

# تسهیل بازسازی بصری و هندسی محیط بر مبنای دوربین استریو با استفاده از اطلاعات مرحله کالیبراسیون

امیر شاهرخ امینی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۰/۲۴

\*\*\*\*\*

## چکیده

تسهیل و اتوماسیون فرآیند بازسازی بصری و هندسی یکی از مسائل مورد توجه در زمینه مدل‌سازی محیط اطراف خصوصاً در مناطق شهری می‌باشد. یک دوربین استریو، با توجه به اینکه موقعیت دو عدسی آن نسبت به یکدیگر ثابت است، می‌تواند در تسهیل فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله نشان داده می‌شود که چگونه با استفاده از داده‌های کالیبراسیون دوربین استریو، می‌توان بدون نیاز به تناظریابی خصوصاً در مناطقی که دارای کمبود محتوای اطلاعاتی بالا جهت تناظریابی می‌باشند، مدل سه بعدی محیط را تولید نمود. همچنین با بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون دوربین، نحوه استخراج اطلاعات هندسی و تولید مدل عمق از محیط بدون نیاز به تعریف طول معلوم بین عوارض محیط بیان شده است. در ادامه این مقاله، نتایج بررسی‌های عملی و بازسازی‌های صورت گرفته در محیط شهری، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: دوربین استریو، کالیبراسیون، مدل‌سازی سه‌بعدی، بازسازی هندسی

\*\*\*\*\*

۱. عضو هیأت علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. sh\_amini@azad.ac.ir

## ۱- مقدمه

سه‌بعدی تولید شده داشت. جهت تولید مدل‌های سه‌بعدی از محیط شهری، استفاده از سیستم‌های ترکیبی روش مستقیم و غیرمستقیم با توجه به مزایای هر کدام از آنها در غالب سیستم‌های mobile mapping گسترش فراوانی یافته است (Carbel and et al., 2008). مزیت استفاده از این سیستم‌ها، قدرت تفکیک بالا و تولید تصویر یکپارچه است و نیازی به اتصال تصاویر برای پوشش کامل محیط نیست. اما نکات منفی در این سیستم‌ها، کالیبراسیون لیزر و دوربین نسبت به یکدیگر، سختی پردازش و تلفیق داده‌های دو سیستم، و قیمت بالای آنها است.

استفاده از روش‌های تصویرمنا بعنوان روشی غیرمستقیم در تهیه مدل‌های سه‌بعدی از محیط‌های شهری با توجه به مزیت‌های قابل توجه آن مانند هزینه کم و ارائه دید واقعی از محیط با پیشرفت سیستم‌های تصویربرداری و پیشرفت گرافیکی کامپیوترها بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Gledhill and et al., 2003).

در این روش‌ها، تصاویر می‌توانند درک مناسب و واقعی از محیط را به کاربر منتقل نمایند. تصاویر اخذ شده می‌توانند بعنوان داده‌های مناسب جهت تکمیل داده‌های هندسی و اختصاص یافت به مدل‌های سه‌بعدی مورد استفاده قرار گیرند که از مزیت‌های استفاده از روش‌های تصویرمنا است.

بکارگیری دوربین‌های استریو به عنوان یک ابزار کم هزینه و سریع می‌تواند مزایای بسیاری در بازسازی بصری و هندسی محیط داشته باشد. یک دوربین استریو، از دو عدسی در قالب یک بدنه تشکیل یافته که هر عدسی دارای سیستم تصویربرداری جداگانه است. دو عدسی در دوربین استریو دارای توجیه نسبی پایدار نسبت به یکدیگر می‌باشند و با توجه به تصویربرداری آنها به صورت موازی با یکدیگر، دید استریو را فراهم می‌سازند. در نگاه ۱، دوربین استریوی غیرمتریک Fuji W3 نشان داده شده است.

با توجه به ثبات و پایداری دو عدسی دوربین استریو نسبت به یکدیگر، می‌توان از مقادیر حاصل از پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی (سه

امروزه؛ مدل‌سازی، نمایش فضای محیط اطراف و قابلیت اندازه‌گیری در این مدل‌ها بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. مدل‌های سه‌بعدی تهیه شده می‌توانند در زمینه‌های گوناگون مانند تکمیل و به روز رسانی نقشه‌های موجود، تهیه مدل‌های بصری از مناطق شهری، کنترل و رباتیک، تهیه مدل‌های مجازی سه‌بعدی، ناوبری و سیستم‌های هوشمند با قابلیت درک از محیط کاربردهای متنوعی داشته باشند (Cobzas and Zhang, 2001). در تولید این مدل‌های سه‌بعدی، پارامترهای دقت، سرعت و هزینه از اهمیت بالایی برخوردار است (Chen, 1995).

در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های تولید مدل‌های سه‌بعدی از محیط به دو روش مستقیم (direct) و غیرمستقیم (indirect) تقسیم‌بندی می‌شوند (Cobzas and Zhang, 2001). در روش‌های مستقیم مانند استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری و لیزر اسکن‌ها، پارامترهای هندسی مورد نیاز مانند طول و مختصات بطور مستقیم اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی سه‌بعدی محیط اطراف با استفاده از عوارض هندسی و رابطه بین آنها انجام می‌پذیرد. (Huang and Hung, 1997) (Gledhill and et al., 2004).

در روش‌های غیر مستقیم، محیط با استفاده از چندین تصویر حقیقی بازسازی می‌شود و سپس اطلاعات هندسی مورد نیاز پس از پردازش تصاویر، از آنها استخراج می‌شوند (Lin and et al., 2008) (Varshosaz and Amini, 2007).

در روش استفاده از دوربین‌های نقشه‌برداری، اندازه‌گیری بصورت گسسته و با برداشت طول، زاویه و مختصات عوارض انجام می‌شود. این روش بسیار زمان‌بر بوده و به عملیات طاقت‌فرسای زمینی خصوصاً در مناطق پیچیده شهری نیاز است.

در مقایسه با دوربین‌های نقشه‌برداری، لیزر اسکن‌ها ابزارهایی با سرعت مناسب برداشت می‌باشند و تراکم مناسبی از داده را تولید می‌نمایند، اما در این روش زمان زیادی جهت ویرایش و تفسیر داده‌های آنها مورد نیاز است (Gledhill, 2009). همچنین این روش به تنهایی فاقد اطلاعات بصری شفاف از محیط بوده و نمی‌توان دید واقعی از مدل

## ۲- روش تحقیق

در این بخش، کالیبراسیون دوربین استریو، تولید مدل بصری سه بعدی از محیط و بازسازی هندسی آن تشریح می‌گردد.

### ۲-۱- کالیبراسیون دوربین استریو

کالیبراسیون دقیق دوربین استریو 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) به عنوان مقادیری ثابت در مراحل بعدی تولید مدل بصری و همچنین استخراج اطلاعات هندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دقت تعیین پارامترهای کالیبراسیون تأثیر بسزایی در دقت مدل بصری تولید شده و استخراج اطلاعات هندسی خواهد داشت. کالیبراسیون دوربین استریو با استفاده از یک میدان آزمون که از چندین تارگت و همچنین تعدادی طول مقیاس تشکیل شده است، مطابق نگاره ۲ انجام می‌شود.



نگاره ۲: تصویربرداری از میدان آزمون برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون هر لنز و پارامترهای توجیه خارجی هر ایستگاه

در این فرایند از چندین ایستگاه زوج تصاویر از میدان آزمون اخذ شده و برای تعیین پارامترهای کالیبراسیون از نرم افزار آسترالیس استفاده شده است. در این نرم افزار، قابلیت ورود و تعریف چندین دوربین وجود دارد که تصاویر هر لنز بطور مجزا برای آن دوربین وارد شده و نهایتاً همگی

انتقال و سه دوران) به عنوان مقادیری ثابت در تسهیل و اتوماسیون تولید مدل بصری و همچنین استخراج اطلاعات هندسی محیط بهره گرفت.



نگاره ۱: دوربین استریوی W3، به عنوان یک نمونه از دوربین‌های استریو

یکی از مشکلات تولید مدل سه بعدی از دو تصویر پوشش دار، امکان عدم تعیین نقاط کلیدی در تناظریابی به علت بافت خاص محیط می‌باشد که این موضوع در مناطق شهری که ممکن است بعضاً دارای بافت همگون باشند، بسیار اهمیت می‌یابد. همچنین، انجام تناظریابی ممکن است با خطا همراه باشد. در این مقاله نشان داده می‌شود که چگونه با استفاده از پارامترهای توجیه نسبی بین دو لنز دوربین استریو، می‌توان به صورت اتوماتیک و بدون نیاز به تناظریابی ارتباط بین دو تصویر را برقرار ساخته و مدل سه بعدی محیط را تولید نمود.

همچنین در این مقاله بیان می‌شود که چگونه می‌توان با استفاده از مقادیر پارامترهای جابجایی و باز بین دو لنز دوربین استریو که با مقیاس واقعی در فرآیند کالیبراسیون بدست می‌آیند، بدون نیاز به اطلاعات هندسی در محیط مانند مختصات و طول، اندازه‌گیری‌های واقعی در مدل بصری تولید شده داشت و همچنین نقشه عمق (depth map) از محیط تولید نمود. در ادامه این مقاله، چگونگی کالیبراسیون دوربین استریو، و فرآیند بازسازی بصری و هندسی محیط با استفاده از آنها بیان می‌شود.

$$F_x = F_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_x}{\partial X_A} \Delta X_A + \frac{\partial F_x}{\partial Y_A} \Delta Y_A + \frac{\partial F_x}{\partial Z_A} \Delta Z_A = 0 \quad (2)$$

$$F_y = F_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_y}{\partial X_A} \Delta X_A + \frac{\partial F_y}{\partial Y_A} \Delta Y_A + \frac{\partial F_y}{\partial Z_A} \Delta Z_A = 0$$

در رابطه فوق، پارامترهای،  $\frac{\partial F_x}{\partial X_0}, \frac{\partial F_x}{\partial Y_0}, \frac{\partial F_x}{\partial Z_0}, \frac{\partial F_x}{\partial \omega}, \frac{\partial F_x}{\partial \varphi}, \frac{\partial F_x}{\partial \kappa}, \frac{\partial F_x}{\partial X_A}, \frac{\partial F_x}{\partial Y_A}, \frac{\partial F_x}{\partial Z_A}$  مشتق نسبت به پارامترهای توجیه خارجی، مشتق نسبت مختصات زمینی نقاط مجهول،  $F_{x0}, F_{y0}$  مقادیر تابع به ازای مقادیر اولیه پارامترها،  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa$  مقادیر تصحیحات پارامترهای توجیه خارجی و  $\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A$  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 نیز به صورت زیر مشتق گرفته می‌شود:

$$F_x = F_{x_0} + \frac{\partial F_x}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial F_x}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_x}{\partial X_A} \Delta X_A + \frac{\partial F_x}{\partial Y_A} \Delta Y_A + \frac{\partial F_x}{\partial Z_A} \Delta Z_A + \frac{\partial F_x}{\partial X_B} \Delta X_B + \frac{\partial F_x}{\partial Y_B} \Delta Y_B + \frac{\partial F_x}{\partial Z_B} \Delta Z_B + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_x}{\partial X_C} \Delta X_C + \frac{\partial F_x}{\partial Y_C} \Delta Y_C + \frac{\partial F_x}{\partial Z_C} \Delta Z_C = 0 \quad (3)$$

$$F_y = F_{y_0} + \frac{\partial F_y}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial F_y}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_y}{\partial X_A} \Delta X_A + \frac{\partial F_y}{\partial Y_A} \Delta Y_A + \frac{\partial F_y}{\partial Z_A} \Delta Z_A + \frac{\partial F_y}{\partial X_B} \Delta X_B + \frac{\partial F_y}{\partial Y_B} \Delta Y_B + \frac{\partial F_y}{\partial Z_B} \Delta Z_B + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial F_y}{\partial X_C} \Delta X_C + \frac{\partial F_y}{\partial Y_C} \Delta Y_C + \frac{\partial F_y}{\partial Z_C} \Delta Z_C = 0$$

رابطه (۳) شامل پارامترهای تعیین شده در رابطه (۲) و پارامترهای  $\frac{\partial F_x}{\partial X_B}, \frac{\partial F_x}{\partial Y_B}, \frac{\partial F_x}{\partial Z_B}, \frac{\partial F_x}{\partial \omega}, \frac{\partial F_x}{\partial \varphi}, \frac{\partial F_x}{\partial \kappa}, \frac{\partial F_x}{\partial X_C}, \frac{\partial F_x}{\partial Y_C}, \frac{\partial F_x}{\partial Z_C}$  مشتق نسبت به پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی دوربین استریو و  $\Delta X_B, \Delta Y_B, \Delta Z_B, \Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta \kappa$  مقادیر تصحیحات پارامترهای توجیه نسبی می‌باشند. در نتیجه ارتباط بین سیستم مختصات مرکز عدسی چپ و سیستم مختصات زمینی تنها وابسته به پارامترهای توجیه خارجی عدسی چپ است، در حالیکه ارتباط بین سیستم مختصات مرکز عدسی راست و سیستم مختصات زمینی وابسته به پارامترهای توجیه خارجی عدسی چپ و پارامترهای توجیه نسبی دو عدسی می‌باشد که به همین منظور برای خطی کردن

تصاویر در یک فرآیند، به روش دسته اشعه سرشکنی شده و پارامترهای توجیه داخلی و سایر پارامترهای کالیبراسیون (جهت پالایش مختصات تصویری) هر لنز بطور مجزا و همچنین پارامترهای توجیه خارجی هر ایستگاه بدست می‌آیند.

جهت تعیین پارامترهای توجیه نسبی بین لنزها، از یک روش بهبود یافته بر مبنای سرشکنی دسته اشعه که توسط امنزاده و همکاران (۱۳۹۰) ارائه شده است، استفاده گردید. در این بخش، از خروجی نرم افزار آسترلیس شامل پارامترهای کالیبراسیون دو لنز و همچنین پارامترهای توجیه خارجی، برای تعیین پارامترهای توجیه نسبی استفاده می‌شود که برای این منظور در نرم افزار Matlab کدنویسی شده است.

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. برای معادلات پایه شرط هم خطی که به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$F_x = x_c - \Delta x + f \left[ \frac{m_{11}(X_A - X_0) + m_{12}(Y_A - Y_0) + m_{13}(Z_A - Z_0)}{m_{21}(X_A - X_0) + m_{22}(Y_A - Y_0) + m_{23}(Z_A - Z_0)} \right] = 0 \quad (1)$$

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

در این روش، با توجه به رابطه (۱)، برای نقاط موجود در تصاویر عدسی چپ، از رابطه (۱) نسبت به ۹ پارامتر که شامل پارامترهای توجیه خارجی و مختصات زمینی نقطه مورد نظر می‌باشد، به صورت رابطه زیر مشتق گرفته می‌شود:

از مرحله کالیبراسیون قبلاً تعیین شده ثابت می‌باشند، روش پیشنهادی در خصوص حل مشکل مربوط به نقصان بافت می‌تواند کارآمد بوده و می‌توان از این اطلاعات برای تعیین ماتریس تبدیل هم‌نگاری بین زوج تصویر یک دوربین استریو استفاده نمود که این موضوع تولید مدل سه‌بعدی از زوج تصویر دوربین استریو را از فرآیند تناظریابی بی‌نیاز می‌سازد. با داشتن پارامترهای توجیه داخلی و پارامترهای توجیه نسبی، می‌توان ماتریس تبدیل هم‌نگاری را از رابطه

زیر بدست آورد (Seedahmed and Habib, 2002):

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \gamma_x \\ 0 & 1 & \gamma_y \\ 0 & 0 & -1/f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & -(m_{11}X_0 + m_{12}Y_0 + m_{13}Z_0) \\ m_{21} & m_{22} & -(m_{21}X_0 + m_{22}Y_0 + m_{23}Z_0) \\ m_{31} & m_{32} & -(m_{31}X_0 + m_{32}Y_0 + m_{33}Z_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه فوق، ماتریس A حاوی مقادیر فاصله کانونی و مختصات نقطه اصلی از پارامترهای توجیه داخلی و ماتریس B حاوی پارامترهای توجیه نسبی (دوران و انتقال‌ها) می‌باشد. در نتیجه، در این روش مستقیماً از المان‌های توجیه داخلی و نسبی می‌توان ماتریس تبدیل را بدست آورد که اساساً دیگر نیازی به تعیین نقاط مشخص و تناظریابی نیست. لذا ماتریس تبدیل تعیین شده به تصویر چپ اعمال می‌شود تا روی تصویر راست قرار گیرد و سپس برابر توضیحات گفته شده تصویر استریو تولید می‌شود.

### ۲-۳- بازسازی هندسی

با توجه به ثبات اجزای دوربین استریو، می‌توان از این اطلاعات به عنوان مقادیر ثابت در فرآیند اندازه‌گیری‌های هندسی استفاده نمود که از مزایای مهم بکارگیری این نوع دوربین‌ها است. چنانچه سیستم مختصات دوربین بر مبنای تصویر عدسی سمت چپ تعریف شود، می‌توان مقادیر پارامترهای موقعیت و دوران‌ها را برای دوربین سمت چپ برابر صفر در نظر گرفت ( $X_0^1 = Y_0^1 = Z_0^1 = \omega_0^1 = \phi_0^1 = \kappa_0^1 = 0$ ). با در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای توجیه نسبی (دوران‌ها و انتقال‌ها) عدسی سمت راست دوربین استریو نسبت به عدسی سمت چپ حاصل از مرحله کالیبراسیون و نوشتن

معادلات شرط هم خطی تصاویر عدسی چپ از پارامترهای توجیه خارجی عدسی چپ و برای خطی کردن معادلات شرط هم خطی تصاویر عدسی راست از پارامترهای توجیه خارجی عدسی چپ و پارامترهای توجیه نسبی دو عدسی مشتق گرفته می‌شود.

### ۲-۲- تولید مدل بصری سه‌بعدی

یکی از روش‌های نمایش مدل بصری محیط، آنالگراف می‌باشد. یکی از مراحل تولید مدل سه‌بعدی، انجام تناظریابی و تعیین نقاط متناظر بین زوج تصویر برای تعریف رابطه تبدیل بین دو تصویر است. پس از تعیین نقاط متناظر، تابع تبدیل هم‌نگاری (homography) بین هر زوج تصویر به صورت زیر تعیین می‌شود (Gledhill, 2009):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & H_{1,3} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & H_{2,3} \\ H_{3,1} & H_{3,2} & H_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

در این تبدیل،  $x, y$  و  $x', y'$  به ترتیب مختصات تصویری نقاط عکس چپ و راست می‌باشند و  $H_{ij}$ ها پارامترهای تبدیل ماتریس هم‌نگاری هستند. پس از تعیین رابطه تبدیل، این تبدیل به تصویر چپ اعمال شده و این تصویر روی تصویر سمت راست قرار می‌گیرد. سپس تصویر استریو حاصل بصورت آنالگراف با در نظر گرفتن باند سبز-آبی تصویر سمت چپ و باند قرمز تصویر سمت راست تولید می‌شود (Gledhill, 2009) که در این خصوص کدنویسی به زبان Matlab صورت گرفت.

یکی از مشکلات تولید مدل سه‌بعدی از دو تصویر پوشش‌دار، امکان عدم تعیین نقاط کلیدی در تناظریابی بعلافت بافت خاص محیط می‌باشد که این موضوع در مناطق شهری که ممکن است بعضاً دارای بافت همگون و فاقد نقاط مورد نیاز تناظریابی در تصاویر اخذ شده از مناطق شهری مانند نقاط گوشه و تقاطع باشند، بسیار اهمیت می‌یابد. البته مشکلات متعددی در زمینه انجام تناظریابی وجود دارد، اما با توجه به اینکه پارامترهای دورانی و انتقالی بین سیستم مختصات تصاویر عدسی‌های دوربین استریو که

مربوط به این الگوریتم) انجام شده و مختصات هر زوج نقطه متناظر در معادلات تقاطع قرار می‌گیرد تا مختصات زمینی آنها تعیین شود. سپس برای مناطقی از تصویر که در آنها نقاط متناظر وجود ندارد، با استفاده از نزدیک‌ترین نقاط اطراف آنها که مختصات دار هستند، مؤلفه مختصاتی در راستای محور تصویربرداری تخصیص داده می‌شود تا به نحوی تمامی نواحی تصویر دارای مؤلفه عمق باشند و در نهایت نقشه عمق بدست می‌آید.

معادلات شرط هم‌خطی برای دو نقطه متناظر در زوج تصویر دوربین استریو خواهیم داشت:

$$\begin{cases} x_1 + \Delta x_1 = -f_1 \frac{X}{Z} \\ y_1 + \Delta y_1 = -f_1 \frac{Y}{Z} \\ x_2 + \Delta x_2 = -f_2 \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y_2 + \Delta y_2 = -f_2 \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $x, y$  مختصات تصویری دو نقطه متناظر در زوج عکس استریو،  $f$  فاصله اصلی،  $\Delta x_1, \Delta y_1$  چند جمله‌ای حاوی پارامترهای توجیه داخلی عدسی سمت چپ و  $\Delta x_2, \Delta y_2$  چند جمله‌ای حاوی پارامترهای توجیه داخلی عدسی سمت راست،  $X_0, Y_0, Z_0$  پارامترهای انتقال و  $m_{i,j}$  درایه‌های ماتریس دورانی نسبی بین دو عدسی دوربین استریو می‌باشند. با توجه به اینکه پارامترهای توجیه نسبی بین مراکز دو لنز از مرحله کالیبراسیون قبلاً معلوم شده، در نتیجه هندسه دوربین برای تشکیل مدل سه بعدی و اندازه‌گیری مختصات مدلی نقاط معلوم می‌باشد که این اندازه‌گیری به صورت دستی روی تصاویر انجام می‌شود. با توجه به اینکه مقادیر پارامترهای انتقال بین عدسی و در نتیجه باز بین دو عدسی در فرآیند کالیبراسیون و با استفاده از میدان آزمون حاوی چندین طول معلوم (scale bar) در مقیاس واقعی بدست آمده است، برای محاسبه مختصات زمینی هر نقطه از محیط، با انتخاب و اندازه‌گیری دستی مختصات زوج نقطه متناظر روی دو تصویر، با انجام تقاطع، یعنی حل دستگاه ۴ معادله و ۳ مجهول، مختصات زمینی آن نقطه یعنی  $X, Y, Z$  در مقیاس واقعی بدست خواهد آمد.

### ۳- پیاده‌سازی و تحلیل نتایج بررسی‌های عملی

با توجه به مطالب گفته شده در دو بخش فوق، در یک بررسی مدل‌سازی محیط، از دوربین استریوی با ابعاد پیکسل ۱/۶ میکرون استفاده شد. در ابتدا دوربین مذکور به روش گفته شده کالیبره گردید. در جدول ۱، پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی دوربین استریو و متوسط خطای تعیین آنها در فرآیند کالیبراسیون آورده شده است.

جدول ۱: اختلاف پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی دوربین استریو و متوسط خطای تعیین آنها

پارامترها	مقادیر توجیه نسبی	خطای برآورد
$\Delta\alpha$ (degree)	0.1396	0.0199
$\Delta\varphi$ (degree)	0.6448	0.0048
$\Delta\kappa$ (degree)	-0.4763	0.0015
$\Delta X$ (mm)	76.9439	0.0804
$\Delta Y$ (mm)	-0.9836	0.0763
$\Delta Z$ (mm)	0.4809	0.1195

در فرآیند کالیبراسیون دوربین استریو، تنظیمات دوربین روی حالت دستی و ثابت قرار داده شد و سپس پارامترهای توجیه داخلی و نسبی برابر توضیحات گفته شده تعیین شدند. پس از آن، با استفاده از دوربین استریوی مورد نظر و بدون تغییر تنظیمات، چند تصویر به طور دلخواه از نمای ساختمان‌ها در محیط‌های مختلف (محیط دانشگاه و محیط یک خیابان) اخذ شد. جهت تصویربرداری از محیط استفاده گردید. در نگاره ۳، به عنوان نمونه برخی تصاویر چپ و

همچنین با توجه به مختصه بدست آمده در راستای محور تصویربرداری ( $Z$ )، می‌توان نقشه عمق در مقیاس واقعی تولید نمود. برای تولید نقشه عمق به این صورت عمل می‌شود که تصویر به چند ناحیه تقسیم شده و در هر ناحیه تناظریابی با استفاده از الگوریتم sift که دقت و صحت آن تأیید شده است، با تراکم بالا (با تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای



نگاره ۳: تصاویر چپ و راست اخذ شده از محیط توسط دوربین استریوی Fuji W3

راست اخذ شده از محیط‌های مورد اشاره مشاهده می‌شود. روی هم قرار گرفته و می‌توان تصویر آناگلیف تولید نمود سپس برای هر زوج تصویر، هم با استفاده از تناظریابی و چشم انسان قابلیت برجسته بینی آن را نیز به راحتی دارد.

Homography matrix:		
H =		
0.801999	-0.019150	1117.053322
-0.035091	0.989489	-26.698043
-0.000137	0.000013	1.000000
Homography matrix:		
H =		
0.789441	0.009431	1112.099997
0.000133	0.999878	-24.800003
-0.000009	0.000008	1.000000

نگاره ۴: تعیین رابطه تبدیل بین زوج تصویر اول نگاره ۳ از روش تناظریابی sift (بالا) و با استفاده از اطلاعات کالبراسیون (پایین)

در نگاره شماره ۴ نیز مقادیر درایه‌های ۱,۳ و ۲,۳ ماتریس هم نگاری مربوط به مقادیر پارامترهای انتقالی در

روش جهت ارزیابی روش پیشنهادی و هم به روش گفته شده با استفاده از پارامترهای توجیه داخلی و پارامترهای توجیه نسبی حاصل از کالبراسیون، ماتریس تبدیل هم نگاری بین زوج تصویر تعیین شد. روش sift یکی از روش‌های کارآمد با دقت بالای زیر پیکسل در زمینه تناظریابی به خصوص تصاویر برد کوتاه می‌باشد که توانایی و کیفیت آن به اثبات رسیده است (Gledhill, 2009) و می‌تواند روشی مناسب برای ارزیابی روش پیشنهادی باشد. برای مثال، در نگاره ۴ رابطه تبدیل بدست آمده بین زوج تصویر اول نگاره ۳ از هر دو روش نشان داده شده است.

ماتریس تبدیل هم نگاری در واقع همان ماتریس تبدیل پروجکتیو است که تبدیل بین دو تصویر را تعیین می‌کند. در دوربین استریو، با توجه به اینکه محورهای سیستم مختصات تصویری مربوط به دو لنز تقریباً با یکدیگر موازی هستند، عملاً پارامترهای دورانی نزدیک صفر شده و تنها با اعمال دو انتقال در جهت سطر و ستون پیکسل‌ها دو تصویر تقریباً



جهت سطر و ستون پیکسل‌ها بر حسب پیکسل هستند که درصد اختلاف اعداد بدست آمده از دو روش برابر است با:

$$\left| \frac{(1117.053 - 1112.099)}{1117.053} \right| \times 100 = 0.45$$

$$\left| \frac{(-26.698 - (-24.800))}{-26.698} \right| \times 100 = 6.11$$



مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر پارامترهای انتقالی حاصل از روش استفاده از تناظریابی و روش استفاده از اطلاعات مرحله کالیبراسیون ۰/۴۵ درصد و ۶/۱۱ درصد است که مقادیر کوچکی است. در نتیجه می‌توان گفت روش استفاده از پارامترهای کالیبراسیون در تعیین ماتریس تبدیل به خوبی عمل می‌نماید. در نگاره ۵، تصاویر استریو آنالگلیف تولید شده از زوج تصاویر نگاره ۳ حاصل از روش پیشنهادی نشان داده شده است.



برای بررسی کیفیت بصری مدل‌های استریوی تولید شده بر اساس بکارگیری پارامترهای کالیبراسیون دوربین، از زوج تصاویر نگاره ۳ به روش تناظریابی sift نیز که توانایی بالایی در تولید مدل سه‌بعدی از دو تصویر پوشش‌دار دارد (Gledhill, 2009) مدل‌های استریو آنالگلیف تولید شد. مقایسه مدل‌های تولیدی دو روش با یکدیگر نشان داد مدل‌های استریوهای حاصل از روش تناظریابی دارای نتایج بهتری خصوصاً در قسمت‌های مرزی هستند.

نگاره ۵: تصاویر استریو آنالگلیف تولید شده از زوج تصاویر نگاره ۳ حاصل از روش پیشنهادی



نگاره ۶: برخی طول‌های چک اندازه‌گیری شده در محیط



اندازه‌گیری زمینی، طول آنها حاصل از مختصات محاسبه شده دو سر آنها، و اختلاف آنها آورده شده است.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که مقادیر طول‌های بدست آمده حاصل از برآورد مختصات آنها از بازسازی هندسی مدل‌ها نزدیک به مقادیر طول آنها حاصل از اندازه‌گیری به روش نقشه‌برداری زمینی است و اختلاف طول‌ها کمتر از ۱۰ سانتیمتر است. عوامل متعددی مانند قدرت تفکیک دوربین، دقت کالیبراسیون، فاصله نقاط اندازه‌گیری شده از دوربین، دقت قرائت نقاط و ... روی دقت تعیین مختصات نقاط در روش مورد نظر تأثیرگذارند که مجموع تأثیر این عوامل موجب خطای تعیین مختصات نقاط می‌باشد. یکی از اشکالات استفاده از این نوع دوربین‌ها، باز کوچک بین دو لنز است که دقت تعیین مختصات نقاط با افزایش فاصله آنها از دوربین به شدت کاهش می‌یابد. از لحاظ تئوری می‌توان گفت، با فرض استحکام هندسی دوربین، رابطه تعیین‌کننده دقت در راستای محور نوری دوربین برای فاصله تصویربرداری H به صورت زیر می‌باشد:

$$\delta_{op} = \frac{H^2}{b \cdot f} \delta_{px} \quad (7)$$

در رابطه فوق، H فاصله تصویربرداری، b طول پایه بین دو عدسی، f فاصله کانونی،  $\delta_{px}$  دقت اندازه‌گیری اختلاف منظر x، و  $\delta_{op}$  نشان دهنده دقت در راستای محور نوری است. در صورت اندازه‌گیری دستی نقاط روی تصاویر، دقت اندازه‌گیری نقاط تصویری عموماً برابر نصف ابعاد پیکسل در نظر گرفته می‌شود که با توجه به رابطه فوق و مشخصات دوربین مورد استفاده، حداکثر فاصله‌ای که می‌توان به دقت ۱۰۰ میلیمتر رسید، حدود ۱۵ متر است. نقاطی نیز که اندازه‌گیری شده‌اند، عموماً فاصله‌ای کمتر از این مقدار تا دوربین دارند.

در بررسی مقادیر اختلاف طول‌ها نیز مشاهده شد که طول‌هایی که در راستای امتداد محور تصویربرداری قرار داشتند و همچنین فاصله نقاط دو سر آنها از دوربین بیشتر، دارای خطای بیشتری بودند، زیرا محاسبه مؤلفه مختصاتی در راستای امتداد محور تصویربرداری دارای دقت کمتری

دلیل نتایج بهتر روش تناظریابی این است که با توجه به تأمین تعداد نقاط متناظر مورد نیاز و همچنین دقت‌های زیر پیکسل در تناظریابی، ماتریس‌های تبدیل بدست آمده دارای دقت بالایی می‌باشند؛ حال آنکه در استفاده از روش بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون، تعیین ماتریس‌های تبدیل وابسته به دقت برآورد پارامترهای کالیبراسیون هر عدسی و پارامترهای توجیه‌نسی بین عدسی‌ها بوده و از این رو دقت تولید مدل استریو بسیار وابسته به دقت انجام کالیبراسیون سیستم است. با این حال، نتایج روش بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون نیز مطلوب بوده و در مناطقی که تناظریابی با مشکل مواجه است، به عنوان یک روش کارآمد قابل استفاده است.

جهت بررسی دقت بازسازی اطلاعات هندسی بر اساس بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون و استخراج اطلاعات هندسی در مدل‌های تولید شده، در محیط از گوشه‌های عوارض طبیعی به عنوان نقاط مورد بررسی استفاده شد. برای این منظور، با استفاده از دوربین توتال استیشن و روش نقشه‌برداری زمینی، یک پیمایش سه ضلعی بسته شد و از هر ایستگاه پیمایش، اطلاعات طول و زاویه نقاط مورد نظر برداشت شد. سپس طی یک فرآیند سرشکنی در نرم افزار اتوکلدند، مختصات آنها و دقت برآورد آنها تعیین شد که مختصات این نقاط با دقت ۱ میلیمتر در یک سیستم مختصات دلخواه (نقطه مبنا یکی از ایستگاه‌های پیمایش در نظر گرفته شد) بدست آمد. سپس طول بین برخی از این نقاط محاسبه شدند. برخی از این طول‌ها در نگاره ۶ نشان داده شده است.

جهت تعیین طول بین این نقاط در روش فتوگرامتری، در ابتدا، مختصات تصویری نقاط مورد نظر به صورت دستی در تصاویر اندازه‌گیری شد. سپس مختصات زمینی آنها به روش گفته شده در بخش ۲-۳ تعیین شده و نهایتاً طول بین نقاط محاسبه گردید. با توجه به اینکه مقادیر پارامترهای انتقالی و باز دوربین در فرآیند کالیبراسیون در مقیاس واقعی برآورده شده‌اند، اندازه‌گیری مختصات نقاط در مدل تولید شده نیز در مقیاس واقعی و در یک سیستم مختصات محلی خواهد بود. در جدول ۲، مقادیر طول‌های چک حاصل از

#### ۴- نتیجه گیری

بکارگیری دوربین‌های استریو به عنوان یک ابزار کم هزینه می‌تواند مزایای بسیاری در بازسازی بصری و هندسی محیط داشته باشد. با توجه به ثبات و پایداری دو عدسی دوربین استریو نسبت به یکدیگر، می‌توان از مقادیر حاصل از پارامترهای کالیبراسیون و پارامترهای توجیه نسبی بین دو عدسی (سه انتقال و سه دوران) به عنوان مقادیری ثابت در تسهیل و اتوماسیون تولید مدل بصری و همچنین استخراج اطلاعات هندسی محیط بهره گرفت.

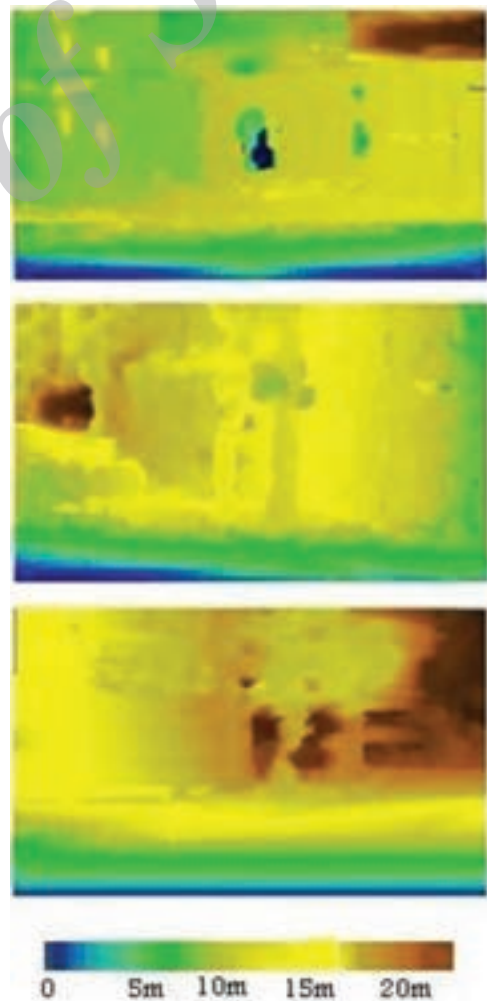
در این مقاله نشان داده شد که چگونه با استفاده از پارامترهای توجیه نسبی بین دو لنز دوربین استریو، می‌توان به صورت اتوماتیک و بدون نیاز به تناظریابی ارتباط بین دو تصویر را برقرار ساخته و مدل سه بعدی محیط را تولید نمود. نتایج حاصل از تولید مدل سه بعدی از محیط بر اساس بکارگیری اطلاعات کالیبراسیون نشان داد که مدل‌های تولید شده دارای کیفیت بصری و سه بعدی مطلوبی بوده و این روش به عنوان یک روش کارآمد قابل استفاده است.

همچنین بیان شد که چگونه با استفاده از مقادیر پارامترهای جابجایی و باز بین دو لنز دوربین استریو که با مقیاس واقعی در فرآیند کالیبراسیون بدست می‌آیند، بدون نیاز به اطلاعات هندسی در محیط مانند طول معلوم می‌توان اندازه‌گیری‌های واقعی در مدل تولید شده داشت و همچنین نقشه عمق از محیط تولید نمود. دقت اندازه‌گیری طول‌های چک در بازسازی هندسی محیط بر اساس بکارگیری اطلاعات مرحله کالیبراسیون بررسی نشان داد که بدون نیاز به اطلاعات هندسی در محیط می‌توان اندازه‌گیری در مقیاس واقعی انجام داد و نقشه عمق تولید نمود.

#### سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی "بازسازی بصری و هندسی محیط بر مبنای دوربین استریو" و با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام پذیرفته است.

است. به طور کلی، نتایج این بررسی نشان داد که در روش پیشنهادی، بدون نیاز به تعریف طول معلوم در محیط می‌توان اندازه‌گیری در مقیاس واقعی انجام داد. با توجه به محاسبه مؤلفه مختصاتی نقاط تصویر در راستای محور تصویربرداری در یک شبکه منظم بر روی تصویر و با استفاده از انترپولاسیون (مطابق توضیحات بخش ۲-۳، نقشه عمق تصاویر نیز تولید شد. در نگاره ۷، نقشه‌های عمق تولید شده برای مدل‌های استریوی نگاره ۵ دیده می‌شود. مقایسه نقشه عمق تولید شده در نگاره ۷ با تصاویر نگاره ۵ نشان می‌دهد که نقشه‌های عمق بدست آمده با تقریب خوبی تغییرات را در راستای محور تصویربرداری ارائه داده است.



نگاره ۷: نقشه‌های عمق تولید شده برای مدل‌های استریوی نگاره ۵

- 11- Seedahmed, G. H. and Habib, A. F. (2002). "Linear Recovery of the Exterior Orientation Parameters in a Planar Space", ISPRS Congress, Commission III, WG III/I.
- 12- Varshosaz, M. and Amini, A. Sh. (2007). "Stereo Panoramas: Problems and Solutions", XXI International CIPA Symposium, Athens.

## منابع و مآخذ

- ۱- امن زاده، م.، سعادت سرشت، م. و امینی، ا. ش. (۱۳۹۰). «ارائه روشی بهبود یافته برای کالیبراسیون دوربین‌های استریو»، نشریه علمی-پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره اول شماره ۳.
- 2- Cabral, E., Oliveira, P. and Junior, J. (2008). "An Omnidirectional Stereo Vision System". ABCM Symposium Series in Mechatronics, pp. 643-652.
- 3- Chen, S. E. (1995). "QuickTime VR – An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation", 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 95, pp. 29-38.
- 4- Cobzas, D., and Zhang, H. (2001). "Mobile Robot Localization using Planar Patches and a Stereo Panoramic Model", Vision Interface, pp. 94-99.
- 5- Gledhill, D., Tian, G. Y., Taylor, D. and Clarke, D. (2004). "3D Reconstruction of a Region of Interest using Structured Light and Stereo Panoramic Image", IEEE Eighth International Conference on Information Visualization, pp. 1007-1012.
- 6- Gledhill, D. (2009). "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.
- 7- Gledhill, D., Tian, G. Y., Taylor, D. and Clarke, D. (2003). "Panoramic Imaging—a Review", Computers & Graphics, Vol. 27, pp. 335-345.
- 8- Huang, H. C. and Hung, P. (1997). "SPISY: The Stereo Panoramic Imaging System", Third Workshop on Real-Time and Media Systems, Taiwan, pp. 71-78.
- 9- Lin, T. T., Hsiung, Y. K., Hong, G. L., Chang, H. K. and Lu, F. M. (2008). "Development of a Virtual Reality GIS Using Stereo Vision", Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 63, pp. 38-48.
- 10- Lowe, D. G. (1999). "Object Recognition from Local Scale-Invariant Features", Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1150-1157.