

الگوریتمی جدید و کارا برای تطابق پاره‌خط‌ها در تصاویر استریو، مبتنی بر استفاده موثرتر از اطلاعات نوری، هندسی و ساختاری

قادر کریمیانⁱ؛ ابوالقاسم راعیⁱⁱ؛ کریم فائزⁱⁱⁱ

چکیده

در این مقاله، الگوریتم جدیدی برای تطابق پاره‌خط‌ها در تصاویر استریو ارائه شده است. از اهداف اصلی در طراحی این الگوریتم، بالا بردن کارایی آن، به معنی افزایش هر چه بیشتر تطابق‌های صحیح، ضمن حفظ اطمینان از عدم افزایش تطابق‌های غلط بوده است. در این راستا علل حذف تطابق‌های صحیح و وجود تطابق‌های غلط در برخی از الگوریتم‌های رایج بررسی شده و با معرفی معیارها و قیود جدید سعی شده است که از اطلاعات نوری، هندسی و ساختاری موجود در تصاویر به طور موثرتر استفاده شود. بر این اساس، در مرحله تعیین کاندیدها، الگوریتم از دو معیار جدید و معیارهای رایج و مطمئن epipolar، حداکثر disparity و اختلاف زاویه استفاده کرده است. همچنین پروسه رفع ابهام و انتخاب متناظرها؛ که مشکل اصلی در تطابق است، به طور کامل، یعنی از نظر قیود بکار رفته، تابع معیار و بهینه‌سازی، کاری نو و جدید است. الگوریتم، با تطابق صحیح ۹۶٪ از پاره‌خط‌ها و بدون تطابق غلط، بر روی مجموعه‌ای از تصاویر صحنه‌های داخلی، کارایی بالایی را نشان داده است.

کلمات کلیدی:

بینایی استریو؛ تطابق؛ پاره‌خط

A New Efficient Stereo Line Segment Matching Algorithm Based on More Effective Usage of the Photometric, Geometric and Structural Information

G. karimian; A. Raie; K. Faez

ABSTRACT

In this paper, a new stereo line segment matching algorithm is presented. The main purpose of this algorithm is to increase efficiency, i.e. increasing the number of correctly matched lines while avoiding the increase of mismatches. In this regard, the reasons for the elimination of correct matches as well as the existence of the erroneous ones in some existing algorithms have been investigated. An attempt was also made to make efficient uses of the photometric, geometric and structural information through the introduction of new constraints, criteria, and procedures. Hence, in the candidate determination stage of the designed algorithm two new constraints, in addition to the reliable epipolar, maximum and minimum disparity and orientation similarity constraints were employed. In the process of disambiguation and final matches selection, being the main problem of the matching issue, regarding the employed constraints, criterion function and its optimization, it is a completely new development. The algorithm was applied to

ⁱ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۲۲۶۵؛ karimiankh@aut.ac.ir

ⁱⁱ دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۲۳۱۵؛ Raie@aut.ac.ir

ⁱⁱⁱ استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده برق، تلفن: ۶۴۵۴۲۳۲۸؛ kfaez@aut.ac.ir



the images of several indoor scenes and its high efficiency illustrated by correct matching of 96% of the line segments with no mismatches.

KEYWORDS:

Stereo Vision, Matching, Line segment

است، در بخش ۴ ارائه می شود. موفقیت الگوریتم پیشنهادی در بخش ۵، بر روی مجموعه ای از تصاویر صحنه های داخلی، ارزیابی می شود و بالاخره در بخش پایانی جمع بندی نتایج ارائه می شود.

۲- مروری اجمالی بر الگوریتم های تطابق پاره خط ها

به طور کلی، پس از استخراج پاره خط ها در تصاویر چپ و راست، تطابق در دو مرحله صورت می گیرد. در هر دو مرحله اطلاعاتی بر اساس خصوصیات هندسی و نوری تصاویر، به عنوان معیار تشابه استفاده می شود. در مرحله اول، برای هر پاره خط در تصویر چپ، به صورت محلی کاندیداهای واجد شرایط از تصویر راست مشخص می شوند. در مرحله دوم، به جهت امکان وجود کاندیداهای متعدد و اشتراک در کاندیدها، پروسه رفع ابهام و انتخاب متناظر به صورت سراسری انجام می شود. در ادامه و به عنوان نمونه، اطلاعات مورد استفاده در دو مرحله تطابق، برای تعدادی از این الگوریتم ها مطرح می شود.

مرحله ۱- تشکیل جدول اولیه کاندیدها

استفاده از اطلاعات پاره خط ها در این مرحله برای کاهش تعداد کاندیدهاست. معمولا برای هر پاره خط در تصویر چپ، از قید epipolar و حداقل و حداکثر عمق دید برای تعیین محدوده مکان کاندیدهای آن در تصویر راست استفاده می شود و در [۱،۳] فقط از همین اطلاعات در مرحله (۱) استفاده شده است. سایر اطلاعات پاره خط ها می تواند در کاهش تعداد کاندیدهای موجود در محدوده مکان استفاده شود. قیود مبتنی بر اطلاعات زاویه [۴-۱۰] طول [۴،۶،۷،۸،۱۰]، هم پوشانی [۶،۸،۱۰]، کنتراست متوسط [۵]، نقاط وسط [۷] و لاپلاسیان [۹] نوع اطلاعاتی هستند که در این مرحله استفاده شده اند. ذکر این نکته لازم است که برخی از قیود مانند قیود مبتنی بر طول و هم پوشانی، با فرمول های مختلف بکار رفته اند.

مرحله ۲- انتخاب از بین کاندیدها

در پروسه رفع ابهام و انتخاب متناظرها از بین کاندیدها، الگوریتم های مورد بحث بغیر از [۴]، در سه گروه قابل تقسیم هستند. در [۴] از اطلاعات تصویر سوم و معیارهای طول و زاویه استفاده می شود و عملکرد سایر الگوریتم ها به شرح زیر است:

گروه اول [۱،۲،۶،۸] از یک تابع معیار؛ که ترکیب وزنداری از مولفه های بردار ویژگی پاره خط ها است، استفاده می کنند.

۱- مقدمه

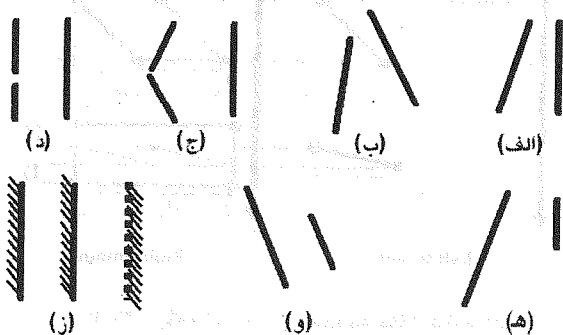
هدف اصلی در بینایی استریو، استخراج اطلاعات سه بعدی اجسام موجود در محیط بر اساس تحلیل تصاویر گرفته شده از دو یا چند نمای مختلف است. بینایی استریو در زمینه های مختلف، نظیر شناسایی سه بعدی اجسام، تعیین ساختار محیط، تعیین موقعیت اجسام در محیط، دنبال کردن اجسام و ناوبری ربات های سیار کاربرد دارد.

در یک دسته بندی کلی، الگوریتم های استریو، به دو نوع مبتنی بر ناحیه و مبتنی بر ویژگی تقسیم می شوند. الگوریتم های مبتنی بر ویژگی؛ که با موضوع این مقاله ارتباط دارد، از سه بخش استخراج ویژگی، تطابق استریو و محاسبه عمق تشکیل شده اند. در بخش استخراج ویژگی، اجزای مهم و با معنی یا همان ویژگی ها از تصاویر استخراج می شوند، سپس در بخش تطابق سعی می شود که با استفاده از قیود و معیارهای تشابه، اجزای متناظر در تصاویر مشخص شوند و نهایتا در بخش محاسبه عمق، برای اجزای متناظر اطلاعات عمق محاسبه می شود. ویژگی های بکار رفته در این الگوریتم ها نیز دو نوع هستند: نوع اول ویژگی های شبه نقطه، مانند گوشه ها و ویژگی های SIFT [۲،۱۱] و نوع دوم پاره خط های استخراجی از تصاویر [۱-۱۰] است. پاره خط ها برای نمایش ساختار محیط و تولید نقشه موانع، خصوصا در کاربردهای رباتیک، نسبت به ویژگی های شبه نقطه مناسب تر هستند. بخش تطابق پاره خط ها در الگوریتم استریوی مبتنی بر ویژگی "پاره خط" پیچیده ترین بخش و موضوع اصلی این تحقیق است. در زمینه تطابق پاره خط ها، تحقیقات زیادی صورت پذیرفته و الگوریتم های متنوعی در منابع تحقیقاتی ارائه شده است. این الگوریتم ها کم و بیش از نظر قیود و معیارهای تشابه و نحوه استفاده از آنها در مراحل مختلف تطابق، متفاوت هستند.

در این مقاله با هدف افزایش هرچه بیشتر تطابق های صحیح و در عین حال از دست ندادن دقت، الگوریتم جدیدی برای تطابق پاره خط ها معرفی شده است. در بخش دوم، مروری اجمالی بر الگوریتم های پیشین ارائه می شود. در بخش سوم، ضمن نقدی بر برخی از قیود و معیارهای رایج در تطابق، قیود و معیارهای مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی؛ که چندین مورد از آنها جدید هستند، معرفی می شوند. مراحل تطابق در الگوریتم پیشنهادی؛ که مبتنی بر معیارها، قیود و روش جدید

مورد استفاده در الگوریتم‌های تطابق؛ که در بخش (۲) به آنها اشاره شد، اطلاعات مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی تعریف می‌شوند.

با توجه به هدف اصلی؛ یعنی افزایش تطابق صحیح ضمن حفظ دقت، به پاره‌خط‌های استخراجی از تصاویر واقعی استریو توجه می‌شود. حالت‌های خاصی که برای پاره‌خط‌های متناظر در تصاویر چپ و راست می‌تواند رخ دهد، در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (الف-۱) به علت زاویه واقعی خط با صفحه تصویر، طول پاره‌خط‌ها متفاوت است. حالت (ب-۱) به جهت نویز و خطا در لبه‌یابی و یا تفاوت انحنای کانتورهای نظیر و نحوه شکستن آن به پاره‌خط‌ها می‌تواند رخ دهد که در نتیجه، نقاط ابتدایی و انتهایی، طول و نقطه وسط پاره‌خط‌های متناظر تفاوت اساسی دارند. حالت (ج-۱) به علت تفاوت زاویه دید و تفاوت انحنای کانتورهای نظیر می‌تواند رخ دهد که یک پاره‌خط در تصویر راست نظیر دو پاره‌خط در تصویر چپ است، حالت (د-۱) که مسأله آن مشابه حالت (ج-۱) است می‌تواند در نتیجه انعکاس و گسستگی در کانتور چپ پیش آید، حالت (ه-۱) می‌تواند برای دو پاره‌خط نظیر در اثر انسداد رخ دهد و حالت (و-۱) می‌تواند به دلیل حاشیه‌ای بودن پاره‌خط اتفاق افتاده باشد؛ که در نتیجه در تصویر چپ، بخش بیشتری از آن دیده می‌شود. شکل (ز-۱) در رابطه با کنتراست متوسط قابل توجه است. در این شکل پاره‌خط متناظر به صورت خط پر و یک کاندید فرضی با خط چین نشان داده شده است. بدیهی است که کنتراست متوسط تفکیک بین متناظر واقعی و کاندید فرضی قائل نمی‌شود و لاپلاسیان؛ که علامت کنتراست را تشخیص می‌دهد، به نویز حساس است [۱۲]. آنچه که به این حالت‌ها می‌بایست افزود این است که اختلاف زاویه پاره‌خط‌های متناظر می‌تواند تا ۱۸۰ درجه باشد.



شکل (۱): حالت‌های خاص و ممکن از پاره‌خط‌های متناظر، در تصاویر واقعی استریو

نتایج حسی ذهنی از مشاهده حالت‌های خاص مذکور این است که چنانچه بخواهیم تطابق‌های صحیح را در این موارد از

برای هر پاره‌خط در تصویر چپ، بهترین کاندید با استفاده از تابع معیار، انتخاب شده و متناظرها از لیست‌های تصاویر حذف می‌شوند. برای کاهش خطا، حد آستانه‌ای برای تابع معیار معین می‌شود. صرفنظر از ایرادهای وارده بر مولفه‌های تابع معیار، قوی گرفتن آستانه باعث کاهش تعداد تطابق و ضعیف گرفتن آن باعث تطابق‌های غلط می‌شود. همچنین حذف پاره‌خط‌های متناظر از لیست‌ها در صورت تطابق غلط، می‌تواند به تطابق‌های غلط بعدی و یا نیافتن متناظرهای بعدی منجر شود. همچنین چگونگی انتخاب وزن‌ها برای ترکیب مولفه‌های بردار ویژگی روش معینی ندارد. در [۱،۳] تابع معیار، ترکیب وزنی از اختلاف طول، اختلاف زاویه، اختلاف کنتراست متوسط و اختلاف مختصات نقطه وسط است. الگوریتم‌های [۸،۶] ترکیب وزنداری از معیارهای مرحله (۱) خود را استفاده می‌کنند.

گروه دوم [۹،۵] که مبتنی بر الگوریتم relaxation labeling هستند، برای انتخاب متناظرهای واقعی از شرط هموار بودن تغییرات اختلاف مکانی (disparity) پاره‌خط‌های موجود در یک همسایگی استفاده می‌کنند. تابع معیار مورد استفاده در این الگوریتم‌ها بیانگر این مطلب است که اختلاف مکانی پاره‌خط‌های کاندید تناظر، تا چه حد به اختلاف مکانی پاره‌خط‌ها در همسایگی آنها نزدیک است. این تابع به صورت تکراری برای جفت پاره‌خط‌های کاندید تناظر به روز می‌شود و اگر برای یک پاره‌خط چندین کاندید وجود داشته باشد، کاندیدی انتخاب می‌شود که کمترین مقدار تابع معیار را داشته باشد. گذشته از اینکه شرط هموار بودن اختلاف مکانی همیشه برقرار نیست، از آنجا که این الگوریتم‌ها به صورت تکراری عمل می‌کنند، برای آنها امکان بروز عدم همگرایی وجود دارد و نیز زمان اجرای آنها زیاد است [۵].

گروه سوم [۱۰،۷] از برنامه‌ریزی پویا^۲ استفاده می‌کنند. ابتدا یک گراف وزندار؛ که گره‌های آن پاره‌خط‌های کاندید تناظر و وزن گره‌ها با یک تابع معیار شباهت به دست آمده است، تشکیل می‌شود. با تعیین مسیر بهینه در طول این گراف، به روش برنامه‌ریزی پویا، متناظرهای نهایی تعیین می‌شوند. در [۱۰،۷] تابع معیار به صورت ترکیبی وزندار از مولفه‌های مورد استفاده در مرحله (۱) آنهاست. این الگوریتم‌ها، علاوه بر حجم محاسباتی بالا و دقت کم [۱۶] در خصوص قابل نقد بودن مولفه‌های تابع معیار با گروه اول مشابهند.

۳- فرض‌ها، قیدها و معیارهای تشابه در الگوریتم

پیشنهادی

در این بخش، ضمن ارائه نقدی بر برخی از اطلاعات رایج و

راست و به طول $d_{\max} - d_{\min} + \text{Length}(line)$ خواهد بود. با توجه به خطای کوانتیزه کردن تصویر و خطای مربوط به استخراج پاره‌خط‌ها و به منظور از دست ندادن کاندیداهای احتمالی و سهولت جستجو، تمهیدی که در این الگوریتم بکار رفته این است که اولاً، محدوده جستجو به جای متوازی‌الاضلاع، به صورت مستطیل اختیار می‌شود و ثانیاً، یک حداقل حاشیه اطمینانی به دو طرف ناحیه جستجو اضافه می‌شود که در شکل (۲) برای پاره‌خط l_{12} نشان داده شده است.

ب) هم‌پوشانی نرمالیزه شده طول‌های پاره‌خط‌ها همان طور که از حالت‌های خاص در شکل (۱) می‌توان نتیجه گرفت، طول پاره‌خط‌ها و نقطه وسط آنها معیار مناسبی برای هیچ یک از دو مرحله تطابق نیست ولیکن هم‌پوشانی به عنوان شرط لازم، معیار مناسبی برای مرحله (۱) از تطابق است؛ لذا تعریف جدیدی با نام هم‌پوشانی نرمالیزه شده (LNO) مطابق با رابطه (۱) ارائه، ارزیابی و استفاده شده است. در این رابطه، l_1 پاره‌خط تصویر چپ، l_r پاره‌خط تصویر راست و $\text{Length}(\text{overlap}(l_r))$ فصل مشترک l_r با محدوده مکان کاندیداهای پاره‌خط l_1 است.

$$LNO(l_1, l_r) = \frac{\text{Length}(\text{overlap}(l_r))}{\min(\text{Length}(l_1), \text{Length}(l_r))} \quad (1)$$

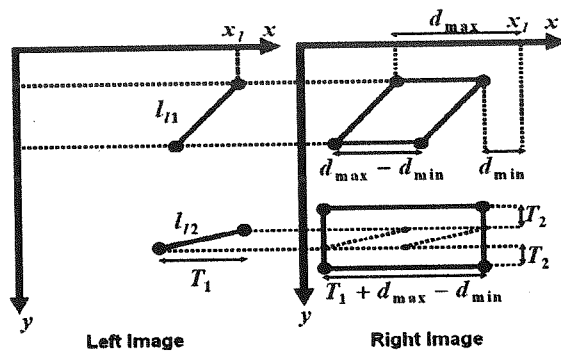
شرط هم‌پوشانی نرمالیزه، به طور حسی و ذهنی، این واقعیت را بیان می‌کند که میزان هم‌پوشانی یا $\text{Length}(\text{overlap}(l_r))$ باید درصد مناسبی از طول پاره‌خط مرجع (l_1) و یا کاندیدای آن (l_r) باشد، در غیر این صورت فرض بر این است که متناظر بهتری برای هر یک از آنها وجود دارد.

در الگوریتم پیشنهادی این مقاله، حداقل هم‌پوشانی نرمالیزه ۵۰٪ اختیار شده است. برای این معیار، ارزیابی آماری با استفاده از ۶ دنباله تصویر از صحنه‌های مختلف و تحت شرایط نوری متفاوت صورت پذیرفته و نشان داده شده است که از تعداد ۱۱۰۵ جفت پاره‌خط متناظر در این تصاویر، فقط ۷ جفت پاره‌خط متناظر (یعنی کمتر از ۱٪ آنها) شرط فوق را ارضا نمی‌کنند و در نتیجه از لیست کاندیداهای حذف می‌شوند. همچنین با توجه به شکل (۱) بدیهی است که این شرط بسیار کمتر از شرط نقطه‌وسط و معیار طول پاره‌خط‌ها (با فرمول‌های مختلف آن) باعث حذف متناظرهای واقعی از مجموعه کاندیداهای می‌شود. همچنین در بررسی آماری فوق، کارایی این معیار در مرحله (۱) تطابق، با حذف بیش از ۲۵٪ از کاندیداهای اضافی نشان داده شده است.

دست ندهیم باید فرض تناظر یک به یک را کنار بگذاریم و در مورد استفاده از معیارهای مبتنی بر طول، نقاط خاص (وسط، ابتدا، انتها)، هم‌پوشانی، زاویه و کنتراست متوسط محتاط باشیم. به طور خلاصه، اطلاعات مورد استفاده در مرحله (۱) تطابق باید به گونه‌ای انتخاب شوند که ضمن توانایی در حذف کاندیداهای اضافی، متناظرهای از انواع خاص را حذف نکنند. همچنین تابع معیار مورد استفاده در مرحله (۲) باید به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن داشتن احتمال بسیار کم در تطابق غلط، متناظرهای از انواع خاص را از بین کاندیداهای انتخاب کند. نقد و بررسی تحلیلی و آماری بیشتر در این زمینه خارج از بحث اصلی این مقاله است. با توجه به این نتایج کلی و ذکر این نکته که حالت‌های نشان داده شده در شکل (۱)، در تصاویر واقعی از صحنه‌های داخلی نادر نیستند، به تعریف اطلاعات مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم:

الف) قید محدوده مکان کاندیداهای تناظر

از این اطلاعات در مرحله اول تطابق استفاده می‌شود. برای تعیین محدوده مکان کاندیداهای d_{\max} و d_{\min} که اندازه اختلاف مکانی مربوط به حداکثر و حداقل عمق دید؛ یعنی z_{\max} و z_{\min} هستند، بر حسب فاصله کانونی f و از رابطه $d = B \frac{f}{z}$ محاسبه می‌شوند. در این رابطه، B فاصله مراکز دو دوربین استریو است. با توجه به محدودیت epipolar، محدوده مکان کاندیداهای تناظر برای هر پاره‌خط دلخواه l_{11} در تصویر چپ، متوازی‌الاضلاعی در تصویر راست خواهد بود که مکان آن در شکل (۲) نشان داده شده است. البته استفاده از این قید مکانی، روشی رایج و متداول است.



شکل (۲): چگونگی تعیین محدوده مکان کاندیداهای

به نکته‌ای که در الگوریتم این مقاله و در خصوص محدوده مکان کاندیداهای توجه می‌شود، به پاره‌خط‌های تقریباً افقی مربوط است. حد محدوده مکان کاندیداهای برای پاره‌خط‌های تقریباً افقی، به جای متوازی‌الاضلاع، پاره‌خطی در تصویر

ج) اختلاف زاویه پاره‌خط‌های متناظر در تصاویر چپ و راست

اختلاف زاویه کم، به عنوان معیار تشابه [۴] گذاشتن آستانه برای مقدار اختلاف زاویه به منظور کاهش کاندیداها (۳۰ درجه [۶]) و یا استفاده از آن در تابع معیار تشابه [۲،۱] متداول است. اختلاف زاویه پاره‌خط‌های متناظر در حالت کلی می‌تواند تا ۱۸۰ درجه باشد. در مرجع [۲] با محاسبه تابع چگالی احتمال اختلاف زاویه برای پاره‌خط‌های متناظر، نشان داده شده است که احتمال اختلاف زاویه‌های بزرگ کم است. به عنوان نمونه، احتمال داشتن اختلاف زاویه بیش از ۴۰ درجه برای پاره‌خط‌های متناظر، برای دوربین استریوی این مقاله و حداقل فاصله دید ۱۰۰ سانتیمتر، کمتر از ۱٪ است. همچنین در [۲] نشان داده شده است که برای خطوط موازی و عمود بر سطح زمین؛ که در فضاهای داخلی اغلب خطوط از این دست هستند، حداکثر اختلاف زاویه ممکن برای پاره‌خط‌های متناظر، تابعی از زاویه tilt دوربین است و به ازای ۱۳۵ درجه زاویه tilt، حد بالا و قطعی اختلاف زاویه، ۲۳ درجه می‌باشد.

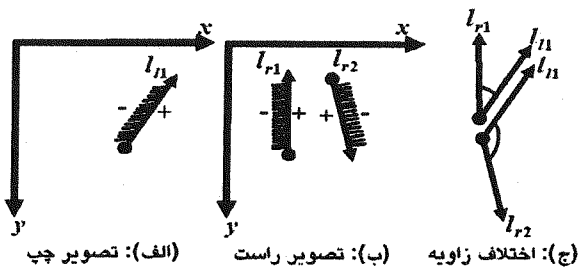
در الگوریتم پیشنهادی و در مرحله (۱) از تطابق، از این معیار استفاده می‌شود. تعریف مورد استفاده برای اختلاف زاویه، زاویه کوچک‌تر بین امتدادهای دو پاره‌خط فرض شده است.

د) اعمال جهت کنتراست بر زاویه پاره‌خط‌ها

معیار موثر و جدیدی که در الگوریتم پیشنهادی تعریف و استفاده شده است، جهت کنتراست می‌باشد. بدیهی است که پاره‌خط‌ها به دلیل تفاوت کنتراست در دو طرف آنها به وجود آمده‌اند و انتظار می‌رود جهت حرکت از کنتراست کم به طرف کنتراست بیشتر در دو پاره‌خط متناظر مشابه باشد. برای توضیح بیشتر، شکل (۳) را در نظر بگیرید. برای پاره‌خط l_{11} در تصویر چپ، کنتراست متوسط در حاشیه چپ پاره‌خط نسبت به کنتراست متوسط در حاشیه راست کمتر است که با علامت‌های '+' و '-' این امر نشان داده شده است. همین قرارداد برای پاره‌خط‌های l_{r1} و l_{r2} در تصویر راست نیز استفاده شده است. با فرض اینکه l_{r1} و l_{r2} هر دو در محدوده جستجوی l_{11} بوده و شرط‌های هم‌پوشانی و اختلاف زاویه را نیز داشته باشند، بدیهی است که l_{r2} به علت جهت کنتراست کاندید تناظر نیست.

به منظور اعمال اثر این معیار، پاره‌خط‌ها جهت‌دار گرفته می‌شوند و قاعده جدیدی برای تعیین اختلاف زاویه تعریف می‌شود. قرارداد جهت‌گذاری پاره‌خط‌ها از این قرار است که برای پاره‌خط‌های غیرافقی، اگر کنتراست متوسط طرف چپ نسبت به طرف راست کمتر باشد، جهت پاره‌خط رو به بالا و در

غیراین صورت رو به پایین خواهد بود و برای پاره‌خط‌های افقی، اگر کنتراست متوسط طرف بالا کمتر باشد، جهت پاره‌خط به طرف راست و در غیراین صورت به طرف چپ می‌باشد. این قرارداد برای پاره‌خط‌های شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. قاعده تعیین اختلاف زاویه نیز با نمایش اختلاف زاویه (l_{11}, l_{r1}) و (l_{11}, l_{r2}) در شکل (۳-ج) و با توجه به جهت پاره‌خط‌ها نشان داده شده است. بدین ترتیب و در عمل، با جهت‌دار کردن پاره‌خط‌ها و تعریف جدید برای اختلاف زاویه، معیار جهت کنتراست در اختلاف زاویه، مستتر می‌شود.



شکل (۳): زاویه پاره‌خط‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات کنتراست

ه) اندازه فاصله کنتراست‌های دوطرفه دو پاره‌خط

این معیار نیز، معیار جدیدی است که نقش بسیار موثری در موفقیت الگوریتم پیشنهادی دارد و در مرحله دوم از تطابق بکار می‌رود. برای تعریف این معیار، فرض کنید که کنتراست متوسط در حاشیه چپ (یا بالای) پاره‌خط l با $C_{LU}(l)$ و برای حاشیه راست (یا پایین) آن با $C_{RD}(l)$ نشان داده شود. در این صورت جفت عدد $(C_{LU}(l), C_{RD}(l))$ نقطه‌ای در صفحه کنتراست دو طرفه خطوط و نماینده پاره‌خط l می‌باشد. معیار تشابه دو پاره‌خط l_1 و l_r با $TSCD^\circ$ مطابق رابطه (۲) و به صورت مجذور فاصله نقاط نماینده آنها در صفحه کنتراست دو طرفه، بیان می‌شود و هر چه فاصله کمتر باشد، دو پاره‌خط از نظر کنتراست شبیه‌تر هستند. منظور از کنتراست متوسط در یک حاشیه، متوسط کنتراست پیکسل‌ها در آن حاشیه است. برای کنتراست یک پیکسل، پنجره‌ای حول آن پیکسل در نظر گرفته می‌شود و متوسط قدرمطلق تفاضل شدت روشنایی پیکسل‌های این پنجره با متوسط شدت روشنایی پنجره محاسبه می‌شود.

$$TSCD(l_1, l_r) = [C_{LU}(l_1) - C_{LU}(l_r)]^2 + [C_{RD}(l_1) - C_{RD}(l_r)]^2 \quad (2)$$

استفاده از متوسط کنتراست در طول پاره‌خط‌ها [۵] و استفاده از تفاضل کنتراست متوسط [۲،۱] در منابع تحقیقاتی مشاهده می‌شود و لیکن هیچیک تشابه و نزدیکی دو پاره‌خط را

و ثابت شده است که برای کاربردهای تعیین ساختار با استفاده از پاره‌خط‌ها، روش لبه‌یابی کنی (Canny) بهترین عملکرد را دارد. در مرحله بعدی، پیکسل‌های حاصل از اعمال الگوریتم کنی، به طریق مناسب به هم وصل شده و خطوط مرزی را تشکیل می‌دهند. این کار با جمع کردن نقاط دارای اتصال ۸ تایی (eight connected) در یک لیست، صورت می‌گیرد. در نهایت، هر کدام از لیست‌های نقاط متصل، به تعدادی پاره‌خط مستقیم شکسته می‌شوند. برای انجام این کار از الگوریتم Divide-and-Conquer [۱۲] استفاده شده است.

۴-۱- مرحله اول: تشکیل جدول اولیه کاندیداهای تناظر

در این مرحله، با استفاده از اطلاعات (الف) الی (د)، یعنی محدوده مکان، هم‌پوشانی نرمالیزه، زاویه و جهت کنتراست، ماتریس کاندیداهای تناظر تشکیل می‌شود. سطرها و ستون‌ها به ترتیب نماینده پاره‌خط‌های تصاویر چپ و راست هستند. "۱" و "۰" در هر خانه ماتریس به ترتیب نمایشگر ارضا و عدم ارضای شرط‌های مبتنی بر اطلاعات (الف) الی (د)، برای سطر و ستون مربوطه هستند. نمونه‌ای از ماتریس کاندیداهای تناظر برای پاره‌خط‌های تصاویر چپ و راست در جدول (۱) آمده است.

۴-۲- مرحله دوم: انتخاب از بین کاندیداهای رفع ابهام

برای تعیین پاره‌خط‌های متناظر سه حالت مختلف برای سطرها و ستون‌ها تشخیص داده شده و در مورد هر یک به تناسب تصمیم‌گیری می‌شود.

حالت یک به یک

اگر سطر i ام از جدول کاندیداهای فقط در ستون z ام یک داشته باشد و سایر نقاط سطر و ستون i و z صفر باشند، مشمول این حالت است و پاره‌خط‌های مربوطه به عنوان متناظر قطعی منظور می‌شوند.

حالت یک به چند

اگر در سطر i ام و ستون‌های j_1, \dots, j_k ($k > 1$) از جدول کاندیداهای ۱ داشته باشیم و سایر نقاط در این سطر و ستون‌ها صفر باشند حالت یک به چند خواهیم داشت؛ یعنی برای یک پاره‌خط، چندین کاندید انحصاری 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_1 به عنوان 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.

از نظر کنتراست با کارایی این معیار نشان نمی‌دهند. برای ارزیابی کارایی این معیار، ۶ دنباله تصویر از صحنه‌های مختلف و تحت شرایط نوری متفاوت مشتمل بر مجموع ۱۰۱۰ پاره‌خط بررسی شده است. برای هر پاره‌خط این معیار برای تمام کاندیداهای در محدوده مکان محاسبه شده و در ۹۹۱ مورد؛ یعنی بیش از ۹۸٪، متناظر واقعی حداقل فاصله کنتراست را در بین کاندیداهای داشته است. نکته عملی دیگری که قابل ذکر است این است که این معیار برای طول کامل پاره‌خط‌ها محاسبه نمی‌شود؛ بلکه در بخشی از پاره‌خط‌ها؛ که نسبت به یکدیگر هم‌پوشانی دارند، محاسبه می‌شود.

(و) قید ترتیب

استفاده از قید ترتیب برای پاره‌خط‌ها و نحوه استفاده از آن، از نوآوری‌های این مقاله است. ایده استفاده از قید ترتیب برای نقاط؛ یعنی فرض یکسان بودن ترتیب نقاط تصویر چپ و ترتیب نقاط متناظر آنها در تصویر راست؛ که بر روی یک خط epipolar واقعند، (اگر چه در مواردی که گرادیان اختلاف مکانی بیش از ۲ است این شرط نقض می‌شود)، قیدی رایج در منابع تحقیقاتی است. تعمیم این ایده برای پاره‌خط‌ها؛ یعنی یکسان بودن توزیع پاره‌خط‌ها و پاره‌خط‌های متناظر آنها در صفحه تصویر (از نظر واقع شدن در بالا، پایین، چپ یا راست نسبت به یکدیگر) در این مقاله استفاده شده است. توضیحات بیشتر در مورد نحوه استفاده از این اطلاعات به دلیل وابستگی آن به الگوریتم تطابق در بخش (۴) و به همراه مثال ارائه می‌شود.

(ز) فرض متناظر بودن یک پاره‌خط با چند پاره‌خط

هم‌راستا

در الگوریتم جدید، امکان تناظر یک به چند پذیرفته می‌شود؛ و در مرحله دوم تطابق، پس از آنکه برای یک پاره‌خط، بهترین کاندید به عنوان متناظر انتخاب شد، کاندیداهای دیگری که با این متناظر هم‌راستا می‌باشند نیز متناظر همان پاره‌خط فرض می‌شوند. در واقع فرض بر این است که پاره‌خط متناظر به دلایل مختلف به چند پاره‌خط تقسیم شده است.

۴-۳- الگوریتم تطابق پاره‌خط‌ها

الگوریتم پیشنهادی نیز تطابق را در دو مرحله انجام می‌دهد. پیش از بیان مراحل تطابق اشاره‌ای به نحوه استخراج پاره‌خط‌ها از تصاویر خواهیم داشت؛ زیرا اگرچه موضوع استخراج پاره‌خط‌ها مورد بحث و ارزیابی این مقاله نیست و لیکن کیفیت آن بر موفقیت تطابق بی‌تاثیر نیست.

برای استخراج پاره‌خط‌ها ابتدا پیکسل‌هایی که جزو نقاط لبه محسوب می‌شوند با استفاده از یک روش لبه‌یابی استخراج می‌شوند. در مرجع [۱۲] انواع روش‌های لبه‌یابی ارزیابی شده

مشکل اصلی در تطابق، به این حالت مربوط است که معمولاً برای پیدا کردن بهترین مجموعه متناظر، از روش های برنامه ریزی پویا و یا relaxation labeling استفاده می شود. این مسأله در الگوریتم پیشنهادی ما، طی سه گام حل می شود:

گام اول، تشکیل زیرجدول مستقل:

با حذف سطر و ستون های مربوط به حالت های یک به یک و یک به چند، مابقی جدول می تواند به زیرجدول مستقل تقسیم شود. تعداد سطر و ستون در هر زیرجدول حداقل ۲ است. برای تشکیل هر زیرجدول می توان از سطرها و یا ستون های باقیمانده استفاده کرد. به عنوان مثال، برای تشکیل یک زیرجدول، اگر سطر i ام در ستون های j_1, \dots, j_k ($k \geq 1$) یک داشته باشد، زیرجدول با این سطر و ستون ها آغاز می شود. سپس سطرهای دیگری که در حداقل یکی از ستون های j_1, \dots, j_k یک دارند، به مجموعه سطرهای زیرجدول اضافه می شوند. به دنبال آن، تمام ستون های دیگری که در سطرهای جدید، یک دارند به مجموعه ستون ها اضافه می شوند و این کار ادامه می یابد تا سطر و ستونی به زیرجدول اضافه نشود. زیرجدول مستقل، به پاره خط های موجود در ناحیه های تصاویر مربوط است که به علت اشتراک در کاندیدها، مشکل انتخاب بهینه دارند. بدیهی است که پاره خط های زیرجدول مستقل، کاندید مشترک ندارند.

گام دوم، مرتب کردن زیرجدول:

از اطلاعات ترتیب در این گام استفاده می شود. در هر زیرجدول، سطرها و ستون ها؛ که به ترتیب نماینده پاره خط ها در تصاویر چپ و راست هستند، هر کدام جداگانه برحسب موقعیت مکانی آنها، از گوشه سمت چپ و پایین تصویر تا گوشه سمت راست و بالای تصویر، مرتب می شوند. برای روشن شدن مطلب، جدول (۱) و شکل (۴) را در نظر می گیریم. جدول (۱) زیرجدول مرتب شده برای یک جفت تصویر استریو است که در شکل (۴-الف) و (۴-ب) پاره خط ها و موقعیت مکانی آنها در تصاویر چپ و راست نشان داده شده است. ترتیب سطرها در زیرجدول (۵۷، ۴۵، ۴۶، ۵۱، ۲۶، ۵۵، ۵۰، ۵۴ و ۵۳) همانند ترتیب مکانی پاره خط ها در شکل (۴-الف) یعنی از گوشه سمت چپ و پایین به گوشه سمت راست و بالاست. همین ترتیب برای ستون های (۴۸، ۷۵، ۵۶، ۴۳، ۶۰، ۵۴، ۵۷، ۲۶، ۵۹ و ۴۹) و شکل (۴-ب) برقرار است.

اطلاعات ترتیب حاکی از این واقعیت است که ترتیب مکانی پاره خط ها در دو تصویر مشابه است و این امر قیدی را برای یک های انتخاب شده در زیرجدول مرتب شده، تحمیل می کند. قید تحمیل شده این است که یک های انتخاب شده در سطرها و

ستون ها، نمی توانند هر زیرمجموعه دلخواهی از یک ها باشند. اگر زیرجدول شامل M سطر و N ستون باشد، با شروع از سطر و ستون (۱،۱) تا (M, N) ، اندیس سطر و ستون یک های انتخاب شده، از یک انتخاب به انتخاب بعدی نمی تواند کاهشی باشد و می بایست اندیس سطر یا ستون یا هر دو حداقل به میزان یک افزایش یابند.

گام سوم، انتخاب مسیر بهینه در زیرجدول مرتب شده:

همان طور که بیان شد، قید ترتیب در زیرجدول مرتب شده، قیدی را بر مسیری که یک های قابل انتخاب بر آن واقعند، تحمیل می کند؛ اما مسیری که یک های قابل انتخاب بر آن واقعند و قید ترتیب را ارضا می کنند، منحصر به فرد نیست و لذا انتخاب مسیر بهینه بر اساس معیار تشابه (ه) یعنی اندازه فاصله کنتراست های دوطرفه، صورت می پذیرد. برای انتخاب مسیر بهینه ابتدا نقاط شاخص تعیین می شوند. نقاط شاخص، یک هایی هستند که در سطر و ستون مربوطه حداقل $TSCD$ را دارند. این نقاط نیز در حالت کلی در جدول پراکنده هستند و مجموعه آنها الزاماً شرط مسیر را ارضا نمی کند. بنابراین زیرمجموعه ای از آنها، با حداکثر تعداد نقاط شاخص؛ که شرط مسیر را ارضا کند، تعیین می شود. در صورت وجود چند مسیر بهینه، آنکه $\sum TSCD$ کمتری را داشته باشد انتخاب می شود و در صورت تعدد جواب، یکی از آن زیرمجموعه ها به دلخواه و به طور قطعی انتخاب می شود. در جدول (۱) آن دسته از یک ها که بر این اساس انتخاب شده اند با علامت دایره پر نشان داده شده اند. این نقاط شاخص زیرجدول را به جدول کوچک تری تجزیه می کنند که مستطیل های مربوطه در جدول (۱) نشان دهنده این زیر-زیرجدول هستند. سایر نقاط مسیر در این مستطیل ها واقع هستند. در هر مستطیل یک های هم راستا با نقاط شاخص در سطر و ستون مربوطه نیز به عنوان متناظر انتخاب می شوند که با دایره خط چین نشان داده شده اند و نیز نقاط یک غیر هم راستا در سطر و ستون یک های شاخص حذف می شوند؛ یعنی به صفر تغییر می یابند، که با * در جدول مشخص شده اند. برای یک های باقیمانده در هر زیر-زیرجدول، مراحل انتخاب مسیر بهینه تکرار می شود. پیچیدگی مسیریابی در بدترین حالت از مرتبه $O(N^3)$ است که N تعداد پاره خط ها در تصویر چپ است و بررسی جزئیات آن در این مقاله نمی گنجد. قابل ذکر است که شکل (۴-ج) به عنوان نمونه، موفقیت روش را در تطابق نشان می دهد که در آن پاره خط های تصویر راست؛ که با تصویر چپ تطابق یافته اند، برچسب آن را گرفته اند. همان طور که ملاحظه می شود، طول های متفاوت، نقطه وسط متفاوت و یک به چند بودن تناظر مانع از تطابق های

صحيح نشده است. شكل (۴-ج) به يكي از زيرجداول تصوير شكل (۵) مربوط است كه تطابق براي كل تصوير، در بخش (۵) ارزيابي خواهد شد.

جدول (۱): زيرجدول تشكيل شده براي يكسري از پاره‌خط‌هاي تصاوير چپ و راست با نحوه انتخاب نقاط بهينه.

	48	75	56	43	60	54	57	36	59	55	49
57	1*	1*	1*	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	1*	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
51	1*	0	1*	1*	1*	1*	1*	1	1	1	1
36	0	0	1*	0	0	0	1*	0	0	0	0
55	0	0	1	0	0	0	1*	0	0	0	0
50	0	0	0	1	1	0	0	1*	1*	0	0
54	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1*	0
53	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1*

بخش، ضمن معرفي بستر آزمايشگاهي، الگوريتم مورد مقايسه معرفي مي‌شود و عملکرد هر دو الگوريتم بر روي سه تصوير متفاوت ارائه و مقايسه مي‌شوند.

۵-۱- بستر آزمايشگاهي

تصاوير مورد استفاده در اين تحقيق با دوربين استريوي MEGA-D [۱۴] كه بر روي ربات سيار PeopleBot [۱۵] در ارتفاع ۱/۲ متر و با زاويه $tilt = 135^\circ$ نصب و كالبره شده، تهيه شده است. ابعاد CCDهاي دوربين $9/6 \times 7/6$ ميليتر است كه در بالاترين رزولوشن، تصويري با 960×1280 پيكسل در اختيار مي‌گذارد. تصوير، به وسيله نرم‌افزار همراه دوربين، پس از يك مرحله کاهش نمونه‌ها و سپس متوسط‌گيري؛ يعني تبديل ۴ پيكسل به ۱ پيكسل، به تصوير 240×320 تبديل مي‌شود. فاصله كانوني عدسي دوربين‌ها $7/5$ ميليتر و فاصله مراکز دو دوربين از هم ۹ سانتيمتر است. نصب دوربين بر روي ربات امکان تصويربرداري از صحنه‌هاي مختلف داخلي را تسهيل کرده است. تصاوير مورد استفاده به صحنه‌هايي از آزمايشگاه تعلق دارند.

۵-۲- معرفي الگوريتم مورد مقايسه با الگوريتم جديد

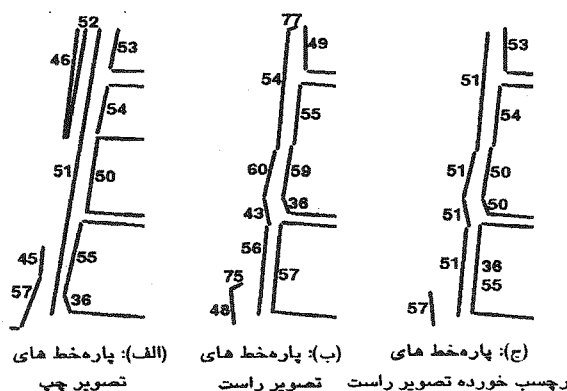
الگوريتمي كه با الگوريتم جديد مقايسه مي‌شود، در مرجع [۱] مطرح و استفاده شده است. اين الگوريتم در بخش استخراج پاره‌خط‌ها با الگوريتم جديد يکسان است. در الگوريتم [۱]، پس از محاسبه بردار ويژگي براي هر پاره‌خط، متشكل از طول، زاويه، مختصات نقطه وسط و كنتراست متوسط در امتداد پاره‌خط، بخش تطابق در دو مرحله و به شرح زير انجام مي‌شود:

مرحله (۱)- تشكيل جدول اوليه كانديداهاي تناظر

در اين مرحله، محدوده مكان نقطه وسط براي كانديداهاي هر پاره‌خط در تصوير چپ، با توجه به حداكثر اختلاف مكاني d_{max} كه از حداقل عمق z_{min} به دست مي‌آيد و نيز محدوديت epipolar مشخص شده و جدول اوليه كانديداها تشكيل مي‌شود.

مرحله (۲)- انتخاب از بين كانديداهاي تناظر

پس از تعيين كانديداهاي هر پاره‌خط در تصوير چپ، فاصله پاره‌خط تا هر کدام از كانديداها با توجه به رابطه (۲) به دست مي‌آيد و سپس كوچك ترين فاصله پيدا مي‌شود. اگر اين فاصله از يك حد آستانه كوچك تر باشد اين تطابق پذيرفته مي‌شود و اين دو پاره‌خط برچسب مي‌خورند و در مراحل بعدي شركت نمي‌کنند.



شكل (۲): پاره‌خط‌هاي تصاوير چپ و راست جدول (۱) و تطابق آنها

۵- ارزيابي الگوريتم جديد

از آنجا كه بانك اطلاعاتي استاندارد از تصاوير صحنه‌هاي داخلي، براي ارزيابي و مقايسه الگوريتم‌هاي تطابق پاره‌خط‌ها در دست نيست، در اين تحقيق، مجموعه‌اي از تصاوير استريوي، از صحنه‌هاي متنوع داخلي با ساختارهاي متفاوت خطوط مرزي، تحت شرايط مختلف نوري و فواصل متفاوت تهيه شده و براي ارزيابي استفاده شده‌اند. بديهي است كه اطلاعات و آماری كه در اين بخش، از صحت و سقم عملکرد الگوريتم بر روي تصاوير نمونه ارائه شده است، بر تطابق چشمي و دقيق تمام پاره‌خط‌ها در تصاوير متكي است. همچنين در حمايت از مفروضات، معيارها و روند استفاده از اطلاعات در الگوريتم جديد، عملکرد آن با الگوريتمي مبتني بر تابع معيار وزني از مولفه‌هاي بردار ويژگي، مقايسه مي‌شود؛ لذا در اين

$$D(l_i, l_j) = w_l \left(\frac{L_i - L_j}{L_i} \right)^2 + w_m (My_i - My_j)^2 + w_c (C_i - C_j)^2 + w_\theta (\theta_i - \theta_j)^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، l_j, l_i دو پاره‌خطی هستند که می‌خواهیم فاصله (عدم تشابه) آنها؛ یعنی $D(l_i, l_j)$ را بر حسب مولفه‌های بردارهای ویژگی آنها پیدا کنیم و C, My, θ, L به ترتیب بیانگر طول، زاویه، مختصات افقی مرکز پاره‌خط و کنتراست متوسط هر پاره‌خط هستند. ضرایب w وزن فاصله هر کدام از مولفه‌ها را نشان می‌دهند. از آنجا که روشی کلی برای تعیین وزن‌ها و حدآستانه وجود ندارد، با روش سعی و خطا و با نظارت نزدیک بر عملکرد الگوریتم در مورد تصاویر این مقاله، تلاش در به دست آوردن بهترین پاسخ صورت پذیرفته است.

۳-۵- نتایج ارزیابی الگوریتم‌ها

عملکرد الگوریتم جدید و الگوریتم [۱]، برای سه صحنه مختلف، در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده است. در هر یک از این شکل‌ها، بخش‌های (الف) و (ب)، جفت تصویر استریو را نشان می‌دهند. بخش‌های (ج) و (د) از شکل‌ها، پاره‌خط‌های استخراج شده برای تصاویر چپ و راست هستند. بخش‌های (ه) و (و) در شکل‌ها، به ترتیب عملکرد الگوریتم جدید و الگوریتم [۱] را در تطابق نشان می‌دهند. بخش‌های (ه) و (و) زیرمجموعه‌ای از پاره‌خط‌های تصویر راست هستند که متناظر آنها در تصویر چپ پیدا شده و بنابراین برچسب پاره‌خط نظیر را گرفته‌اند. شماره‌گذاری پاره‌خط‌ها به عنوان نمونه در شکل (۵) انجام شده است و برای رعایت خوانایی شکل‌ها در اشل ارائه شده، شماره‌گذاری در شکل‌های (۶) و (۷) صورت نگرفته است. به منظور 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 سه تصویر، جدول پاره‌خط‌های متناظر از طریق چشمی و با دقت استخراج شده و در دست می‌باشد، اطلاعات دقیق‌تری از عملکرد الگوریتم‌ها که در شکل‌ها قابل نمایش و ارائه نیست در جدول (۲) آمده است.

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، تمام پاره‌خط‌های تصویر راست در تصویر چپ متناظر ندارند. از آنجا که هر دو الگوریتم در مورد تصاویر سه‌گانه، تطابق غلط نداشته‌اند؛ یعنی تعداد و درصد تطابق غلط صفر بوده، آمار آن در جدول نشان داده نشده است. میزان موفقیت الگوریتم پیشنهادی با اطلاعات جدول مشخص بوده و نیازی به توضیح

ندارد.

بدیهی است که فرض‌ها، قیدها و معیارهای رایج و پیشنهادی در مورد پاره‌خط‌های متناظر، قطعیت کامل ندارند و این عدم قطعیت در مرحله اول الگوریتم باعث ریزش متناظرهای واقعی و در نتیجه عدم موفقیت در یافتن متناظرها و در مرحله دوم می‌تواند باعث ریزش و یا خطا در تطابق شود. در مثال‌های جدول (۲)، همان‌طور که ذکر شد، خطایی رخ نداده است؛ ولی عدم موفقیت الگوریتم جدید در تطابق ۱۲ پاره‌خط از مجموع ۲۹۷ پاره‌خط در سه تصویر، بررسی و دنبال شده است و دلیل عدم موفقیت آنها در یافتن متناظرها از این قرار بوده است: ۲ عدد به این دلیل که شرط کنتراست برای آنها برقرار نبوده است، ۲ عدد به دلیل نداشتن شرط همپوشانی نرمالیزه تطابق نیافته‌اند و بالاخره ۸ عدد از این پاره‌خط‌ها به دلیل خطا در مرتب کردن پاره‌خط‌ها تطابق داده نشده‌اند. ذکر این نکته لازم است که خطای مرتب کردن، در ۴ زیرجدول از مجموع ۵۸ زیرجدول رخ داده است و دلیل آن نیز این است که حتی به صورت چشمی در موارد خاص تعیین ترتیب مشکل است.

علل عدم موفقیت الگوریتم [۱] به صورت تفکیکی قابل تعیین نیست، ولی به طور کلی، دلایل اصلی آن عدم امکان انتخاب وزن و حدآستانه مطمئن، قائل شدن تناظر یک به یک، مناسب نبودن طول، مختصات نقطه وسط و کنتراست متوسط در بسیاری از حالت‌ها می‌باشد که به ۴۱٪ عدم موفقیت منجر شده است.

به منظور ارزیابی نقش مولفه‌های مختلف الگوریتم پیشنهادی؛ یعنی روش تعیین محدوده مکان، حذف آستانه، اعمال قیود ترتیب و هم‌راستایی در مرحله (۲)، و اعمال سایر قیود پیشنهادی برای مرحله (۱)، آزمایش‌هایی با اعمال این قیود بر الگوریتم [۱] صورت پذیرفته است که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج ارائه شده بر اساس مجموع ۲۹۷ جفت پاره‌خط متناظر در تصاویر شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) است که جدول تطابق آنها در دست است. در حالت‌های "الف" الی "د" تعیین محدوده مکان بر اساس تعیین محدوده مکان نقطه وسط و در حالت‌های "ه" الی "ح" تعیین محدوده مکان بر اساس روش پیشنهادی در این مقاله است. نتایج مندرج در جدول نشان می‌دهد که عملکرد قیود پیشنهادی مطابق انتظار است؛ یعنی حذف آستانه ضمن افزایش تطابق صحیح، باعث افزایش تطابق‌های غلط می‌شود ("الف" با "ب" یا "ه" با "و"). اعمال قیود ترتیب و هم‌راستایی ضمن افزایش تطابق‌های صحیح، درصد تطابق‌های غلط را کاهش می‌دهد ("ب" با "ج" یا "و" با "ز"). اعمال سایر قیود پیشنهادی برای مرحله (۱)، باعث بهبود عملکرد می‌شود ("ج" با "د" یا "ز" با "ح"). تعیین محدوده مکان

بر اساس نقطه وسط باعث ریزش متناظرهای واقعی می‌شود ("الف" الی "د" با "ه" الی "ح"). و بالاخره نقش تابع معیار پیشنهادی با مقایسه حالت "ح" و "ط" مشهود است، حالت "ح" و "ط" فقط در تابع معیار متفاوتند.

نتایج مندرج در جدول (۳)، نقش موثر مولفه‌های مختلف الگوریتم جدید را در جلوگیری از ریزش متناظرهای واقعی و کاهش تطابق‌های غلط، با اعمال بر روی الگوریتم [۱] نشان می‌دهد. در عین حال، چون پیچیدگی محاسباتی الگوریتم [۱] از مرتبه $O(N^2)$ است که N تعداد پاره‌خط‌های تصویر چپ است و پیچیدگی محاسباتی الگوریتم پیشنهادی در بدترین حالت از مرتبه $O(N^3)$ است، شاید این ابهام پیش آید که علت عملکرد بهتر الگوریتم جدید، صرفاً افزایش قیود و صرف زمان بیشتر است. برای رفع این ابهام، جدول (۴) سرعت و عملکرد الگوریتم جدید را در مقایسه با الگوریتم مرجع [۱۰] که پیچیدگی محاسباتی مشابهی دارد، نشان می‌دهد. الگوریتم [۱۰]، در مرحله اول از قیود محدوده مکان، زاویه، طول و هم‌پوشانی و در مرحله دوم برای پاره‌خط‌های غیرافقی، از روش برنامه‌ریزی پویا و تابع معیاری وزنی بر حسب مولفه‌های مرحله اول استفاده می‌کند. برای این پاره‌خط‌ها، جدول (۴) نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با سرعتی حدود ۱۰ برابر عملکردی به مراتب بهتر دارد.

۶- جمع‌بندی نتایج

در این مقاله، الگوریتمی جدید و کارا، برای تطابق پاره‌خط‌ها در تصاویر استریو ارائه شده است. جدید بودن آن به دلیل استفاده منطقی و بجا از اطلاعات نوری، هندسی و ساختاری و کارایی آن به معنی افزایش تطابق‌های صحیح، ضمن پیشگیری از تطابق‌های غلط است.

در رسیدن به این الگوریتم علل حذف تطابق‌های صحیح و وجود تطابق‌های غلط برای برخی از الگوریتم‌های پیشین، از نزدیک و بر روی تصاویر واقعی از صحنه‌های داخلی، بررسی شده است. نتیجه این بررسی این است که فرض تناظر

یک به یک و استفاده از معیارهایی همچون نزدیک بودن طول پاره‌خط‌ها، نزدیک بودن نقاط ابتدایی، انتهایی یا وسط پاره‌خط‌ها، اختلاف زاویه کم پاره‌خط‌ها، نزدیک بودن کنتراست متوسط در طول پاره‌خط‌ها، چنانچه با حد آستانه قوی و به منظور انتخاب پاره‌خط نظیر استفاده شوند، باعث حذف تطابق‌های صحیح می‌شوند و چنانچه با حد آستانه ضعیف استفاده شوند موجب تطابق‌های غلط هستند. البته علل ناکارآمد بودن پاره‌ای از این معیارها؛ مانند طول و نقاط ابتدا و انتها و وسط، عمدتاً به دلیل شرایط نوری و خطاهای غیرقابل اجتناب در پروسه استخراج پاره‌خط‌ها است. از طرفی نشان داده شده است که اطلاعات موجود در همین معیارها، در قالب جدید می‌تواند فضای جستجو یا به عبارت دیگر تعداد کاندیدها را با اطمینان بالا کاهش دهند؛ لذا در الگوریتم پیشنهادی با معرفی و استفاده از معیارهای جدید هم‌پوشانی نرمالیزه و جهت کنتراست در دو طرف پاره‌خط‌ها و نیز استفاده از قیود رایج و مطمئن epipolar و حداکثر اختلاف مکانی و اختلاف زاویه، لیست کاندیدها تشکیل می‌شود. همچنین برای انتخاب پاره‌خط‌های متناظر از قید ترتیب و بهینه‌سازی تابع معیار "حاصل جمع فاصله کنتراست دو طرفه پاره‌خط‌ها" که هر دو در تطابق استریو جدید و با ضریب اطمینان بالایی هستند، استفاده شده است.

برای ارزیابی الگوریتم، تصاویری متنوع از محیط‌های داخلی گرفته شده و از آنجا که بانک اطلاعاتی استاندارد در این رابطه وجود ندارد، مجموعه منتخبی از این تصاویر با تطابق چشمی تمامی پاره‌خط‌ها، مبنای ارزیابی قرار گرفته‌اند. کارایی بالای الگوریتم، با تطابق صحیح ۹۶٪ از پاره‌خط‌های موجود در فریم‌های چپ و راست این تصاویر استریو و بدون تطابق غلط، نشان داده شده است.

۷- تقدیر و تشکر

تهیه کنندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مرکز تحقیقات مخابرات ایران تشکر کنند.

جدول (۲): ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم [۱]، برای سه تصویر مختلف

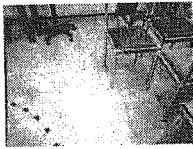
شماره شکل	پاره‌خط‌های تصویر راست		تطابق صحیح		عدم موفقیت در تطابق		الگوریتم مورد استفاده
	تعداد کل	پاره‌خط‌هایی که متناظر دارند	تعداد	درصد	تعداد	درصد	
شکل ۵	۸۳	۶۶	۶۶	٪۱۰۰	۰	٪۰	الگوریتم پیشنهادی
			۲۶	٪۵۵	۳۰	٪۴۵	الگوریتم [۱]
شکل ۶	۱۲۷	۱۱۰	۱۰۴	٪۹۴/۵	۶	٪۵/۵	الگوریتم پیشنهادی
			۶۹	٪۶۳	۳۱	٪۲۷	الگوریتم [۱]
شکل ۷	۱۶۷	۱۲۱	۱۱۵	٪۹۵	۶	٪۵	الگوریتم پیشنهادی
			۷۰	٪۵۸	۵۱	٪۴۲	الگوریتم [۱]
شکل‌های ۶، ۵ و ۷	۳۸۷	۲۹۷	۲۸۵	٪۹۶	۱۲	٪۴	الگوریتم پیشنهادی
			۱۷۵	٪۵۹	۱۲۲	٪۴۱	الگوریتم [۱]

جدول (۳): ارزیابی نقش مولفه‌های مختلف در الگوریتم پیشنهادی

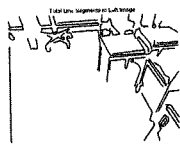
حالت	الگوریتم و تغییرات	درصد عدم موفقیت	درصد تطابق غلط	درصد تطابق صحیح
الف	الگوریتم [۱]	۴۱	۰	۵۹
ب	حالت "الف" با حذف آستانه	۹	۱۵/۵	۷۵/۵
ج	حالت "ب" با اعمال ترتیب و هم‌راستایی	۱۷/۲	۵	۷۷/۸
د	حالت "ج" با اعمال قیود پیشنهادی برای مرحله (۱)، بجز محدوده مکان	۲۰/۲	۲	۷۷/۸
ه	الگوریتم [۱] با محدوده مکان به روش پیشنهادی	۳۷	۰	۶۳
و	حالت "ه" با حذف آستانه	۵/۴	۱۲/۵	۸۲/۱
ز	حالت "و" با اعمال ترتیب و هم‌راستایی	۱۰/۴	۵/۴	۸۴/۲
ح	حالت "ز" و اعمال سایر قیود پیشنهادی مرحله (۱)	۶/۱	۳	۹۰/۹
ط	الگوریتم پیشنهادی	۴	۰	۹۶

جدول (۴): ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم [۱۰]، برای سه تصویر مختلف

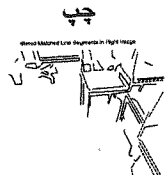
شماره تصویر	پاره‌خط‌های غیر افقی تصویر چپ	تطابق صحیح		عدم موفقیت در تطابق		خطا در تطابق		زمان اجرا (ثانیه)	الگوریتم
		تعداد	درصد	تعداد	درصد	تعداد	درصد		
۱	۴۳	۳۳	٪۱۰۰	۰	٪۰	۰	٪۰	۱/۰۴۷	پیشنهادی
		۳۲	٪۷۴/۴	۱۰	٪۲۳/۳	۱	٪۲/۳	۳/۳	[۱۰]
۲	۸۷	۸۱	٪۹۳/۱	۶	٪۶/۹	۰	٪۰	۱/۰۹۴	پیشنهادی
		۴۶	٪۵۲/۹	۴۱	٪۴۷/۱	۰	٪۰	۱۲/۵	[۱۰]
۳	۹۶	۹۰	٪۹۳/۷	۶	٪۶/۳	۰	٪۰	۱/۵۸	پیشنهادی
		۴۴	٪۴۵/۸	۵۲	٪۵۴/۲	۰	٪۰	۳۰/۵	[۱۰]
۱ و ۲ و ۳	۲۲۶	۲۱۴	٪۹۴/۷	۱۲	٪۵/۳	۰	٪۰	۴/۷۲	پیشنهادی
		۱۲۲	٪۵۴/۰	۱۰۳	٪۴۵/۶	۱	٪۰/۴	۴۶/۳	[۱۰]



(الف): تصویر چپ

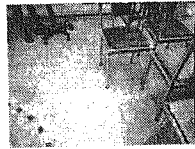


(ج): پاره‌خط‌های تصویر

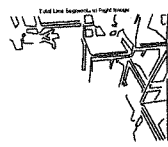


(و): پاره‌خط‌های تصویر راست
برچسب خورده با الگوریتم [۱] راست برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی

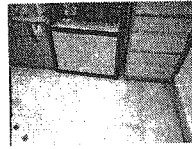
شکل (۷): نمونه‌ای از اجرای الگوریتم تطابق بر روی تصویر واقعی



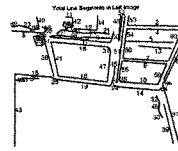
(ب): تصویر راست



(د): پاره‌خط‌های تصویر راست



(الف): تصویر چپ



(ج): پاره‌خط‌های تصویر

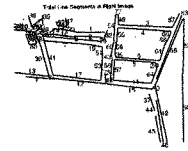


(و): پاره‌خط‌های تصویر راست
برچسب خورده با الگوریتم [۱] راست برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی

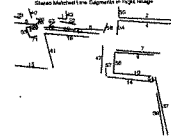
شکل (۵): نمونه‌ای از اجرای الگوریتم تطابق بر روی تصویر واقعی



(ب): تصویر راست



(د): پاره‌خط‌های تصویر راست



۸- مراجع

[۱] عبدالرسول قاسمی و ابوالقاسم راعی، استفاده از تصاویر استریو برای ناوبری ربات سیار، مجموعه مقالات دوازدهمین کنفرانس برق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، اردیبهشت ۱۳۸۳.

[۲] قادر کریمیان، ابوالقاسم راعی، کریم فائز بررسی تحلیلی و آماری برخی قیود هندسی و ساختاری، در تطابق تصاویر استریو، برای پاره‌خط‌ها، مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس برق ایران (ICEE2006)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۵.

[۳] Emanuele Trucco; Alessandro Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, 1998.

[۴] N. Ayache and F. Lustman, "Trinocular Stereo Vision for Robotics", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, no. 13 vol. 1, pp. 7385 1991.

[۵] G. Medioni and R. Nevatia, "Segment-Based Stereo Matching", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 31, no 3, pp. 2-18, July 1985.

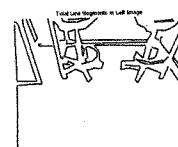
[۶] J. H. McIntosh and K. M. Mutch, "Matching Straight Lines", *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 43 pp 386-408, 1988.

[۷] Raymond K. K. Yip, W. P. Ho, "Multi-level based stereo line matching with structural information using dynamic programming", *ICIP'96 IEEE International Conference on Image Processing*, vol. 2, pp 341-344, 1996.

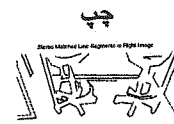
[۸] S.D. Sharghi, F.A. Kamangar, "Geometric feature-



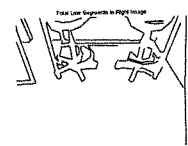
(الف): تصویر چپ



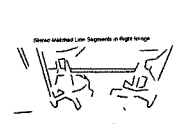
(ج): پاره‌خط‌های تصویر



(ب): تصویر راست



(د): پاره‌خط‌های تصویر راست



(و): پاره‌خط‌های تصویر راست
برچسب خورده با الگوریتم [۱] راست برچسب خورده با الگوریتم پیشنهادی

شکل (۶): نمونه‌ای از اجرای الگوریتم تطابق بر روی تصویر واقعی

- based matching in stereo images”, Proceedings of IEEE Information, Decision and Control, pp 65-70, 1999.
- Gonzalo Pajares, Jesus M. de la Cruz, J. A. Lopez-Orozco, “Relaxation labeling in stereo image matching”, Elsevier Pattern Recognition Journal, pp. 5368 2000. [۹]
- W.P. Ho, R.K.K Yip, “A Dynamic Programming Approach for Stereo Line Matching with Structural Information”, Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition, no 1, pp 791-794, 1996. [۱۰]
- Stephen Se, David Lowe and Jim Little, “Mobile Robot Localization and Mapping with Uncertainty using Scale-Invariant Visual Landmarks”, International Journal of Robotics Research, Volume 21, Number 8, pp 735-758, August 2002. [۱۱]
- M.Sonka and V.Hlavac and R.Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, Chapman& Hall, 1993. [۱۲]
- Min C. Shin, Dmitry B. Goldgof, Kevin W. Bowyer, Savvas Nikiforou, “Comparison of edge detection algorithms using a structure from motion task”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, vol. 31 no. 4, pp. 589-601, 2001. [۱۳]
- “Vision Systems”, Available Online at http://www.videredesign.com/vision_systems.htm [۱۴]
- “THE HUMAN INTERFACE ROBOT”, Available Online at <http://www.activrobots.com/ROBOTS/peoplebot.html> [۱۵]
- M. Z. Brown, D. Burschka and G. D. Hager, “Advances in Computational Stereo”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no 8, pp. 993-1008 2003. [۱۶]

۹- زیر نویس ها

-
- ¹ Scale Invariant Feature Transform
 - ² Dynamic Programming
 - ³ Occlusion
 - ⁴ Lines Normalized Overlap
 - ⁵ Two Sided Contrast Distance