف شدند. در شکل (۶) نقاط متناظر پس از اعمال مرحله حذف اشتباهات نشان داده شده است.

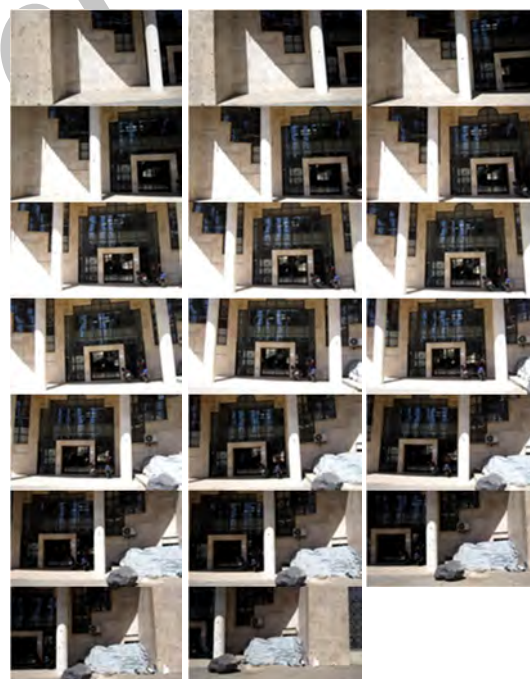
پس از این مرحله با انجام توجیه نسبی بین هر زوج فریم متوالی پارمترهای R و T بین هر زوج فریم محاسبه شد و از طریق انجام تقاطع بین نقاط متناظر هر زوج تصویر متوالی یک مدل برای آن زوج تصویر تشکیل گردید.

پس از این مرحله استخراج فریم‌های کلیدی از دنباله ویدیو با روش مبتنی بر انتخاب مدل انجام شد و در نهایت ۲۰ فریم کلیدی از بین ۳۸۹ فریم دنباله ویدیویی اخذ شده انتخاب گردید.

جدول ۱- پارامترهای محاسبه شده برای دوربین Canon PowerShot A2200 با نرم افزار australis

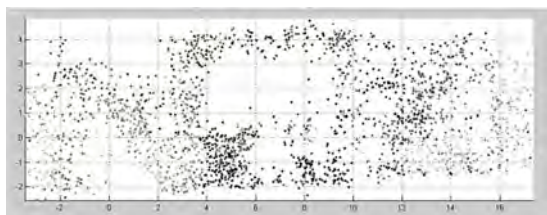
ابعاد سنسور (pixel)	۱۲۸۰ x ۷۲۰
سایز پیکسل (mm)	۰,۰۰۵
فاصله کانونی (mm)	۵,۱۰۶۸
Xp (mm)	۰,۰۹۴۳
Yp (mm)	۰,۰۱۷۰

دنباله فریم‌های کلیدی استخراج شده که در بخش بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در شکل (۳) آمده است.

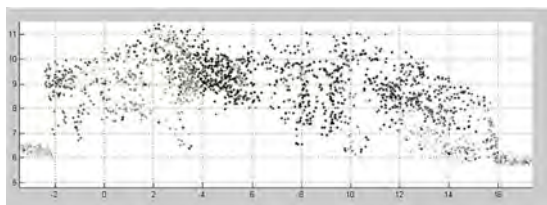


شکل ۳- دنباله فریم‌های کلیدی استخراج شده در روش پیشنهادی

پس از این مرحله باید نقاط مناسب در فریم‌های کلیدی جهت انجام تناظریابی استخراج شوند که در این پژوهش استخراج نقاط به روش SIFT صورت گرفت. نقاط استخراج شده در تصویر اول، در شکل (۴) نشان داده شده است.

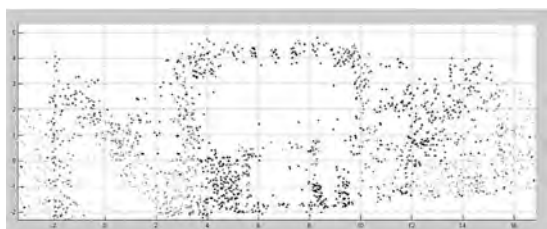


شکل ۷- نمای X-Y مدل اولیه

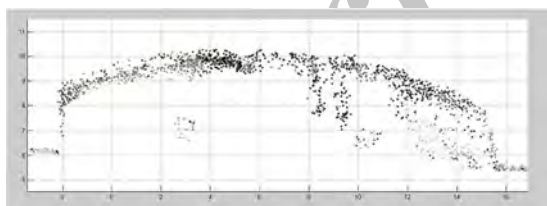


شکل ۸- نمای X-Z مدل اولیه

مقادیر مختصات نقاط سه بعدی و پارامترهای توجیه خارجی مدل اولیه به عنوان ورودی باندل اجسمنت مورد استفاده قرار می‌گیرند و پس از حذف خطاها به مدل سرشکن شده می‌رسیم که نماهای X-Z و X-Y این مدل سرشکن شده به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است.

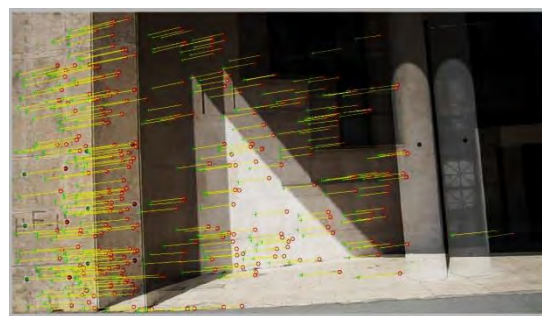


شکل ۹- نمای X-Y مدل سرشکن شده



شکل ۱۰- نمای X-Z مدل سرشکن شده

پس از این مرحله مختصات نقاط کنترل زمینی برداشت شده در دو فریم اول و دو فریم آخر استخراج شده و مختصات مدل مطلق آن‌ها با انجام تقاطع محاسبه گردید. بدین ترتیب با داشتن مختصات نقاط کنترل در فضای مدل و زمین، مدل تولید شده به روش ویدیوگرامتری توسط تابع quaternion به فضای زمینی منتقل گردید و طبق آنچه در بخش ۲-۳ بیان شده با انجام سرشکنی مجدد پارامترهای توجیه خارجی دقیق بین عکس و زمین و مختصات زمینی نقاط متناظر عکسی



شکل ۶- نقاط متناظر زوج تصویر اول پس از حذف اشتباهات به روش RANSAC

پس از به دست آوردن نقاط متناظر بین دو مدل متوالی، مقیاس نسبی بین مدل‌ها محاسبه شد و نقاط مدل‌های متوالی به فضای تصویر اولیه منتقل گردید. مقادیر مربوط به مقیاس نسبی محاسبه شده بین مدل‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر مقیاس نسبی برآورد شده بین مدل‌ها

مدل	مقیاس نسبی برآورد شده
۱-۲	۱.۰
۲-۳	۲.۰۳۴۸
۳-۴	۰.۳۴۳۷
۴-۵	۰.۳۹۳۶
۵-۶	۰.۴۰۵۷
۶-۷	۸.۴۶۸۵
۷-۸	۰.۱۵۵۹
۸-۹	۱.۷۱۴۵
۹-۱۰	۰.۷۴۳۸
۱۰-۱۱	۱.۱۷۵۹
۱۱-۱۲	۳.۰۵۱۹
۱۲-۱۳	۰.۳۸۷۸
۱۳-۱۴	۱.۶۰۸۷
۱۴-۱۵	۰.۶۷۷۳
۱۵-۱۶	۱.۶۷۶۴
۱۶-۱۷	۰.۵۶۲۴
۱۷-۱۸	۱.۳۰۶۸
۱۸-۱۹	۱.۲۵۰۳
۱۹-۲۰	۲.۵۰۳۱

به این ترتیب پس از این مرحله به یک مدل اولیه می‌رسیم که به عنوان مقادیر اولیه ورودی به باندل اجسمنت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نمای X-Y و نمای X-Z مدل اولیه نمایش داده شده است.

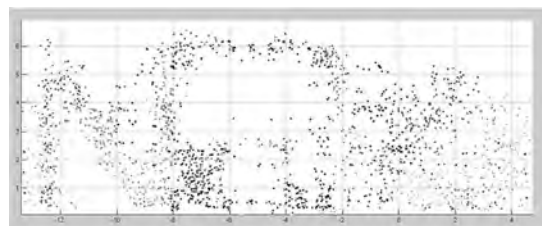
جدول ۳- اختلاف مختصات زمینی نقاط چک، اخذ شده از نقشه برداری زمینی و محاسبات مربوط به روش پیشنهادی بر حسب متر

شماره نقطه	اختلاف مختصات زمینی	
	مختصات زمینی مولفه X	مختصات زمینی مولفه Y
۱	۰,۰۵۲	۰,۰۱۸
۲	۰,۰۵۷	-۰,۰۲۵
۳	-۰,۰۴۳	۰,۰۵۶
۴	-۰,۰۳۶	۰,۰۵۵
۵	-۰,۰۵۴	۰,۰۴۰
۶	-۰,۰۹۸	-۰,۰۳۳
۷	-۰,۰۳۶	۰,۰۷۸
۸	۰,۰۳۴	۰,۰۶۹
۹	-۰,۰۵۵	-۰,۰۳۴
۱۰	-۰,۰۸۷	۰,۰۹۷
۱۱	-۰,۱۰۱	۰,۱۰۵
۱۲	-۰,۰۷۹	۰,۰۸۰
۱۳	۰,۰۲۴	۰,۱۰۱
۱۴	-۰,۰۳۹	۰,۰۹۲
۱۵	-۰,۰۳۸	۰,۰۸۶
۱۶	۰,۰۲۷	-۰,۰۴۷
۱۷	۰,۰۶۱	۰,۰۴۷
۱۸	۰,۰۵۲	۰,۰۳۵
۱۹	-۰,۰۴۳	-۰,۰۳۸
۲۰	-۰,۰۶۶	۰,۰۵۲
۲۱	-۰,۰۳۸	۰,۰۵۴

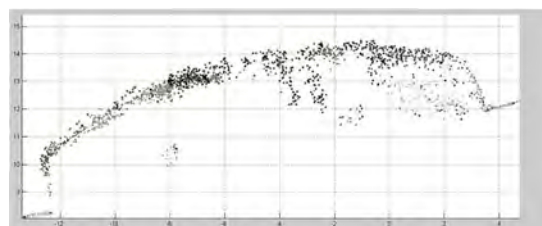
همانطور که از جدول (۳) پیداست برای نقاطی که در عمق‌های متفاوتی قرار دارند دقت مختصات نقاط در مولفه سوم مختصاتی (Z) متفاوت بوده و در واقع وابسته به هندسه پرتوهای متقاطع از تصاویر مختلف است. به عنوان مثال برای نقاط ۱ و ۲ که روی دو ستون چپ و راست قرار دارند و نقاط ۳ و ۴ که روی درب ورودی نما قرار گرفته‌اند می‌توان این تفاوت دقت را مشاهده نمود.

از آنجاییکه فاصله نقاط ۱ و ۲ نسبت به نقاط ۳ و ۴ به دوربین نزدیکتر است زاویه پارالاکتیک تشکیل شده برای این نقاط دارای مقدار بزرگتری بوده و در نتیجه دقت محاسبه مولفه سوم مختصاتی برای این نقاط (۱ و ۲) بالاتر بوده است. از سوی دیگر برای نقاط ۱ تا ۴ و ۱۶ تا ۲۱ نشان داده در شکل (۱۳) مقدار خطای مولفه (Z) مختصاتی پایین‌تر از نقاط دیگر است و دلیل این امر را می‌توان در بافت مناسب‌تر نما در این نقاط دانست به

محاسبه شد. نمای X-Y و X-Z مدل زمین مرجع نهایی نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- نمای X-Y مدل زمین مرجع شده نهایی



شکل ۱۲- نمای X-Z مدل زمین مرجع شده نهایی

به منظور ارزیابی عددی روش پیشنهادی مختصات زمینی ۲۱ نقطه از نمای نشان داده شده به کمک نقشه برداری زمینی قرائت شد و به عنوان نقاط چک وارد محاسبات گردید. موقعیت نقاط انتخاب شده بر روی نمای مورد نظر در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- نقاط چک انتخاب شده روی نمای موردنظر به منظور ارزیابی دقت روش پیشنهادی

همانطور که از شکل (۱۳) پیداست در انتخاب نقاط چک، سه عامل پراکندگی مناسب نقاط در سطح نما، انتخاب نقاط در عمق‌های مختلف به منظور ارزیابی دقت عمق به دست آمده و انتخاب نقاط در مناطق دارای بافت پایین و مشکل از نظر تناظریابی لحاظ شده است تا بتوان ارزیابی مناسبی از دقت روش پیشنهادی را انجام داد. پس از محاسبه مختصات زمینی این نقاط چک به کمک روش پیشنهادی، اختلاف آن‌ها با مختصات زمینی قرائت شده با روش نقشه برداری زمینی محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۴- مقادیر مربوط به میانگین و انحراف معیار اندازه اختلافات مختصات زمینی نقاط چک اخذ شده بر حسب متر

معیار	مولفه X	مولفه Y	مولفه Z
میانگین	۰,۰۵۳	۰,۰۵۹	۰,۰۷۰
انحراف معیار	۰,۰۲۲	۰,۰۲۶	۰,۰۱۸

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش روشی برای توجیه اتوماتیک فریم‌های متوالی ویدئو و تلفیق با مشاهدات پیمایش نقشه‌برداری زمینی به منظور تهیه نقشه زمین مرجع نماهای معابر شهری ارائه شد که در نتیجه آن پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با دقت مناسبی به دست آمد. پس از انجام مراحل توجیه نسبی فریم‌ها و تشکیل یک مدل به هم پیوسته، به کمک داده‌های برداشت شده از نقشه برداری زمینی، توجیه مطلق مدل صورت گرفت و با استفاده از پارامترهای توجیه مطلق می‌توان برای نقاط متناظر تصویری مختصات زمینی را محاسبه نمود. بکارگیری سرشکنی همزمان نقاط متناظر استخراج شده در تمامی تصاویر و حذف اشتباهات به صورت تکراری در حین انجام سرشکنی از راهکارهای ارائه شده جهت دستیابی به دقت بالاتر و عدم ایجاد خطای تجمعی در مدل تولید شده در این تحقیق می‌باشد. از سوی دیگر طراحی و پیاده‌سازی اجزای مختلف روش پیشنهادی به گونه‌ای بوده است که بتواند برای نماهای شهری دارای اطلاعات کم و مشکل (بافت ضعیف و تکراری و شرایط نوردی نامناسب در حین فیلمبرداری) پاسخگو باشد و رسیدن به دقت متوسط زیر ۶ سانتی‌متر با انحراف معیار حدود ۳ سانتی‌متر برای مولفه‌های مسطحاتی و دقت کمتر از ۷ سانتی‌متر با انحراف معیار ۲ سانتی‌متر برای مولفه ارتفاعی گویای این پاسخگویی و مناسب بودن روش پیشنهادی برای کاربردهای عملی نیازمند دقت و سرعت اجرای بالاست. در ادامه این تحقیق می‌توان مدل سه بعدی متراکم را با استفاده از تولید نقشه عمق تصاویر از روی تصاویر اپی پولار و به کارگیری پارامترهای توجیه مطلق تولید شده در این مقاله، تولید نمود بدین ترتیب می‌توان یک مدل از نمای شهری با جزئیات کامل و با دقت بهتر داشت.

طوری‌که دقت قرائت مختصات این نقاط از تصاویر بالاتر بوده و در نتیجه مقدار خطای مولفه سوم مختصاتی آن‌ها کمتر است و کمتر بودن دقت مولفه (Z) نقاط دیگر ناشی از وجود خطای بیشتر در قرائت مختصات آن‌ها در تصاویر بوده است. همین روند خطا برای مولفه دوم مختصاتی (Y) نیز مشاهده می‌شود ولی مقدار خطای محاسبه شده نسبت به مقدار خطای محاسبه شده برای مولفه سوم مختصاتی کمتر می‌باشد.

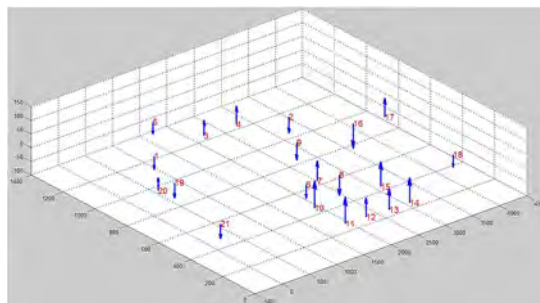
در شکل (۱۴) بردار خطاهای مولفه‌های اول و دوم مختصاتی (X-Y) بر روی نما با ضریب اغراق ۱۰۰۰ برابر برای نقاط چک انتخاب شده نشان داده شده است.



شکل ۱۴- بردار خطاهای محاسبه شده مولفه‌های X-Y برای نقاط چک انتخاب شده بر روی نما با ضریب اغراق ۱۰۰۰ برابر

در شکل شماره (۱۵) نیز بردار خطاهای مختصاتی محاسبه شده برای مولفه Z نقاط چک انتخابی نشان داده شده است.

مقادیر مربوط به میانگین و انحراف معیار اندازه اختلافات مختصات زمینی نشان داده شده در جدول (۳) نیز در جدول (۴) برای هر یک از مولفه‌های مختصاتی محاسبه و نشان داده شده است. جدول (۴) در واقع نشان دهنده دقت مناسب روش پیشنهادی برای بازسازی نماهای شهری است. در واقع روش ارائه شده از دقت مناسب و سرعت اجرای بالا در کنار هزینه پایین برخوردار است.



شکل ۱۵- بردار خطاهای محاسبه شده مولفه Z برای نقاط چک انتخاب شده بر روی نما با ضریب اغراق ۱۰۰۰ برابر

- [1] Li, Ch. and Zhao, Y. (2012). Approach of Camera Relative Pose Estimation Based on Epipolar Geometry. *Information Technology Journal*, 11: 1202-1210.
- [2] Prakoonwit, C. and Benjamin, R. (2012). 3D surface reconstruction from multiview photographic images using 2D edge contours. © 3D Research Center, Kwangwoon University and Springer 2012.
- [3] Pollefeys, M., Koch, R., Vergauwen, M. and VanGool, L. (1999). Hand-held acquisition of 3D models with a video camera. ESA T -PSI, K.U.Leuven Kardinaal Mercierlaan 94 B-3001 Heverlee, Belgium.
- [4] Nistér, D. (2001). Automatic dense reconstruction from uncalibrated video sequences.
- [5] Nistér, D. (2003). An efficient solution to the five-point relative pose problem. *cvpr*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 02, p. 195. ISSN 1063-6919.
- [6] Pollefeys, M. (2002). Visual 3D Modeling from Images-Tutorial Notes: University of North Carolina-Chapel Hill.
- [7] عابدینی، عباس. صمد زادگان، فرهاد. استخراج عوارض مناظر در تصاویر هوایی و داده‌های LIDAR بر اساس الگوریتم SIFT.
- [8] Wang, X., Zhang, H. and Liu, SH. (2013). Reliable RANSAC Using a Novel Preprocessing Model. Copyright © 2013 Xiaoyan Wang et al. An open access article distributed under the Creative Commons Attribution License.
- [9] Fischler, M. and Bolles, R. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), pp. 381-395.
- [10] Ahmed, M. (2009). key frame extraction and BROWSER-BASED visualization for 3D reconstruction from video streams.
- [11] Horn, B. (1990). Recovering baseline and orientation from Essential matrix.
- [12] Lourakis, M. I. A. and Argyros, A. A. (2009). SBA: A Software Package for Generic Sparse Bundle Adjustment. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 36, No. 1, Article 2, Publication date: March 2009.
- [13] Lourakis, M. I. A., and Argyros, A. A. (2004). The design and implementation of a generic sparse bundle adjustment software package based on the levenberg-marquardt algorithm: Institute of Computer Science-FORTH, Heraklion, Crete, Greece.
- [14] مظاهری، مهدی. (۱۳۸۹). بازسازی سه بعدی تصاویر ویدیویی به منظور تلفیق با داده‌های مکانی شهری. پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران - نقشه‌برداری، گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی.
- [15] فلاح، آلاله. سعادت سرشت، محمد. (۱۳۹۲). مقایسه روش‌های مبتنی بر انتخاب مدل و فاصله ثابت در استخراج فریم‌های کلیدی از دنباله ویدیویی. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.
- [16] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. Van Gool, L. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF)
- [17] Malik, J., Dahiya, R., Sainarayanan, G. (2011). Harris Operator Corner Detection using Sliding Window Method. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 22– No.1, May 2011.
- [18] Ma, Y., Kosecka, J., Soatto, S., Sastry, S. (2001). An Invitation to 3-D Vision From Images to Models.