

الگوریتمی جدید و کارا برای دنبال کردن پاره‌خطها در سلسله تصاویر متوالی

قادر کریمیان^۱؛ ابوالقاسم راعی^۲؛ کریم فائز^۳

چکیده

در این مقاله، روش جدیدی برای دنبال کردن پاره‌خطها، در سلسله‌ای از تصاویر متوالی، معرفی شده است. تصاویر توسط دوربین نصب شده بر روی ربات سیار و حین حرکت آن بر روی مسیر دلخواه برداشته می‌شوند. الگوریتم دارای دو مرحله است. در مرحله اول با استفاده از قیود مکان، زاویه، هم‌پوشانی و جهت کنتراست، پاره‌خطهایی که در دو تصویر متوالی نامزد تناظرند، مشخص می‌شوند. در مرحله دوم با استفاده از قیود ترتیب و تابع معیاری مبتنی بر کنتراست، متناظرها انتخاب شده و رفع ابهام سراسری انجام می‌شود. تغییر مکان و زاویه پاره خط‌های متناظر، بر اساس هندسه سیستم و اطلاعات ادومتری نشان داده شده است. سایر قیود و معیارهای تشابه و نیز نحوه استفاده از آنها، که برای اولین بار در این زمینه بکار رفته، عملکرد موثری داشته‌اند. این الگوریتم در مقایسه با الگوریتمی مبتنی بر اصل هموار بودن اختلاف مکانی با سرعتی حدود پنج برابر، کیفیتی بمراتب بهتر را بر روی سلسله تصاویر واقعی از محیط‌های داخلی نشان داده است.

کلمات کلیدی

تصاویر متوالی، دنبال کردن، پاره‌خط، ربات سیار، تعیین موقعیت (Localization)

A New Efficient Algorithm for Line Segment Tracking in a Sequences of Images

G. Karimian; A. Raie; K. Faez

ABSTRACT

In this paper, a new algorithm to track line segments in a sequence of images is introduced. The images are taken by a camera installed on a mobile robot while moving on an arbitrary path. The algorithm consists of two stages. In the first stage, using the criteria of location, orientation, overlapping, and contrast direction, the line segments, which are matching candidate in two sequential images are determined. Second, the matches will be determined through the ordering constraint, along with the criterion function based upon contrast; and the global disambiguation will occur. The constraints, similarity criteria, and the approach to their application, being utilized for the first time in this regard, have proven to be effective. With a speed of approximately five times faster than an algorithm based on the relaxation labeling, the proposed algorithm has shown a much better quality on a series of real images of indoor environments.

KEYWORDS

Image Sequences, Tracking, Line Segment, Mobile Robot, Localization

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۳۳۶۵، karimiankh@aut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۳۳۱۵، Raie@aut.ac.ir

^۳ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۳۳۲۸، kfaez@aut.ac.ir

Mahalanobis بین مولفه‌های مختصات نقطه‌وسط، طول و زاویه هر پاره‌خط و نامزد تناظر آن [۹]، استفاده از ترکیب وزندار از فواصل دو پاره‌خط نامزد از خط تقارنشان و میزان همپوشانی آنها در راستای محور تقارنشان [۱۰] و استفاده از میزان همبستگی شدت روشنایی نقاط نظیر دو پاره‌خط [۱۱]، نمونه‌هایی از تابع معیار بکار رفته در مرحله دوم هستند.

در روشهای یادشده تخمین اولیه‌ای از میزان جابجایی در دست نیست. در [۱۲] تطابق پاره‌خطها در دو تصویر متوالی با داشتن تخمین میزان حرکت در راستای محور نوری دوربین، تحت عنوان استریو با حرکت محوری مورد بحث قرار گرفته است. الگوریتم [۱۲] که مبتنی بر relaxation labeling یا اصل هموار بودن اختلاف مکانی در یک همسایگی می‌باشد، با توجه به پیش فرض آن، یعنی داشتن تخمینی از میزان جابجایی، به مساله مورد بحث این مقاله نزدیکتر است.

با توجه به مقدمات فوق، می‌توان گفت که مدعای این تحقیق، ارائه راه حل جدیدی برای مساله تعمیم یافته در [۱۲] است. بدین معنی که حرکت دوربین از حرکت در امتداد محور نوری به حرکت همراه با دوران، انتقال و زاویه tilt دوربین تعمیم یافته و نیز دنبال کردن پاره‌خطها در سلسله‌ای از تصاویر مورد توجه قرار گرفته است. دستاوردهای این تحقیق که برای اولین بار در این مقاله ارائه شده‌اند، عبارتند: تحلیل هندسه سیستم و دستیابی به قیود مکان و زاویه برای محدود کردن فضای جستجو، نمایش امکان استفاده از مجموعه جدیدی از قیود و معیارهای تشابه و نحوه بکارگیری آنها با کرائی بالا در مساله دنبال کردن پاره‌خطها، مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در حالت حرکت در مسیر مستقیم با الگوریتم [۱۲] و نیز نمایش عملکرد آن در حرکت دلخواه. در ارائه مطالب، بخش ۲ به هندسه سیستم تصویربرداری و تعاریف لازم از دستگاه‌های مختصات، اختصاص یافته است. در بخش ۳، قید مهم و اولیه در محدود کردن فضای جستجو، یعنی مکان متناظر و قاعده ساده‌ای برای تعیین آن ارائه می‌شود. بخش ۴ به معرفی مجموعه فرض‌ها، قیدها و معیارهای تشابه در الگوریتم پیشنهادی و از جمله توجیه نظری استفاده از زاویه پرداخته است. الگوریتم پیشنهادی در بخش ۵ معرفی شده است. ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم [۱۲] در بخش ۶ نشان داده شده است و بالاخره جمع‌بندی نتایج در بخش ۷ آمده است.

۲- هندسه تصویربرداری

تصویربرداری در این تحقیق با دوربین MEGA-D [13] که بر روی ربات سیار PeopleBot [۱۴] در ارتفاع ۱/۲ متر نصب

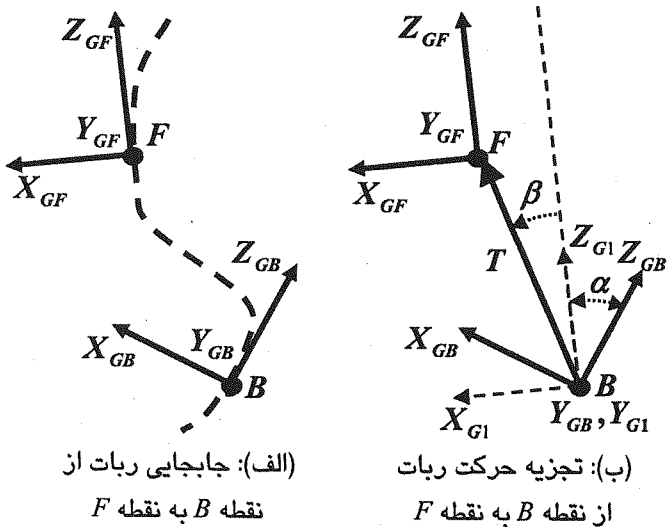
دنبال کردن ویژگی‌ها در سلسله تصاویر متوالی، در زمینه‌های مختلف و با اهداف مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید نقشه محیط، دنبال کردن نقشه و تعیین موقعیت ربات بر اساس دنبال کردن ویژگی‌ها، نمونه‌هایی از کاربرد بینایی در زمینه رباتیک هستند که در منابع تحقیقاتی بطور وسیع به آنها پرداخته شده است. ویژگی‌هایی که در تصاویر متوالی دنبال می‌شوند از دو نوع هستند، نوع اول ویژگی‌های شبه‌نقطه، مانند گوشه‌ها [۱] و ویژگی‌های SIFT [۲] و نوع دوم پاره‌خطهای استخراجی از تصاویر [۳-۸] می‌باشند. از بین این دو، پاره‌خطها برای نمایش ساختار محیط و تولید نقشه موانع، خصوصا در کاربردهای رباتیک، نسبت به ویژگی‌های شبه‌نقطه مناسبتر هستند و در این تحقیق استفاده شده‌اند.

موضوع اصلی این مقاله، دنبال کردن پاره‌خطها در سلسله‌ای از تصاویر متوالی است، که توسط دوربین نصب شده بر روی یک ربات سیار^۱ و در حین حرکت آن بر روی مسیری دلخواه، از محیط‌های داخلی برداشته می‌شود. همچنین فرض بر این است که تخمینی از میزان حرکت ربات در فواصل تصویربرداری، توسط سیستم ادومتری که از تجهیزات رایج ربات‌های سیار است، در دست می‌باشد.

برای دنبال کردن پاره‌خطها در تصاویر متوالی، الگوریتم‌های متعدد و متنوعی در منابع تحقیقاتی یافت می‌شوند. در این الگوریتم‌ها، پس از استخراج پاره‌خطها دنبال کردن یا تطابق پاره‌خطها، نوعا در دو مرحله صورت می‌گیرد. با توجه به این که نامگذاری برای دو تصویر متوالی، برای تمیز آنها از یکدیگر در ادامه بحث و مقاله لازم است، از نامهای "تصویر عقب" و "تصویر جلو" استفاده خواهد شد. ارتباط این نامگذاری با مفروضات این مقاله از این قرار است که تصویر عقب، قبل از تصویر جلو در مسیر حرکت ربات برداشته شده است. با این تعریف، الگوریتم‌های دنبال کردن در مرحله اول، برای هر پاره‌خط در تصویر عقب، فهرست پاره‌خطهای نامزد تناظر از تصویر جلو را تشکیل می‌دهند. در مرحله دوم بعلاوه امکان تعدد نامزدها و اشتراک آنها، رفع ابهام سراسری انجام شده و برای هر پاره‌خط در تصویر عقب، متناظر آن از بین نامزدها انتخاب می‌شود. روشهای مورد استفاده در مرحله اول عمدتا عبارتند از: روشهای مبتنی بر فیلتر کالمن [۹]، روشهای مبتنی بر شار نوری [۱۰] و روشهایی که از هندسه سیستم و محدودیت epipolar [۱۱] برای محاسبه ماتریس پایه و تعیین نامزدها استفاده می‌کنند. در مرحله دوم نیز از یک تابع معیار برای انتخاب متناظر استفاده می‌شود. استفاده از فاصله

نامزدها ارائه شده است. از جمله مباحث نو در این مقاله، حل مساله تعمیم یافته، یعنی حرکت دلخواه با وجود زاویه tilt، دوران و انتقال است که به طور مستقل و در این بخش مورد توجه قرار می گیرد.

برای حل مساله، شکل (۲) را مورد توجه قرار می دهیم. در شکل (۲-الف) جابجایی ربات از نقطه عقب (B) به نقطه جلو (F) در صفحه موازی زمین که از کانون دوربین می گذرد و دستگاه مختصات $\{X_G, Y_G, Z_G\}$ که در بخش ۲ معرفی شد، یکبار به مرکز B و یکبار به مرکز F، در این صفحه نشان داده شده است. مسیر حرکت از B به F دلخواه است و تاثیری بر نتایج این مقاله ندارد، در عین حال نمونه ای از مسیر، با خط چین نشان داده شده است. زاویه tilt دوربین دلخواه و برابر θ می باشد و در طول حرکت تغییر نمی کند و رابطه دستگاه مختصات نشان داده شده و دستگاه مختصات دوربین، با توضیحات بخش ۲ مطابق است.

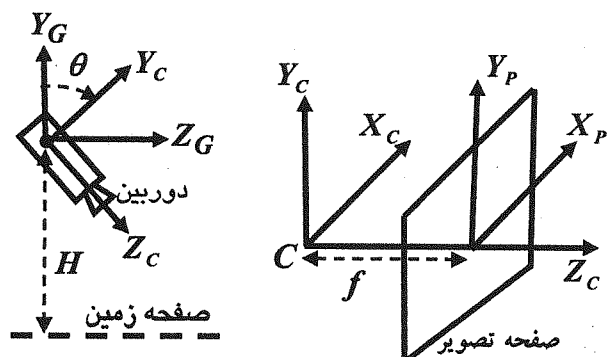


شکل (۲): نمایش مولفه های حرکتی در یک جابجایی دلخواه ربات بر روی زمین

برای تعیین محدوده مکان نامزد تناظر یک پاره خط، در حرکت از نقطه B به F می توان حرکت را به دو مولفه دورانی و انتقالی تجزیه کرد و مکان نامزدها را به ازای این دو مولفه دنبال کرد. نحوه تجزیه حرکت در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود این حرکت صرفنظر از مسیر واقعی طی شده، مشتمل بر دو مولفه است که عبارتند از دوران در نقطه B به میزان α و حول محور Y_{GB} و انتقال مرکز مختصات بصورت خطی از نقطه B به نقطه F و به میزان T که امتداد انتقال با heading ربات زاویه β می سازد. توجه شود که در اثر دوران حول Y_{GB} ، دستگاه مختصات

شده، صورت پذیرفته است. ابعاد CCD دوربین $9/6 \times 7/6$ میلی متر است که در بالاترین دقت، تصویری با 960×1280 نقطه در اختیار می گذارد. تصویر، بوسیله نرم افزار همراه دوربین، پس از یک مرحله کاهش نمونه ها و سپس متوسط گیری، یعنی تبدیل ۴ نقطه به ۱ نقطه، به تصویر 240×320 تبدیل می گردد. فاصله کانونی عدسی دوربین $7/5$ میلی متر است. شکل (۱) سیستم تصویربرداری را نشان می دهد. دستگاه های مختصات $\{X_G, Y_G, Z_G\}$ و $\{X_C, Y_C, Z_C\}$ به مرکز کانون دوربین و دستگاه مختصات $\{X_P, Y_P\}$ به مرکز صفحه تصویر، که در آنها X_G, X_C, X_P هم راستا و به موازات سطح زمین می باشند، در ادامه این مقاله مورد استفاده قرار می گیرند. محور Y_G عمود بر زمین است و Y_C و Y_P هم راستا هستند و زاویه آنها با امتداد Y_G ، زاویه tilt دوربین را می سازد، که با θ نشان داده شده است و بصورت دستی قابل تنظیم است.

تصویربرداری ها در این تحقیق توسط سیستم یاد شده، حین حرکت ربات بر روی مسیره های برنامه ریزی شده، زمین هموار و در محیط های داخلی، صورت پذیرفته است. فرکانس تصویربرداری قابل برنامه ریزی است و اطلاعات مکان و جهت ربات در لحظات تصویربرداری، توسط سیستم اودمتری ربات فراهم می شود.



(الف): موقعیت دوربین نسبت به زمین (ب): رابطه دستگاه های مختصات در کانون و صفحه تصویر

شکل (۱): سیستم تصویربرداری و دستگاه مختصات

۳- تعیین مکان پاره خط های نامزد تناظر در یک حرکت دلخواه

در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، از محدودیت مکان پاره خط های نامزد تناظر، به منظور کاهش فضای جستجو استفاده شده است. در [۱۲] و برای استریوی محوری، یعنی حالت خاصی که حرکت و جابجایی فقط در امتداد محور نوری دوربین یعنی Z_C واقع می شود، روش تعیین محدوده مکان

هستند. $\{X_{G1}, Z_{G1}\}$ بدست می‌آید که با $\{X_{GF}, Z_{GF}\}$ موازی است. بنابراین ملاحظه می‌شود که جابجایی نه تنها در امتداد محور نوری نیست [۱۲]، بلکه با دوران (α)، انتقال (T)، زاویه انتقال (β) و زاویه tilt دلخواه یعنی θ ، کاملاً تعمیم یافته است. همچنین توجه شود که پارامترهای حرکت از نقطه B به F همگی از اطلاعات ادومتری قابل تعیین هستند. نحوه بدست آوردن این پارامترها از این قرار است که سیستم ادومتری با استفاده از انکدرهای نصب شده بر روی چرخهای ربات و جابجایی آنها، تغییر موقعیت نسبی ربات را بین هر دو نقطه دلخواه در اختیار قرار می‌دهد. بعنوان مثال و برای شکل (۲)، تغییر موقعیت نسبی ربات از B به F با در اختیار گذاشتن مختصات نقطه F در دستگاه $\{X_{GB}, Y_{GB}, Z_{GB}\}$ و میزان α ، توسط سیستم ادومتری مشخص می‌شود. با داشتن این اطلاعات بدیهی است که T و β نیز در دست می‌باشند. زاویه θ بصورت دستی تنظیم می‌شود و مقدار دقیق آن طی فرآیند تنظیم^۲ دوربین بدست می‌آید.

با توجه به تعاریف ارائه شده برای پارامترهای حرکت، اثر دوران، انتقال و tilt بر جابجایی تصویر پاره‌خطها و در نهایت قاعده ساده‌ای برای تعیین مکان نامزدها، در ادامه این بخش ارائه می‌شود.

۳-۱- اثر دوران و tilt بر جابجایی تصویر پاره‌خطها

از آنجا که تصویر یک پاره‌خط دلخواه در فضا، یک پاره‌خط در صفحه تصویر است، مساله جابجایی تصویر یک پاره‌خط در صفحه تصویر به مساله تعیین جابجایی تصویر نقاط ابتدا و انتهای پاره‌خط در صفحه تصویر خلاصه می‌شود. بنابراین برای حل مساله، مکان تصویر نقطه دلخواه P در فضا قبل و بعد از دوران به میزان α در حالیکه دوربین دارای زاویه tilt به میزان θ است، بررسی می‌شود. برای ساده شدن بحث، سه دستگاه مختصات همگن را در نظر می‌گیریم که مرکز هر سه، کانون دوربین است.

$$\begin{aligned} &\{X_{C1}, Y_{C1}, Z_{C1}, 1\} \\ &\{X_{C2}, Y_{C2}, Z_{C2}, 1\} \\ &\{X_{C3}, Y_{C3}, Z_{C3}, 1\} \end{aligned}$$

این سه دستگاه مختصات که بترتیب دستگاه مختصات قبل از دوران و با tilt برابر صفر، دستگاه مختصات با $tilt = \theta$ قبل از دوران و دستگاه مختصات با $tilt = \theta$ و پس از دوران به اندازه α هستند. مختصات نقطه دلخواه P در این سه دستگاه همگن را بترتیب P_1 ، P_2 و P_3 و ماتریس‌های تبدیل به ازای زاویه $tilt = \theta$ و دوران به میزان α را بترتیب M_θ و M_α می‌نامیم. بدیهی است که روابط (۱) و (۲) و (۳) برقرار

$$P_1 = M_\theta P_2 = M_\alpha M_\theta P_3 \quad (۱)$$

$$P_3 = M_\theta^{-1} M_\alpha^{-1} M_\theta P_2 = M P_2 \quad (۲)$$

$$M = M_\theta^{-1} M_\alpha^{-1} M_\theta$$

$$M_\theta^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_\alpha^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$M_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

اگر مختصات سه‌بعدی یک نقطه دلخواه قبل و بعد از دوران به میزان α بترتیب با $(X_{t-1}, Y_{t-1}, Z_{t-1})$ و (X_t, Y_t, Z_t) و مختصات تصویری آن بترتیب با (x_{t-1}, y_{t-1}) و (x_t, y_t) و نشان داده شوند، با توجه به روابط (۲)، (۳) و رابطه (۴) و با در نظر گرفتن مدل روزنه‌ای^۲ برای دوربین و اعمال تبدیلات پرسپکتیو رابطه (۵) برقرار است:

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_{t-1} \\ Y_{t-1} \\ Z_{t-1} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} \frac{X_{t-1}}{Z_{t-1}} \\ \frac{Y_{t-1}}{Z_{t-1}} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} \frac{X_t}{Z_t} \\ \frac{Y_t}{Z_t} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن f فاصله کانونی دوربین است. با ترکیب دو رابطه (۴) و (۵) روابط کلی حاصل می‌شوند که ارتباط بین مختصات تصویری نقاط را قبل و بعد از دوران نشان می‌دهند.

چنانچه میزان دوران کوچک باشد، یعنی $\sin(\alpha) \approx \alpha$ و $\cos(\alpha) \approx 1$ ، آنگاه روابط کلی به روابط (۶) و (۷) ساده

می‌شوند. این فرض، یعنی کوچک بودن α ، اغلب در طی مسیرهای معمول برقرار است. بدیهی است که چنانچه α بزرگ باشد می‌توان از روابط بدون تقریب استفاده کرد.

$$x_t = f \frac{x_{t-1} - \alpha \sin(\theta) y_{t-1} - f \alpha \cos(\theta)}{\alpha \cos(\theta) x_{t-1} + f} \quad (6)$$

$$y_t = f \frac{\alpha \sin(\theta) x_{t-1} + y_{t-1}}{\alpha \cos(\theta) x_{t-1} + f} \quad (7)$$

در بخش ۳-۳ و برای تعیین محدوده مکان پاره‌خط‌های متناظر در حرکت دورانی از روابط (۶) و (۷) استفاده شده است. با استفاده از این روابط برای هر پاره‌خط در تصویر عقب، مکان نقاط ابتدا و انتهای آن در تصویر جلو تعیین می‌شود.

۳-۲- اثر انتقال ربات در امتداد دلخواه بر جابجایی

تصویر پاره‌خط‌ها

در این بخش حرکت انتقالی ربات و جابجایی تصویر پاره‌خط‌ها در اثر این حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حرکت انتقالی فرض بر این است که ربات بدون دوران از نقطه عقب (B) به نقطه جلو (F) منتقل می‌گردد، به طوریکه محورهای مختصات ربات قبل و بعد از انتقال، موازی هم باقی می‌مانند و لیکن راستای جابجایی و heading ربات می‌توانند با هم زاویه داشته باشند. در شکل (۲-ب) محورهای مختصات ربات قبل و بعد از حرکت انتقالی بترتیب با (X_{G1}, Z_{G1}) و (X_{GF}, Z_{GF}) نشان داده شده‌اند و انتقال به میزان T این دو دستگاه مختصات را بر هم منطبق می‌کند. زاویه بین راستای جابجایی و heading ربات نیز با β نشان داده شده است.

برای حل این بخش از مساله شکل (۳) را در نظر می‌گیریم که دستگاه مختصات در کانون دوربین و صفحه تصویر را در موقعیت F نشان می‌دهد. در این شکل، Trans-axis محور انتقال دوربین است، این محور و X_{CF} هر دو در صفحه افق و به موازات زمین هستند. تصویر محور انتقال یافته در صفحه Z_{CF}, Y_{CF} با Z_1 نشان داده شده است. θ زاویه tilt و β زاویه محور انتقال نسبت به Z_{GF} در شکل نشان داده شده‌اند. نقطه E محل تلاقی محور انتقال با صفحه تصویر است.

برای دنبال کردن اثر انتقال، نقطه دلخواه U_f را از محیط در نظر می‌گیریم. صفحه‌ای که از U_f و محور انتقال می‌گذرد، در شکل نشان داده شده است. موقعیت این نقطه نسبت به صفحه تصویر قبل از انتقال با U_b نشان داده شده است که در همین صفحه می‌باشد. نقاط U'_f و U'_b در شکل، تصویر نقطه دلخواه U را قبل و بعد از انتقال بر روی صفحه تصویر نشان

می‌دهند. این دو نقطه بر روی پاره‌خط $\overline{EU'_f}$ قرار دارند که محل تلاقی صفحه تصویر با صفحه‌ای است که از U_f و محور انتقال می‌گذرد و آن را خط epipolar تعمیم‌یافته می‌نامیم. بدیهی است که خطوط epipolar تعمیم‌یافته برای نقاط مختلف از محیط همگی از نقطه E، محل تلاقی محور انتقال با صفحه تصویر، می‌گذرند. پاره‌خط‌های $\overline{U_f V_f}$ و $\overline{U_b V_b}$ با خط epipolar تعمیم‌یافته موازی و هر سه در یک صفحه هستند. با توجه به توضیحات فوق برای بدست آوردن اثر انتقال لازم است مختصات نقطه E در صفحه تصویر و رابطه $\overline{EU'_b}$ و $\overline{EU'_f}$ ، یعنی که جابجایی نقطه U، مشخص شود.

با توجه به اینکه طول پاره‌خط $\overline{O_{CF} O_P}$ برابر f فاصله کانونی است و با توجه به روابط مثلثاتی حاکم بر شکل، مختصات نقطه E با روابط (۸) و (۹) بدست می‌آیند.

$$X_E = f \frac{\tan(\beta)}{\cos(\theta)} \quad (8)$$

$$Y_E = f \tan(\theta) \quad (9)$$

اگر $\overline{EU'_f} = r_f$ و $\overline{EU'_b} = r_b$ در نظر گرفته شوند، از تشابه

مثلث‌های $\Delta O_{CF} V_f U_f$ و $\Delta O_{CF} E U'_f$ و نیز مثلث‌های

$\Delta O_{CF} V_b U_b$ و $\Delta O_{CF} E U'_b$ رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\frac{r_f}{r_b} = \frac{L3 + L2 + T}{L3 + L2} = 1 + \frac{T \cos(\beta) \cos(\theta)}{(L3 + L2) \cos(\beta) \cos(\theta)} \quad (10)$$

از آنجا که $L3 \cos(\beta) \cos(\theta)$ برابر f و $L2 \cos(\beta) \cos(\theta)$ فاصله نقطه دلخواه U_f از صفحه تصویر یا Z نقطه U_f می‌باشد، بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{r_f}{r_b} = 1 + \frac{T \cos(\beta) \cos(\theta)}{Z + f} \quad (11)$$

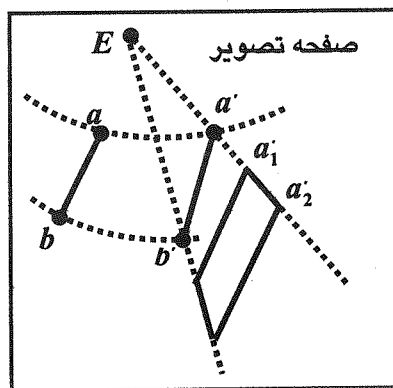
با توجه به این که نقاط دلخواه از محیط، پس از انتقال در محدوده عمق دید یعنی $Z_{\max} \geq Z \geq Z_{\min}$ واقعند و چون f در مقابل Z قابل صرف‌نظر است، برای هر نقطه دلخواه خواهیم داشت:

$$1 + \frac{T \cos(\beta) \cos(\theta)}{Z_{\max}} \leq \frac{r_f}{r_b} \leq 1 + \frac{T \cos(\beta) \cos(\theta)}{Z_{\min}} \quad (12)$$

نتایج بدست آمده در مورد حرکت انتقالی که در زیربخش ۳-۲ مورد استفاده قرار خواهد گرفت، چنین است که برای هر نقطه دلخواه (U) در فضا که در محدوده عمق دید

انتقال با پارامترهای T ، β و θ . جابجایی a و b در اثر دوران با استفاده از α ، θ و روابط (۶) و (۷) بدست آمده و نقاط a' و b' در شکل را خواهیم داشت. جابجایی a' و b' در اثر انتقال با استفاده از پارامترهای T ، β و θ و توضیحات مطرح در جمع‌بندی زیربخش ۲-۳ تعیین می‌شود. یعنی، مختصات نقطه E از روابط (۸) و (۹) بدست می‌آید. خطوط Ea' و Eb' که خطوط epipolar تعمیم‌یافته هستند، مکان نقاط a' و b' پس از انتقال هستند. از آنجا که مقدار Z نقاط در دست نیست، با استفاده از (۱۲) محدوده مکان a' پس از انتقال، یعنی $a'_1a'_2$ و بطور مشابه محدوده مکان b' بدست می‌آید. این مجموعه نقاط تشکیل نوزنقه‌ای را می‌دهند که در شکل نشان داده شده است.

جمع‌بندی این بخش که در بخش ۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد، این است که برای هر پاره‌خط در تصویر عقب، محدوده متناظر آن در تصویر جلو، نوزنقه‌ای است که نحوه بدست آوردن آن بیان شد و دو سر پاره‌خط متناظر بر روی دو ساق نوزنقه واقع می‌باشند.



شکل (۴): چگونگی تعیین محدوده مکان پاره‌خط‌های متناظر در حرکت دلخواه

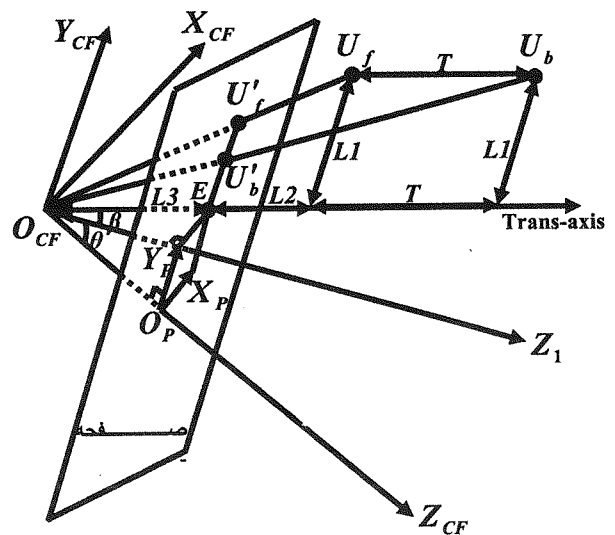
۴- فرض‌ها، قیدها و معیارهای تشابه در الگوریتم پیشنهادی

دنبال کردن پاره‌خط‌ها در دو مرحله تعیین نامزدها و انتخاب متناظر از بین آنها، متکی به موارد زیر است:

الف) قید محدوده مکان متناظر

برای هر پاره‌خط در تصویر عقب، محدوده مکان متناظر آن در تصویر جلو بر اساس روش مطرح شده در بخش ۲-۳ تعیین شده و کلیه پاره‌خط‌هایی که با این محدوده فصل مشترک دارند، به شرط اینکه سایر قیود و شرط‌ها را نقض نکنند، نامزد تناظر می‌باشند.

($Z_{\max} \geq Z \geq Z_{\min}$) قرار دارد و تصویر آن (U'_b) در تصویر عقب در دست است، مکان تصویر آن (U'_f) در تصویر جلو بر حسب پارامترهای انتقال قابل تعیین می‌باشد. اگر پارامترهای انتقال T ، β و θ باشند، مختصات نقطه E از روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود و مکان U'_f بر روی پاره‌خط EU'_b یعنی خط epipolar تعمیم‌یافته واقع است. چنانچه مقدار Z برای نقطه U در دست باشد، مکان دقیق U'_f بر روی این خط از (۱۱) محاسبه می‌شود و در غیر اینصورت، محدوده‌ای از این خط که U'_f بر آن واقع است از (۱۲) بدست می‌آید.



شکل (۳): نمایش اثر انتقال بر جابجایی تصویر نقاط محیط در صفحه تصویر

۳-۳- قاعده ساده در تعیین محدوده مکان پاره‌خط

متناظر در حرکت دلخواه

تعریف دستگاه‌های مختصات، حرکت دلخواه، تجزیه آن به دو حرکت دورانی و انتقالی، پارامترهای حرکت و نحوه استفاده از اطلاعات ادومتری برای تعیین آنها، همگی در ابتدای بخش ۲ ارائه شده است. همچنین اثر دوران و انتقال بر جابجایی تصویر یک نقطه، در پایان زیربخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ جمع‌بندی شده است. با استفاده از این اطلاعات، قاعده ساده‌ای برای تعیین مکان پاره‌خط متناظر ارائه می‌شود.

برای این منظور شکل (۴) را در نظر می‌گیریم که در آن ab تصویر پاره‌خطی دلخواه در تصویر عقب است و مکان متناظر آن در تصویر جلو مورد نظر است. بعبارت دیگر جابجایی ab در صفحه تصویر و به ازای حرکتی با پارامترهای α ، T ، β و θ مطلوب می‌باشد. جابجایی نقاط a و b در دو مرحله دنبال می‌شود، یکی دوران با پارامترهای α و θ و دیگری

می شود.

د) اعمال جهت کنتراست بر اختلاف زاویه پاره خطها جهت کنتراست معیار دیگری است که در الگوریتم پیشنهادی استفاده شده است. بمنظور اعمال اثر این معیار، پاره خطها جهت دار گرفته می شوند. قرارداد جهت گذاری پاره خطها چنین است که برای پاره خطهای غیرافقی، اگر کنتراست متوسط طرف چپ نسبت به طرف راست کمتر باشد، جهت پاره خط رو به بالا و در غیراینصورت رو به پایین می باشد. نیز، برای پاره خطهای افقی، اگر کنتراست متوسط طرف بالا بیشتر باشد، جهت پاره خط بطرف راست و در غیراینصورت بطرف چپ می باشد. بدین ترتیب در عمل و با جهت دار کردن پاره خطها و تعریف جدید برای اختلاف زاویه، معیار جهت کنتراست در اختلاف زاویه، مستتر می شود.

ه) اندازه فاصله کنتراست های دو طرفه دو پاره خط

این معیار تشابه نیز، نقش بسیار موثری در موفقیت الگوریتم پیشنهادی دارد. برای تعریف این معیار، فرض کنید که کنتراست متوسط در حاشیه چپ (بالای) پاره خط l با $C_{LU}(l)$ و برای حاشیه راست (پایین) آن با $C_{RD}(l)$ نشان داده شود. در اینصورت جفت عدد $(C_{LU}(l), C_{RD}(l))$ نقطه ای در صفحه کنتراست دو طرف خطوط و نماینده پاره خط l می باشد. معیار تشابه دو پاره خط l_b و l_f یا $TSCD^\circ$ مطابق رابطه (۱۴) مجذور فاصله نقاط نماینده آنها است و هر چه فاصله کمتر باشد، دو پاره خط از نظر کنتراست شبیه تر هستند.

$$TSCD(l_b, l_f) = [C_{LU}(l_b) - C_{LU}(l_f)]^2 + [C_{RD}(l_b) - C_{RD}(l_f)]^2 \quad (14)$$

معیار فوق تشابه و نزدیکی دو پاره خط را از نظر کنتراست با کارایی بالایی نشان داده است. نکته عملی که قابل ذکر است اینکه، این معیار برای طول کامل پاره خطها محاسبه نمی شود بلکه در بخشی از پاره خطها که نسبت به یکدیگر همپوشانی دارند، محاسبه می گردد.

و) قید ترتیب

قید ترتیب مبتنی بر این فرض است که توزیع پاره خطها و موقعیت آنها نسبت به یکدیگر به ازای دوران و انتقال های کوچک در دو تصویر متوالی مشابه است. توضیحات بیشتر در مورد نحوه استفاده از این اطلاعات و نحوه تلفیق آن با کنتراست دو طرفه، در بخش ۵ و در ضمن معرفی الگوریتم پیشنهادی ارائه می شود.

ب) همپوشانی نرمالیزه شده طولهای پاره خطها

به منظور استفاده از اطلاعات طول در کاهش نامزدها، همپوشانی نرمالیزه شده (LNO°) مطابق (۱۳) تعریف و استفاده شده است. در این رابطه l_b پاره خط تصویر عقب، l_f پاره خط تصویر جلو و $Length(overlap(l_f))$ فصل مشترک l_f با محدوده مکان متناظر پاره خط l_b می باشد، که در بند (الف) نحوه تعیین آن آمده است.

$$LNO(l_b, l_f) = \frac{Length(overlap(l_f))}{\min(Length(l_b), Length(l_f))} \quad (13)$$

شرط همپوشانی نرمالیزه، این واقعیت را بیان می کند که میزان همپوشانی یا $Length(overlap(l_f))$ باید درصد مناسبی از طول پاره خط مرجع (l_b) و یا نامزد آن (l_f) باشد، در غیر اینصورت فرض بر این است که متناظر بهتری برای هر یک از آنها قابل تعیین است. در این مقاله حداقل همپوشانی نرمالیزه ۵۰٪ اختیار شده است.

ج) اختلاف زاویه پاره خطهای متناظر در تصاویر عقب و

جلو

در [۱۵]، برای حرکت های انتقالی در راستای heading ربات ($\beta=0$)، با محاسبه تابع چگالی احتمال اختلاف زاویه برای پاره خطهای متناظر، نشان داده شده است که احتمال اختلاف زاویه های بزرگ کم است. بعنوان نمونه برای خطوط موجود در عمق 1m و به ازای جابجایی $T=10cm$ و زاویه $tilt = 45^\circ$ ، احتمال اینکه اختلاف زاویه بین دو پاره خط متناظر در تصاویر عقب و جلو کمتر از 20° باشد، 0.9938 است.

همچنین در [۱۵]، برای حرکت های دورانی حداکثر تغییرات اختلاف زاویه محاسبه شده و ثابت شده است که حداکثر تغییر زاویه تصویر یک پاره خط دلخواه، به ازای زوایای tilt مختلف و دوربین MEGAD-D کوچکتر یا مساوی زاویه دوران است. بعنوان نمونه اگر زاویه دوران 10° باشد، حداکثر تغییر زاویه تصویر پاره خطها بین دو تصویر متوالی 10° است.

بنابراین هر حرکت دلخواه ربات بین دو نقطه B و F که در آن ربات به اندازه بردار T جابجا شده و به اندازه زاویه α دوران می کند، به مجموعه ای از حرکت های دورانی و انتقالی در راستای heading ربات قابل تجزیه است. اگر فرض کنیم که بین دو نقطه B و F حداکثر میزان جابجایی 10cm و حداکثر میزان دوران 10° باشد، حداکثر تغییر زاویه تصویر یک پاره خط دلخواه در موقعیت های عقب و جلو با احتمال 0.9938 کمتر از 30° است، که 20° آن به خاطر حرکت جابجایی (با احتمال 0.9938) و 10° آن از حرکت دورانی باندازه $\alpha \leq 10^\circ$ ناشی

ن) فرض متناظر بودن یک پاره‌خط با چند پاره‌خط همراستا

در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، امکان تناظر یک به چند پذیرفته می‌شود و در مرحله دوم، پس از آنکه برای یک پاره‌خط، بهترین نامزد بعنوان متناظر انتخاب شد، نامزدهای دیگری نیز که با این متناظر همراستا هستند، متناظر پاره‌خط مرجع فرض می‌شوند. در واقع فرض بر این است که پاره‌خط متناظر بدلائل مختلف به چند پاره‌خط تقسیم شده است.

۵- الگوریتم پیشنهادی

پس از استخراج پاره‌خطها، تطابق طی دو مرحله شامل تشکیل جدول نامزدها و انتخاب متناظر از بین نامزدها، به انجام می‌رسد. برای کاهش نامزدها در مرحله اول و انتخاب متناظر در مرحله دوم از فرضها، قیدها و معیارهایی استفاده می‌شود که در بخش ۴ معرفی شدند.

۵-۱- تشکیل جدول اولیه نامزدها

در مرحله اول از الگوریتم تطابق، ماتریسی ساخته می‌شود که سطرها و ستونهای آن بترتیب نماینده پاره‌خطهای تصاویر عقب و جلو هستند. به تمامی خانه‌های ماتریس "۱" یا "۰" نسبت داده می‌شود. چنانچه برای هر جفت پاره‌خط یکی در تصویر عقب و دیگری در تصویر جلو، شرطهای محدوده مکان متناظر، همپوشانی نرمالیزه، زاویه و جهت کنتراست، یعنی بندهای (الف) الی (د) مذکور در بخش ۴، برقرار باشد، به خانه مربوطه در ماتریس "۱" و در غیر اینصورت "۰" نسبت داده می‌شود. بنابراین یکجا در هر سطر، نامزدهای تناظر را مشخص می‌کنند.

۵-۲- رفع ابهام و انتخاب متناظر از بین نامزدها

برای تعیین پاره‌خطهای متناظر سه حالت مختلف برای سطرها و ستونها تشخیص داده شده و در مورد هر یک به تناسب تصمیم‌گیری می‌شود. در این مرحله از معیار (ه)، قید (و) و فرض (ز)، مذکور در بخش ۴ استفاده شده است.

حالت یک به یک

اگر سطر i ام از جدول نامزدها فقط در ستون z ام "۱" داشته باشد و سایر نقاط سطر و ستون i و z صفر باشند، حالت یک به یک برقرار است و پاره‌خطهای مربوطه بعنوان متناظر قطعی منظور می‌شوند.

حالت یک به چند

اگر در سطر i ام و ستونهای j_1, \dots, j_k ($k > 1$) از جدول نامزدها "۱" داشته باشیم و سایر نقاط در این سطر و ستونها صفر باشند حالت یک به چند خواهیم داشت: برای یک پاره‌خط،

چندین نامزد وجود دارد. در این حالت برای انتخاب متناظر قطعی از بین j_1, \dots, j_k ، از معیار (ه)، یعنی اندازه فاصله کنتراستهای دو طرفه، استفاده می‌شود. سپس اگر j_m بعنوان متناظر قطعی انتخاب شده باشد، تمام پاره‌خطهای همراستا با آن از مجموعه j_1, \dots, j_k نیز متناظر i فرض شده و برچسب i را خواهند گرفت.

حالت چند به چند

مشکل اصلی در پیدا کردن متناظر، مربوط به این حالت است و در الگوریتم پیشنهادی ما، طی سه گام حل می‌شود.

گام اول، تشکیل زیرجدول مستقل:

با حذف سطر و ستونهای مربوط به حالت‌های یک به یک و یک به چند، مابقی جدول می‌تواند به زیرجدول مستقل تقسیم شود. حداقل تعداد سطر و ستون در هر زیرجدول ۲ است. برای تشکیل هر زیرجدول می‌توان از سطرها و یا ستونهای باقیمانده استفاده کرد. بعنوان مثال، برای تشکیل یک زیرجدول، اگر سطر i ام در ستونهای j_1, \dots, j_k ($k \geq 1$) یک داشته باشد، زیرجدول با این سطر و ستونها آغاز می‌شود. سپس سطرهای دیگری که در حداقل یکی از ستونهای j_1, \dots, j_k دارای "۱" هستند، به مجموعه سطرهای جدول اضافه می‌شوند. بدنبال آن تمام ستونهای دیگری که در سطرهای جدید "۱" دارند به مجموعه ستونها اضافه می‌شوند و اینکار ادامه می‌یابد تا سطر و ستونی به زیرجدول اضافه نشود. زیرجدول مستقل، مربوط به پاره‌خطهای موجود در ناحیه‌های تصاویر هستند که بعلت اشتراک در نامزدها، مشکل انتخاب بهینه دارند. بدیهی است که برای پاره‌خطهای مربوط به زیرجدول مستقلی که از اجرای این گام از الگوریتم بدست می‌آیند، اشتراک نامزد وجود ندارد. بنابراین انتخاب متناظرها در هر زیرجدول مستقل، طی دو گام بعدی و مستقل از سایر زیرجدول مستقل صورت می‌پذیرد.

گام دوم، مرتب کردن زیرجدول:

قید ترتیب یعنی بند (و) از بخش ۴، در این گام مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هر زیرجدول مستقل سطرها و ستونها که بترتیب نماینده پاره‌خطها در تصاویر عقب و جلو هستند، هر کدام جداگانه برحسب موقعیت مکانی آنها، از گوشه سمت چپ و پایین تصویر تا گوشه سمت راست و بالای تصویر، مرتب می‌شوند. اطلاعات ترتیب حاکی از این واقعیت است که به ازای انتقال و دوران کم، ترتیب مکانی پاره‌خطها در دو تصویر مشابه است و این امر قیدی را برای یکهای انتخاب شده در "زیرجدول مرتب شده" تحمیل می‌کند. قید تحمیل شده این است که یکهای انتخاب شده در سطرها و ستونها، نمی‌توانند هر زیرمجموعه دلخواهی از یکها باشند. اگر

زیرجدول شامل M سطر و N ستون باشد، با شروع از سطر و ستون $(1,1)$ تا (M,N) ، زیرنویس سطر و ستون یک‌های انتخاب شده، از یک انتخاب به انتخاب بعدی نمی‌تواند کاهش یابد و باید زیرنویس سطر یا ستون یا هر دو حداقل بمیزان ۱ افزایش یابند.

گام سوم، انتخاب مسیر بهینه در زیرجدول مرتب شده: همانطور که بیان شد، قید ترتیب در زیرجدول مرتب شده، قیدی را بر مسیری که یک‌های قابل انتخاب بر آن واقعند، تحمیل می‌کند. اما مسیری که یک‌های قابل انتخاب بر آن واقعند و قید ترتیب را ارضا می‌کنند، منحصر بفرد نیست، پس انتخاب مسیر بهینه بر اساس معیار تشابه (ه)، یعنی اندازه فاصله کنتراست‌های دوطرفه، صورت می‌پذیرد. برای انتخاب مسیر بهینه ابتدا نقاط شاخص تعیین می‌شوند. نقاط شاخص یک‌هایی هستند که در سطر و ستون مربوطه، حداقل $TSCD$ را دارا هستند. این نقاط نیز در حالت کلی در جدول پراکنده هستند و مجموعه آنها الزاما شرط مسیر را ارضا نمی‌کند. بنابراین زیرمجموعه‌ای از آنها، با حداکثر تعداد نقاط شاخص، که شرط مسیر را ارضا کند، تعیین می‌شود. در صورت وجود چند مسیر بهینه، آنکه $\sum TSCD$ کمتری را داشته باشد انتخاب می‌شود و در صورت تعدد جواب یکی از آن زیرمجموعه‌ها به دلخواه انتخاب قطعی می‌شوند. سپس مسیر بهینه بین هر دو نقطه شاخص متوالی که محدود به سطرها و ستون‌های این دو نقطه هستند، با تکرار همین قاعده تعیین می‌شود.

۶- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

در این بخش، ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با الگوریتمی مبتنی بر relaxation labeling که نزدیکترین کار به موضوع این مقاله است، ارائه می‌شود. از آنجا که بانک اطلاعاتی استاندارد از سلسله تصاویر متوالی، برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های دنبال کردن پاره‌خطها در دست نبوده است، در این تحقیق مجموعه‌ای از تصاویر متوالی، از صحنه‌های متنوع داخلی با ساختارهای متفاوت خطوط مرزی، تحت شرایط مختلف نوری و فواصل متفاوت تهیه شده و برای ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدیهی است که اطلاعات و آماری که در این بخش، از عملکرد الگوریتم‌ها بر روی تصاویر نمونه ارائه شده است، متکی بر تطابق چشمی و دقیق تمام پاره‌خطها در تصاویر می‌باشد.

۶-۱- معرفی الگوریتم مورد مقایسه و شرایط مقایسه

الگوریتمی که با الگوریتم پیشنهادی مقایسه می‌شود، در مرجع [۱۲] معرفی شده است. این الگوریتم، در مرحله اول با

داشتن میزان جابجائی در راستای محور نوری دوربین و با استفاده از هندسه سیستم، مکان نامزدها را تعیین نموده و با بکارگیری قیود اختلاف زاویه، علامت کنتراست، مقدار کنتراست متوسط و وجود هم‌پوشانی فهرست نامزدها را تشکیل می‌دهد. برای انتخاب متناظر در مرحله دوم نیز از relaxation labeling یعنی روش تکراری مبتنی بر هموار بودن اختلاف مکانی در یک همسایگی استفاده می‌کند. همان طور که ذکر شد، این الگوریتم برای حالت خاص حرکت یعنی به ازای tilt و دوران صفر درجه و جابجائی محدود 15 cm ارائه شده و ارزیابی آن نیز در [۱۲] بر روی تصاویر خاص نشان داده شده است. در عین حال این الگوریتم از نظر موضوع و مفروضات، نزدیکترین کار موجود در منابع تحقیقاتی، به الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. لذا با جرح و تعدیل‌های لازم و ارزیابی آنها تحت شرایط مختلف، سعی شده است که مقایسه و ارزیابی مناسبی ارائه شود. بدین منظور و بر اساس یافته‌های این مقاله، تغییرات لازم در محدوده مکان نامزد و نیز اثر tilt دلخواه بر الگوریتم [۱۲] اعمال شده است. هر دو الگوریتم بر حسب نرم‌افزار Matlab 6.5 نوشته شده و اجرای آنها بر روی کامپیوتر Pentium 4 با فرکانس 1.4GH زمان سنجی شده است. نتایج مقایسه و ارزیابی در دو قسمت ارائه شده است. در زیربخش ۶-۲ نتایج عملکرد دو الگوریتم بر روی دو جفت تصویر متوالی از دو صحنه متفاوت بدون دوران و با $tilt = 45^\circ$ و جابجایی 15 cm نشان داده شده است. همچنین نتایج دنبال کردن پاره‌خطها در سلسله تصاویری از همان صحنه‌ها و برای مسافت‌های بیشتر حدود 60 cm ارائه گردیده است. در زیربخش ۶-۳ عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حرکتی شامل انتقال، دوران و tilt برای دو تصویر متوالی و سلسله تصاویر متوالی از یک صحنه داخلی نشان داده شده است.

۶-۲- مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها بر روی دو تصویر و

سلسله تصاویر

نتایج اجرای الگوریتم‌ها در شکل‌های (۵) و (۶) برای دو جفت تصویر متوالی نشان داده شده است. در هر یک از این شکل‌ها، بخش‌های (الف) و (ب)، تصاویر عقب و جلو را نشان می‌دهند. بخش‌های (ج) و (د) از شکل‌ها، پاره‌خط‌های استخراج شده برای تصاویر عقب و جلو می‌باشند. بخش‌های (ه) و (و) در شکل‌ها، بترتیب عملکرد الگوریتم جدید و الگوریتم [۱۲] را در تطابق نشان می‌دهند. بخش‌های (ه) و (و) زیرمجموعه‌ای از پاره‌خط‌های تصویر جلو می‌باشند که متناظر آنها در تصویر عقب پیدا شده و بنابراین برچسب پاره‌خط نظیر را گرفته‌اند. شماره‌گذاری پاره‌خطها بعنوان نمونه در شکل (۵) انجام شده است و برای رعایت خوانائی شکل‌ها در اشل ارائه شده،

$45^\circ = \text{tilt}$ ، دوران کل 16° و جابجایی کل 30 cm بوده است. الگوریتم پیشنهادی از ۴۵ پاره‌خط مشترک بین تصویر اول و آخر ۳۷ عدد را به درستی دنبال کرده است، ۸ عدد را نیافته است و تطابق غلط نیز نداشته است.

بدیهی است که هر چه میزان جابجایی و دوران بین یک جفت تصویر متوالی بیشتر باشد، انتظار داشتن خطا در تطابق بیشتر است. لذا عملکرد الگوریتم بر روی یک جفت تصویر از همین دنباله با جابجایی 21 cm و دوران 9.7° نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه آن از ۵۳ پاره‌خط مشترک بین دو تصویر، تطابق صحیح ۵۰ پاره‌خط، خطا در تطابق دو پاره‌خط و عدم تطابق یک پاره‌خط بوده است، که نشان‌دهنده عملکرد قوی در جابجایی و دوران‌های قابل ملاحظه می‌باشد.

۷- جمع‌بندی نتایج

در این مقاله الگوریتم جدیدی برای دنبال کردن پاره‌خطها در تصاویر متوالی بکار گرفته شده است. تصاویر با یک دوربین CCD که در یک ارتفاع معین و با زاویه tilt دلخواه بر روی ربات نصب شده، در حین حرکت ربات بر روی مسیر دلخواه در محیط‌های داخلی برداشته می‌شود. همچنین فرض بر این است که تخمینی از موقعیت نسبی نقاط تصویربرداری، توسط سیستم ادومتری ربات در دست می‌باشد.

این الگوریتم برای محدود کردن نامزدهای تناظر هر پاره‌خط از یک تصویر، در بین پاره‌خطهای تصویر بعدی، از قید محدوده مکان، اختلاف زاویه، جهت کنتراست و هم‌پوشانی بهره می‌برد. نحوه تعیین محدوده مکان متناظر به ازای حرکت دلخواه و قابل استفاده بودن قید زاویه ارائه شده و از مطالب نو در این مقاله است. از آنجا که پاره‌خطهای یک تصویر می‌توانند نامزدهای مشترک در تصویر بعدی داشته باشند، رفع ابهام و انتخاب نهائی متناظر از بین نامزدها ضروری بوده و در این الگوریتم به روشی نو با استفاده از تابع معیاری جدید مبتنی بر کنتراست و بهینه‌سازی تابع معیار با رعایت قید ترتیب انجام شده است.

برای ارزیابی عملکرد و مقایسه الگوریتم این مقاله با سایر الگوریتم‌ها، چندین سلسله تصویر از محیط یک آزمایشگاه برداشته شده و با دنبال کردن دقیق چشمی تمامی پاره‌خطها در این سلسله تصاویر، مبنائی برای ارزیابی فراهم شده است. الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم [۱۲] که مبتنی بر relaxation labeling می‌باشد مورد مقایسه قرار گرفته و با سرعتی حدود پنج برابر، تطابق صحیح بمراتب بیشتر و خطای بمراتب کمتری را در تصاویر بدست آمده بر روی مسیرهای مستقیم نشان

شماره‌گذاری در شکل (۶) صورت نگرفته است. بمنظور فراهم شدن امکان مقایسه عملکرد دو الگوریتم بر روی شکل‌ها، در بخش (ه) و (و) پاره‌خطهایی که هر دو الگوریتم در تطابق آنها موفق بوده‌اند با خطوط پر و پاره‌خطهایی که الگوریتم مربوطه در تطابق آنها موفق بوده و دیگری موفق نبوده، با نقطه‌چین نشان داده شده است. از آنجا که برای تمام پاره‌خطهای این دو تصویر، جدول پاره‌خطهای متناظر از طریق چشمی و با دقت استخراج شده و در دست می‌باشد، جزئیات بیشتر و دقیق‌تری از عملکرد الگوریتم‌ها که در شکل‌ها قابل نمایش و ارائه نیست در جدول (۱) آمده است.

عدم موفقیت الگوریتم پیشنهادی در تطابق ۷ پاره‌خط، از مجموع ۱۸۸ پاره‌خط در دو تصویر، بررسی و دنبال شده است و دلایل عدم موفقیت چنین بوده است: ۲ عدد بدلیل نداشتن شرط ناحیه، ۲ عدد بدلیل نداشتن شرط زاویه، ۱ عدد بدلیل نداشتن شرط کنتراست، ۱ عدد بدلیل نداشتن شرط هم‌پوشانی نرمالیزه و بالاخره ۱ عدد از این پاره‌خطها بدلیل خطا در مرتب کردن پاره‌خطها تطابق داده نشده‌اند. لازم به ذکر است که خطای مرتب کردن، در ۱ زیرجدول از مجموع ۲۷ زیرجدول رخ داده است و دلیل آن نیز این است که حتی بصورت چشمی در موارد خاص تعیین ترتیب مشکل است. همچنین تطابق غلط که برای یک پاره‌خط رخ داده است، بدلیل درست عمل نکردن معیار کنتراست بوده است.

ملاحظه می‌گردد که الگوریتم پیشنهادی با سرعتی حدود پنج برابر الگوریتم [12]، کیفیت بسیار بهتری نیز داشته است. شکل‌های (۷) و (۸) و جدول (۲) عملکرد دو الگوریتم را بر روی سلسله تصاویری از همان صحنه‌ها نشان می‌دهند. عملکرد بر اساس تعداد پاره‌خطهایی از تصویر اول که در سلسله تصاویر دنبال شده و تا تصویر آخر متناظر داشته‌اند بیان شده است. در این حالت نیز سرعت و کیفیت برتر الگوریتم پیشنهادی در جدول (۲) مشاهده می‌شود.

۶-۳- عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حرکت دلخواه

شکل‌های (۹) و (۱۰) عملکرد الگوریتم پیشنهادی را در حرکتی توأم با دوران نشان می‌دهند. ربات برای یک مسیر دایره‌ای برنامه‌ریزی شده است. شکل (۹) عملکرد الگوریتم را برای یک جفت تصویر متوالی با $45^\circ = \text{tilt}$ ، دوران 3.6° و جابجایی 6.8 cm نشان می‌دهد. در این شکل برای ۵۸ پاره‌خط تصویر جلو که در تصویر عقب هم وجود دارد، تمامی متناظرها، بدون خطا تطابق داده شده‌اند. شکل (۱۰) عملکرد الگوریتم را برای سلسله تصاویری از همان صحنه نشان می‌دهد. این آزمایش مبتنی بر ۵ عدد تصویر متوالی،

۸- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت‌های مرکز تحقیقات مخابرات ایران، در انجام این تحقیق، قدردانی می‌شود.

داده است. همچنین عملکرد موثر الگوریتم این مقاله در تعمیم مسیر حرکت، که در [۱۲] محدود به حرکت در امتداد محور نوری دوربین بوده است، مورد ارزیابی قرار گرفت و کارایی موثر آن در تصاویر برداشته شده حین حرکت بر روی یک مسیر دایره‌ای، با دنبال کردن صحیح بیش از ۸۲٪ از پاره‌خطها در طی بیش از 30 cm و با تغییر امتداد 16° مشاهده شده است.

جدول (۱): ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم [۱۲]، بر روی دو تصویر متوالی از دو دنباله مختلف

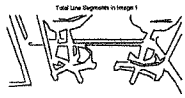
دنباله تصویر	جابجایی (cm)		پاره‌خطهای تصویر اول		تطابق صحیح		عدم موفقیت در تطابق		خطا در تطابق		زمان اجرا (ثانیه)	الگوریتم
					تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد		
۱	۱۵	۷۷	۶۴	۶۲	٪۹۶/۸	۱	٪۱/۶	۱	٪۱/۶	۲/۵	پیشنهادی	
				۵۲	٪۸۲/۸	۵	٪۷/۸	۶	٪۹/۴	۷/۹	[۱۲]	
۲	۱۵	۱۴۵	۱۲۴	۱۱۸	٪۹۵/۲	۶	٪۴/۸	۰	٪۰	۴/۸	پیشنهادی	
				۹۹	٪۷۹/۸	۱۷	٪۱۳/۷	۸	٪۶/۵	۳۱/۶	[۱۲]	
۲و۱		۲۲۲	۱۸۸	۱۸۰	٪۹۵/۸	۷	٪۳/۷	۱	٪۰/۵	۷/۳	پیشنهادی	
				۱۵۲	٪۸۰/۹	۲۲	٪۱۱/۷	۱۴	٪۷/۴	۳۹/۵	[۱۲]	

جدول (۲): ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم [۱۲]، بر روی سلسله تصاویر متوالی از دو صحنه مختلف

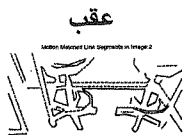
دنباله تصویر	جابجایی (cm)		پاره‌خطهای تصویر اول		تطابق صحیح		عدم موفقیت در تطابق		خطا در تطابق		زمان اجرا (ثانیه)	الگوریتم
					تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد		
۱	۱۵	۶۰	۷۷	۶۴	۵۰	٪۷۸/۱	۱۰	٪۱۵/۶	۴	٪۶/۳	۱۱/۳	پیشنهادی
					۲۵	٪۳۹	۲۸	٪۴۳/۸	۱۱	٪۱۷/۲	۳۴/۷	[۱۲]
۲	۱۵	۷۵	۱۴۵	۸۸	۶۵	٪۷۳/۹	۲۰	٪۲۲/۷	۳	٪۳/۴	۳۳	پیشنهادی
					۵۳	٪۶۰/۲	۲۲	٪۲۵	۱۳	٪۱۴/۸	۱۷۷	[۱۲]
۲و۱		۲۲۲	۱۵۲	۱۱۵	٪۷۵/۷	۳۰	٪۱۹/۷	۷	٪۴/۶	۴۴/۳	پیشنهادی	
				۷۸	٪۵۱/۳	۵۰	٪۳۲/۹	۲۴	٪۱۵/۸	۲۱۱/۷	[۱۲]	



(الف): تصویر عقب



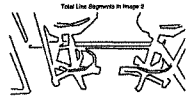
(ج): پاره‌خط‌های تصویر



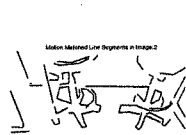
(ه): پاره‌خط‌های تصویر جلو برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی



(ب): تصویر جلو

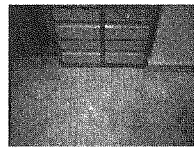


(د): پاره‌خط‌های تصویر جلو

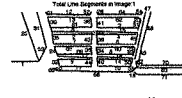


(و): پاره‌خط‌های تصویر جلو برچسب خورده با الگوریتم [12]

شکل (۶): نمونه‌ای از عملکرد الگوریتم‌ها در تطابق پاره‌خط‌ها در دو تصویر متوالی



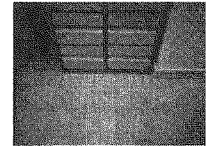
(الف): تصویر عقب



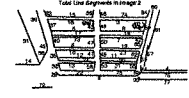
(ج): پاره‌خط‌های تصویر



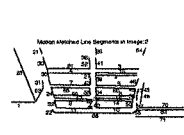
(ه): پاره‌خط‌های تصویر جلو برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی



(ب): تصویر جلو

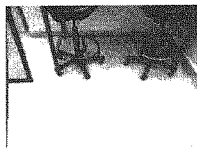


(د): پاره‌خط‌های تصویر جلو

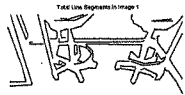


(و): پاره‌خط‌های تصویر جلو برچسب خورده با الگوریتم [12]

شکل (۵): نمونه‌ای از عملکرد الگوریتم‌ها در تطابق پاره‌خط‌ها در دو تصویر متوالی



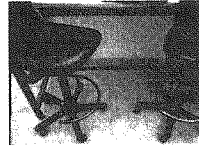
(الف): تصویر اول



(ج): پاره‌خط‌های تصویر اول



(د): پاره‌خط‌های تصویر آخر برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی

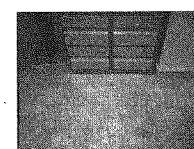


(ب): تصویر آخر

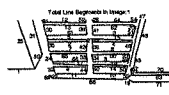


(ه): پاره‌خط‌های تصویر آخر برچسب خورده با الگوریتم [12]

شکل (۸): نمونه‌ای از عملکرد الگوریتم‌ها در دنبال کردن پاره‌خط-ها در سلسله تصاویر واقعی و حرکت بر روی مسیر مستقیم. تصویر اول در ابتدا و تصویر آخر در انتهای مسیر برداشته شده‌اند.



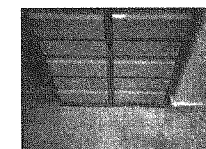
(الف): تصویر اول



(ج): پاره‌خط‌های تصویر اول



(د): پاره‌خط‌های تصویر آخر برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی



(ب): تصویر آخر



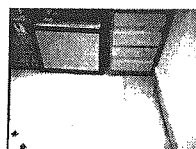
(ه): پاره‌خط‌های تصویر آخر برچسب خورده با الگوریتم [12]

شکل (۷): نمونه‌ای از عملکرد الگوریتم‌ها در دنبال کردن پاره‌خط‌ها در سلسله تصاویر واقعی و حرکت بر روی مسیر مستقیم. تصویر اول در ابتدا و تصویر آخر در انتهای مسیر برداشته شده‌اند.

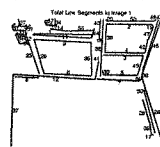
۹- مراجع

- [۱] Andrew Davison, *Mobile Robot Navigation Using Active Vision*, Ph.D Thesis, University of Oxford, 1999.
- [۲] Stephen Se, David Lowe and Jim Little, "Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty using Scale-Invariant Visual Landmarks", *International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 8, pp 735-758, 2002
- [۳] B. Kamgar-Parsi, B. Kamgar-Parsi, "Algorithms for matching 3d line sets", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no 1.5, pp. 58- 593, 2004.
- [۴] Z. Zhang, O. Faugeras, "Building a 3D World Model with a Mobile Robot: 3D Line Segment Representation and Integration", *IEEE Proceedings on Pattern Recognition*, 1990
- [۵] O. Faugeras, *Three Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, The MIT Press, Cambridge, 1993.
- [۶] Z. Zhang, O.D. Faugeras, "Estimation of displacements from two 3D frames obtained from stereo", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 14, I. 12 pp. 1141-1156, 1992
- [۷] H. H. Chen, T. S. Huang, "Matching 3-D line segments with applications to multiple-object motion estimation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v.12 I.10, pp. 1002 - 1008, 1990 .
- [۸] Raymond K. K. Yip, "A multi-level dynamic programming method for line segment matching in axial motion stereo", *Pattern Recognition*, vol. 31, no. 11 pp. 1653-1668 1998
- [۹] R. Deriche and O. Faugeras, "Tracking line segments", In *European Conference on Computer Vision*, pp 259-267, 1990
- [۱۰] Naoki Chiba, Takeo Kanade, "A tracker for broken and closely spaced lines", *Systems and Computers in Japan*, vol. 30 no. 7, pp 18 - 26, 1999
- [۱۱] C. Schmid, A. Zisserman, "Automatic line matching across views", *Proceedings of CVPR '97*, pp. 666-671, 1997.
- [۱۲] X. Jiang and H. Bunke, "Line segment based axial motion stereo", *Pattern Recognition Journal*, vol. 28, no 4, pp 553-562, 1995
www.videredesign.com
- [۱۳] www.activmedia.com

قادر کریمیان خسروشاهی، "تعیین موقعیت رباتهای سیار با استفاده از بینایی استریو در فضای بسته"، گزارش پیشرفت پایان نامه دکتری، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۴.



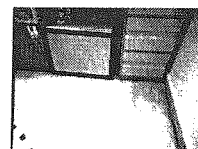
(الف): تصویر عقب



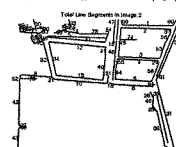
(ج): پاره خطهای تصویر عقب



(د): پاره خطهای تصویر جلو برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی



(ب): تصویر جلو

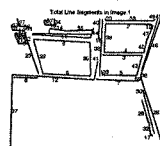


(د): پاره خطهای تصویر جلو

شکل (۹): نمونه ای از اجرای الگوریتم پیشنهادی بر روی دو تصویر متوالی در حرکت بر روی مسیر دلخواه.



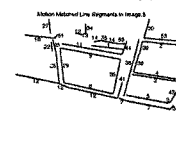
(الف): تصویر اول



(ج): پاره خطهای تصویر اول



(ب): تصویر آخر



(د): پاره خطهای تصویر آخر برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی

شکل (۱۰): نمونه ای از اجرای الگوریتم پیشنهادی در دنبال کردن پاره خطها در سلسله تصاویر واقعی و حرکت بر روی مسیر دلخواه. تصویر اول در ابتدا و تصویر آخر در انتهای مسیر برداشته شده اند.

زیر نویسها

- ۱ Mobile Robot
- ۲ Calibration
- ۳ Pinhole
- ۴ Lines Normalized Overlap
- ۵ Two Sided Contrast Distance