

## استفاده از تصاویر استریو برای ناوبری ربات سیار

ابوالقاسم راعی<sup>۱</sup>، عبدالرسول قاسمی<sup>۲</sup>

آزمایشگاه تحقیقاتی ربات های سیار

دانشگاه صنعتی امیر کبیر

E-mail: (Raie@aut.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله نحوه استخراج نقشه محیط توسط دوربین استریو برای استفاده یک ربات سیار ارائه می گردد. تصاویر گرفته شده توسط دوربین با پارامترهای کالیبراسیون تصحیح می گردد. کالیبراسیون بر مبنای روش Tsai انجام می شود، سپس قطعه خط های موجود در تصاویر چپ و راست پیدا شده و برای هر قطعه خط در تصویر چپ متناظر در تصویر راست به دست می آید. نقشه عمق به دست آمده سپس به نقشه موانع روی زمین تبدیل می گردد. عملکرد الگوریتم با ارائه نمونه هایی از نقشه های بدست آمده از تصاویر واقعی نشان داده می شود. تصاویر مربوط به محیط های داخلی هستند و نقشه های بدست آمده برای ناوبری ربات مناسب می باشند. الگوریتم های به کار رفته جهت استخراج نقشه با یک پروسوسور پنتیوم III با سرعت 933 MHz با فرکانس 4 تصویر در ثانیه قابل اجرا است که با افزایش توان پروسوسور به پروسوسورهای رایج امروزی به حداقل 8 هرتز قابل افزایش است. چنین فرکانسی برای ناوبری ربات با حداقل سرعت  $5 m/s$  مناسب می باشد.

واژه های کلیدی: ربات سیار - بینایی استریو - نقشه محیط - ناوبری

### ۱- مقدمه

در ناوبری رباتهای سیار، ادراک محیط یکی از مهم ترین بخش های مسئله است. ربات می خواهد در محیط های ناشناخته حرکت کند و برای حرکت و انجام ماموریت خود می بایست اطلاعات لازم را در مورد محل و موقعیت موانع با استفاده از سنسورها، به دست آورد. اغلب ربات ها برای اخذ این اطلاعات از سنسورهای ماوراء صوت یا لیزر استفاده می کنند [1]. با افزایش توان پروسوسورها امکان استفاده از سنسورهای بینایی به عنوان ابزار درک محیط فراهم شده است. ربات با استفاده از یک دوربین قادر به انجام کارهایی از قبیل دنبال کردن خط راهنما یا یافتن یک ویژگی خاص در محیط می باشد [2]. در حالت کلی با استفاده از یک تصویر نمی توان اطلاعات لازم را در مورد موقعیت سه بعدی اجزاء آن دست آورد [3]، اما با استفاده از چند تصویر که از زوایای مختلف از صحنه گرفته شده است می توان به این اطلاعات دست یافت.

بینایی استریو شامل گرفتن دو یا چند تصویر از یک محیط و استخراج اطلاعات سه بعدی اجسام موجود در محیط، با پردازش تصاویر گرفته شده می باشد. نحوه پردازش تصاویر گرفته شده با توجه به اهداف مورد نظر، از یک کاربرد به

۱- استادیار الکترونیک، دانشکده مهندسی برق

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشکده مهندسی برق

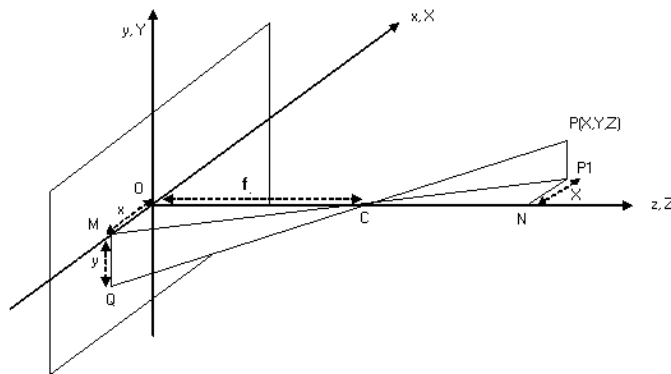
کاربرد دیگر تفاوت دارد. در منابع پژوهشی، مقالات بسیاری ابعاد مختلف بینایی استریو را مورد بررسی قرار داده اند، که از این میان به مواردی که به موضوع مورد نظر این مقاله نزدیکتر است اشاره می شود. در [1]، با استفاده از سه دوربین که در یک آرایش خاص چیده شده اند، نقشه های عمق با فرکانس ۲Hz به دست آمده است. برای پردازش تصاویر از الگوریتم های مبتنی بر ناحیه و پروسسورهای پردازش سیگنال (DSP) استفاده شده است. با ایجاد نقشه زمین و استفاده از روش میدان پتانسیل ربات توانسته با سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در محیط حرکت کند. در [4]، از روش های مبتنی بر ویژگی برای به دست آوردن نقشه عمق تصاویر محیط های داخلی استفاده شده است. ابتدا قطعه خط های موجود در دو تصویر به دست آمده و سپس تناظر یابی بین خطوط انجام شده است. نتایج ارائه شده در حد یافتن متناظر هر قطعه خط است و اطلاعاتی از نقشه زمین ارائه نشده است. در [5]، از اطلاعات دو تصویر برای هدایت ربات در محیط استفاده شده است که در آن ربات با پردازش تصاویر گرفته شده، سطح روی زمین را به سطوح دارای مانع یا سطوح بدون مانع تفکیک می کند.

در این مقاله نمونه ای از استفاده از بینایی استریو در ساختن نقشه زمین با فرکانس 4Hz، با استفاده از یک الگوریتم مبتنی بر ویژگی و پروسسورهای رایج ارائه شده است. در بخش ۲ این مقاله هندسه تصویر برداری استریو و مراحل مختلف عمق یابی با روش بینایی استریو به شکل کلی بیان می شود. در بخش ۳، در مورد استخراج اجزاء مورد نظر از تصاویر و دلیل این انتخاب توضیح داده شده و الگوریتم های لازم برای استخراج اجزاء بیان می گردد. در بخش ۴، نحوه تطابق ویژگی های اجزاء استخراج شده از تصاویر ارائه می شود. در بخش ۵، نحوه بازسازی و مساله کالیبراسیون دوربین آمده است. بستر آزمایشگاهی مورد استفاده و نتایج عملی در قسمت ۶ ارائه شده است.

## ۲- مروری بر هندسه تصویر برداری و بیان صورت مساله

شکل (۱) نحوه تشکیل تصویر در دوربین را با تبدیل پرسپکتیو نشان می دهد. این تبدیل نقاط سه بعدی فضا را به داخل صفحه تصویر می نگارد و چگونگی تشکیل پیکسل های تصویر از نقاط سه بعدی محیط را ارایه می دهد. دستگاه مختصات تصویر را با  $(x, y, z)$  و مختصات نقاط واقعی را با  $(X, Y, Z)$  نشان می دهیم. فرض می کنیم که مرکز دستگاه های مختصات صفحه تصویر و محیط واقعی یکسان باشد و فاصله کانونی لنز برابر  $f$  باشد. حال اگر تصویر نقطه  $(X, Y, Z)$  در صفحه تصویر  $(x, y)$  باشد، از تشابه مثلث های  $MOC, P_1CN$  و تشابه مثلث های  $QMC, PCP_1$  داریم:

$$\frac{x}{f} = -\frac{X}{Z-f} = \frac{X}{f-Z}, \quad \frac{y}{f} = -\frac{Y}{Z-f} = \frac{Y}{f-Z} \quad (1)$$

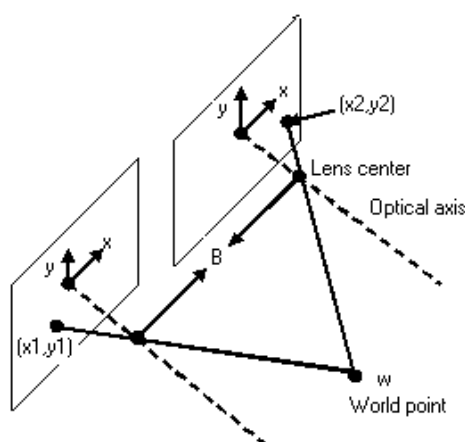


شکل (۱): چگونگی تشکیل تصویر در صفحه دوربین

با استفاده از معادلات فوق داریم :

$$x = \frac{fX}{f-Z}, \quad y = \frac{fY}{f-Z} \quad (2)$$

از روابط (۲) مشخص است که با داشتن  $(x, y)$ ، استخراج  $(X, Y, Z)$  ممکن نیست. به عبارت دیگر تبدیل پرسپکتیو یک تبدیل همه به یک است که همه نقاط خط گذرنده از  $(x, y, 0)$  و  $(0, 0, f)$  را به نقطه  $(x, y)$  در صفحه تصویر می نگارد. برای استخراج موقعیت سه بعدی (3D) هر نقطه می بایست از دو یا چند تصویر که از زوایای دید متفاوت گرفته شده اند استفاده کنیم. شکل (۲) هندسه تصویر برداری با دو دوربین موازی را نشان می دهد.



شکل (۲): هندسه تصویر برداری استریو با استفاده از دو دوربین موازی

در این شکل، یافتن مختصات  $(X, Y, Z)$  برای نقطه W، با فرض داشتن مقادیر مختصات تصاویر آن در دو دوربین، یعنی  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  مورد نظر می باشد. فرض می شود که دوربین ها کاملا مشابه می باشند و دستگاههای مختصات آنها تنها با یک جابجایی در امتداد محور x بر هم منطبق می شوند. اکنون مرکز دستگاه مختصات محیط را یک بار منطبق با دستگاه مختصات دوربین چپ و یک بار منطبق با دستگاه مختصات دوربین راست در نظر می گیریم، از رابطه (۱) داریم:

$$X_1 = \frac{x_1}{f}(f - Z_1), \quad X_2 = \frac{x_2}{f}(f - Z_2) \quad (3)$$

اندیس های ۱ و ۲ برای  $(X, Y, Z)$  حاکی از انطباق دستگاه مختصات محیط بر مختصات دوربین چپ و راست می باشد. با توجه به وضعیت دوربین ها و نحوه جابجایی دستگاه مختصات محیط داریم:

$$X_2 = X_1 + B, \quad Z_2 = Z_1 = Z \quad (4)$$

که B نشان دهنده طول خط واصل بین مراکز نوری دوربین ها (خط پایه) است. با استفاده از روابط (۴) و جایگذاری مقادیر ... در روابط (۳) داریم :

$$X_1 + B = \frac{x_2}{f}(f - Z), \quad X_1 = \frac{x_1}{f}(f - Z) \quad (5)$$

اکنون با حذف ... در روابط (۵)، مختصات عمق نقطه W از رابطه (۶) قابل حصول می باشد.

$$Z = f - \frac{fB}{x_2 - x_1} \quad (۶)$$

بر اساس روابط فوق مشخص است که اگر نقاط متناظر مربوط به یک نقطه واقعی در دو تصویر مشخص شوند، استخراج هر سه بعد آن نقطه امکان پذیر می گردد. بنابر این بازسازی صحنه از دو تصویر گرفته شده، منوط به دانستن تناظر پیکسل های مختلف در دو تصویر می باشد. لذا مسائل اصلی هر الگوریتم استریو عبارتند از [5]:

۱- انتخاب و استخراج اجزاء تصویر: اگر چه تا کنون نقاط متناظر در دو تصویر مورد توجه قرار گرفته اند و لیکن در حالت کلی و برای کاهش حجم محاسبات، می توان اجزاء مهم و مورد نظر از دو تصویر را انتخاب و استخراج نمود و موقعیت 3D آن اجزاء را به دست آورد. مثلا پاره خط ها، کانتورها و ... می توانند بر حسب محیط به عنوان اجزاء اصلی انتخاب و استخراج شوند.

۲- تطبیق و یافتن اجزاء متناظر: در این مرحله، لیست اجزاء انتخاب شده و استخراج شده از دو تصویر، با استفاده از توابع معیار مناسب تطبیق داده شده و اجزاء متناظر در دو تصویر مشخص می شوند.

۳- بازسازی: در این مرحله با داشتن اجزاء متناظر در دو تصویر چپ و راست و اطلاعات مربوط به دوربین ها و هندسه سیستم تصویر برداری، یعنی وضعیت دوربین ها نسبت به هم، موقعیت 3D اجزاء به دست می آیند.

با توجه به مطالب فوق، می توان موضوع مورد بررسی را به این گونه مطرح کرد که اگر ربات سیار مجهز به دو دوربین باشد می تواند برای بخش هایی از صحنه مقابل خود که در هر دو دوربین دیده می شود اطلاعات عمق را اخذ کند و به این ترتیب موقعیت موانع پیش روی خود را بر روی زمین داشته باشد. این کل چیزی است که یک ربات برای انجام ماموریت خود به آن نیاز دارد.

### ۳- انتخاب و استخراج اجزاء تصاویر

همان طور که گفته شد اولین مرحله هر الگوریتم استریو انتخاب و استخراج اجزاء یا عناصر دو تصویر، برای انطباق و تعیین اجزاء متناظر می باشد. بر این اساس الگوریتم های استریو به دو دسته کلی تقسیم می شوند [6]:

۱- الگوریتم های مبتنی بر ناحیه (Area Based Algorithms): در این الگوریتم ها اجزاء انتخاب شده خود پیکسل ها می باشند و از شدت روشنایی پیکسل ها و همسایه های اطراف آنها برای تطابق استفاده می شود. برای یافتن پیکسل های متناظر می توان از کورلیشن یک پنجره در اطراف پیکسل مورد نظر در تصویر چپ و تمام کاندیداهای تطابق در تصویر راست به عنوان معیار انتخاب بهترین متناظر استفاده کرد. این روش ها دارای هزینه محاسباتی سنگین و حساسیت زیاد به روشنایی محیط می باشند، اما از لحاظ پیاده سازی آسان هستند. برای کاهش حجم محاسبات می توان فقط بخش های مهم تصویر، مثلا محدوده های لبه های عمودی تصویر را برای تطابق انتخاب نمود.

۲- الگوریتم های مبتنی بر ویژگی (Feature Based Algorithms): در این الگوریتم ها یک سری اجزاء مهم و با معنی در دو تصویر استخراج شده و سپس سعی می شود با انتخاب یک تابع معیار مناسب تناظر یابی در سطح این اجزاء صورت پذیرد. هر جزء انتخاب شده در این روشها با یک بردار ویژگی قابل نمایش است و این بردار با پردازش تصویر، تولید می شود. مثلا بردار ویژگی پاره خط می تواند شامل نقطه وسط، شیب و طول آن باشد. این روش ها حساسیت کمتری به روشنایی محیط دارند اما پیاده سازی آنها مشکل تر است.

روش های مبتنی بر ویژگی در جاهایی که اطلاعات قبلی از صحنه تصویر موجود است مناسب می باشند چرا که می توان اجزاء مهم و بهترین ویژگی را انتخاب نمود. مثلا در مورد صحنه های داخلی که معمولا دارای تعداد زیادی خط مستقیم هستند و سطوح بافتی در آن کم است می توان پاره خط ها را به عنوان اجزاء اصلی انتخاب نمود. نقشه عمق پراکنده که از روش های مبتنی بر ویژگی به دست می آید نقطه ضعف این روش ها محسوب می گردد اما در برخی از کاربردها، مثل ناوبری ربات، همین نقشه عمق پراکنده کافی می باشد.



### ۳-۱ روش انتخابی در این مقاله

در این مقاله از یک الگوریتم استریوم مبتنی بر ویژگی استفاده شده است. ویژگی استفاده شده قطعه خط های موجود در دو تصویر می باشد. دلیل مناسب بودن قطعه خط ها برای کاربرد ربات سیار این است که:  
الف- باعث کاهش تعداد عناصر اولیه تطابق می گردد و در نتیجه زمان لازم برای فرآیند تطابق کاهش می یابد. همچنین میزان اختلاف زمان اجرای الگوریتم از یک تصویر به تصویر دیگر کمتر از الگوریتم های مبتنی بر پیکسل است.

ب- قطعه خط ها یک توصیف کلی از تصویر ارائه می دهند و چنانچه تطبیق و بازسازی آنها به درستی صورت گیرد موقعیت های خالی و اشغال بر روی نقشه زمین مشخص می شود و این اطلاعات برای کاربرد ربات سیار کفایت می کند. برای استخراج پاره خط های اصلی موجود در شکل، ابتدا باید پیکسل هایی که جز نقاط لبه محسوب می شوند استخراج گردند، سپس این پیکسل ها به طریق مناسب به هم وصل شده و خطوط مرزی را تشکیل دهند و نهایتاً پاره خط های شکل از این خطوط مرزی استخراج گردند، که در ادامه به این موارد می پردازیم.

### ۳-۲ نحوه استخراج نقاط لبه

این مرحله اهمیت ویژه ای در کل الگوریتم دارد، چرا که عملکرد مراحل بعدی الگوریتم بستگی مستقیم به خروجی این مرحله دارد. در این مرحله می بایست نقاط لبه یا مرزی (boundary) موانع موجود در تصویر استخراج گردد. نقاط لبه نقاطی هستند که دارای تغییرات سریع شدت روشنایی در اطراف خود می باشند.

الگوریتم های مختلفی برای استخراج نقاط لبه وجود دارد که هر کدام دارای نقاط قوت و نقاط ضعف خاص خود هستند. از جمله این الگوریتم ها می توان به الگوریتم "های سوبل"، "کنی" و "تعیین نقاط عبور از صفر تصویر فیلتر شده با گاسین" اشاره کرد. الگوریتم سوبل دارای عملکرد پایین تری نسبت به دو الگوریتم دیگر است اما زمان اجرای آن به مراتب کمتر می باشد.

در الگوریتم سوبل از دو ماسک  $G_x$  و  $G_y$  در جهت  $x, y$  برای استخراج نقاط لبه استفاده می شود. تصویر  $f$  یک بار با  $G_x$  و یک بار با  $G_y$  کانوالو می گردد تا به ترتیب لبه های افقی یعنی تصویر  $f_x$  و لبه های عمودی یعنی تصویر  $f_y$  استخراج گردند. سپس تصویر گرادیان در هر نقطه از رابطه (۷) به دست می آید:

$$g(x, y) = \sqrt{f_x^2(x, y) + f_y^2(x, y)} \quad (7)$$

لبه هایی که تصویر  $g(x, y)$  ارایه می دهد لبه های پهن هستند، همچنین لبه های نامربوط زیادی هم در آن وجود دارد. بنابراین تنها نقاط ماکزیمم محلی از  $g(x, y)$  که از یک سطح آستانه هم بزرگتر باشد به عنوان نقاط لبه نهایی استخراج می گردد. پس در نقطه  $(x, y)$  که یک ماکزیمم محلی  $g$  است داریم:

$$e(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(x, y) > T \\ 0 & \text{if } g(x, y) < T \end{cases} \quad (8)$$

که  $e(x, y)$  نقشه لبه تصویر و  $T$  مقدار آستانه می باشد. مقدار آستانه می بایست بر اساس متوسط گرادیان تصویر و ضریبی از آن انتخاب گردد. هر چه مقدار  $T$  بزرگتر انتخاب گردد لبه های کمتر و مهم تری از تصویر پیدا می شود. نتایج پیاده سازی ها در این تحقیق نشان داد که مقدار واحدی برای  $T$  نمی توان یافت که هم نقاط لبه مربوط به موانع را در بر داشته باشد و هم لبه های نامربوط، ناشی از تغییرات شدت روشنایی در نقاط مختلف محیط یا لبه های

ضعیف، را حذف کند. به این دلیل در ابتدا با یک مقدار  $T$  بزرگ، نقاط اصلی مربوط به لبه ها پیدا شد و سپس در یک تصویر آستانه شده با  $T$  پایین تر این نقاط به عنوان نقاط بذری جهت گسترش لبه ها استفاده گردید. به این ترتیب تا حد قابل قبولی هر دو منظور فوق برآورده شده است.

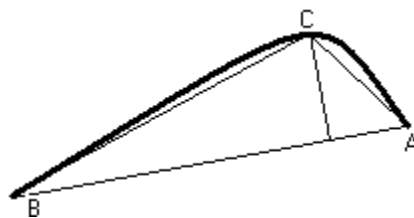
### ۳-۳ اتصال نقاط لبه به یکدیگر

پس از یافتن نقاط کاندید برای لبه بودن می بایست این نقاط به یکدیگر وصل گردد و به عبارت دیگر اجزاء متصل به هم یا خطوط مرزی یافت شود. الگوریتم ساده زیر برای یافتن نقاط اتصال-هشت (eight connected) به یکدیگر استفاده شده است:

تصویر از گوشه بالای سمت چپ اسکن می شود تا به یک نقطه که متعلق به لبه است برسیم. لیست جدیدی باز می شود و این نقطه در ابتدای آن قرار می گیرد. اگر نقطه ای در اتصال-هشت این نقطه باشد که آن هم جزء لبه باشد به این لیست اضافه می گردد و سپس به این نقطه جدید می رویم این کار تا هنگامی که نقطه متصل یافت شود ادامه پیدا می کند. در پایان این لیست را می بندیم و کلیه نقاط این لیست را در تصویر لبه برجسب می کنیم و سپس به دنبال نقاط لبه بعدی می رویم. در انتهای این مرحله ما لیست لبه های متصل به هم در تصویر را خواهیم داشت. لیست هایی که تعداد نقاط آنها از یک حد آستانه مثلا ۱۰ پیکسل کمتر باشد مربوط به نویز یا دارای اطلاعات نامربوط هستند و از مجموعه لیست ها حذف می گردند.

### ۳-۴ یافتن پیکسل های روی یک پاره خط مستقیم در هر مجموعه نقاط متصل

در این مرحله هر کدام از لیست های نقاط متصل، به تعدادی پاره خط مستقیم شکسته می شوند. برای انجام این کار از الگوریتم زیر استفاده شده است (برای روشن شدن نحوه کار الگوریتم به شکل (۳) توجه شود): ابتدا خطی که نقاط ابتدا و انتهای لیست را به هم وصل می کند تعیین می شود (در شکل از نقطه A به نقطه B) و سپس فاصله کلیه نقاط لیست تا این خط مشخص می گردد. نقطه ای که دارای بیشترین فاصله تا خط فوق باشد تعیین می گردد (نقطه C). اگر این فاصله از یک حد آستانه بزرگتر باشد لیست باید در این نقطه قطع گردد و سپس الگوریتم برای نقاط از ابتدای لیست تا نقطه جدید (نقطه C) و نقطه جدید تا انتهای لیست تکرار گردد. این عمل آنقدر تکرار می شود که همه پیکسل های متناظر با خط های مستقیم در لیست جدا گردند. در انتهای این مرحله هر لیست به تعدادی لیست جدید که عناصر آنها معرف نقاط روی یک پاره خط مستقیم است تجزیه می گردد. برای مثال لیست شکل (۳) به قطعه های AC, CB تجزیه می گردد.



شکل (۳): نحوه یافتن خط های مستقیم روی نقاط متصل

#### ۴- استخراج بردارهای ویژگی اجزاء، تطبیق آنها و یافتن اجزاء متناظر

در این مقاله، اجزاء انتخاب شده از تصویر، پاره خط‌های مستقیم می‌باشند که از پیکسل‌های متصل به هم تشکیل شده و در لیست‌های جداگانه ضبط شده‌اند. برای توصیف هر قطعه خط به شکل یک بردار که قابل مقایسه با یکدیگر باشند، می‌بایست یک سری خصوصیات از هر خط که معرف آن خط باشد استخراج گردد، به نحوی که خط با این بردار ویژگی شناخته شود و این خصوصیات برای تطبیق خطوط با یکدیگر استفاده گردد.

#### ۴-۱ انتخاب بردار ویژگی

بردار ویژگی انتخاب شده برای هر خط یک بردار ۵ عنصری است که عناصر آن عبارتند از: طول خط ( $L$ )، جهت خط ( $\theta$ )، کنتراست متوسط در امتداد خط ( $C$ )، مختصات افقی نقطه میانی خط ( $Midx$ )، مختصات عمودی نقطه میانی خط ( $Midy$ )

برای استخراج بردار فوق برای هر قطعه خط ابتدا بر روی پیکسل‌های هر لیست معرف یک خط، یک خط برازش می‌شود به قسمی که دارای کمترین میانگین مربع خطا باشد (Mean Square Error). سپس تصویر نقاط ابتدا و انتهای لیست بر روی این خط پیدا می‌شود و به عنوان نقاط ابتدا و انتهای خط در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب هر خط با  $\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}$  مختصات نقطه ابتدایی و  $\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix}$  مختصات نقطه انتهایی بیان می‌گردد. با این توصیف عناصر بردار ویژگی به ترتیب طبق روابط (۹) الی (۱۲) محاسبه می‌گردند:

۱- طول خط

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

۲- جهت خط

$$\theta_1 = a \tan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (10)$$

۳- کنتراست متوسط در طول خط: این پارامتر اطلاعاتی در مورد سطح خاکستری ناحیه ای که خط در آن واقع شده است در اختیار ما قرار می‌دهد. اگر تعداد عناصر لیست برای خط،  $N$  پیکسل باشد:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i) \quad (11)$$

که  $f(i)$  متوسط جمع مربعات تفاضل سطح خاکستری در پیکسل  $\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$  در یک همسایگی  $3 \times 3$  با مقدار متوسط آن در این همسایگی است.

۴ و ۵- مختصات نقطه میانی: این پارامترها اطلاعاتی در مورد محل خط در تصویر در اختیار ما قرار می‌دهد که در مرحله یافتن تطبیق‌ها و بازسازی به کار می‌آید.

$$Midx = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad Midy = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (12)$$

## ۴-۲ تطبیق ویژگی ها

پس از آنکه بردارهای ویژگی برای هر قطعه خط در تصویر چپ و تصویر راست پیدا شد می بایست مساله تطابق یعنی یافتن خطوط متناظر در دو تصویر حل گردد. برای تطابق از چهار مولفه اول بردار ویژگی استفاده می شود. تابع معیار که برای سنجش میزان شباهت قطعه خط ها استفاده شده است مطابق رابطه (۱۳) است:

$$D(l_i, l_j) = w_l \left( \frac{L_i - L_j}{L_i} \right)^2 + w_\theta (\theta_i - \theta_j)^2 + w_c (C_i - C_j)^2 + w_{My} (Midy_i - Midy_j)^2 \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)  $l_i, l_j$  دوخطی است که می خواهیم فاصله (عدم تشابه) آنها  $D(l_i, l_j)$  را بر حسب بردارهای ویژگی آنها پیدا کنیم و ضرائب  $w$  وزن فاصله هر کدام از مولفه ها را نشان می دهد. قابل ذکر است که علت قرار دادن مولفه آخر، لحاظ کردن شرط epipolar برای سیستم استریو با دوربین های موازی است که الزام می دارد که متناظر هر پیکسل در تصویر چپ را، روی سطری مشابه در تصویر راست جستجو کنیم. ضرائب وزن در این مقاله به شکل تجربی تعیین شده است. الگوریتم به کار رفته برای تطابق بردارهای ویژگی در تصویر چپ و بردارهای ویژگی در تصویر راست در دو مرحله و به صورت زیر است:

۱- بدست آوردن کاندیداهای ممکن برای تطابق

برای هر قطعه خط در تصویر چپ کاندیداهای ممکن با توجه به شرط epipolar و حداقل فاصله ممکن به دست می آید. شرط epipolar به این شکل اعمال می گردد که می بایست اختلاف مختصات میانه افقی،  $Midy$  برای کاندیداهای تناظر و قطعه خط مرجع از یک حد آستانه ای کمتر باشد.

$$|Midy_i - Midy_j| < T \quad (14)$$

همچنین چون "عمق"، ارتباط معکوس با میزان تمایز (disparity)، یعنی اختلاف  $x$  در دو تصویر برای دو پیکسل متناظر دارد و حداقل عمق مجاز محدود است پس حداکثر مقدار  $d$  نیز مشخص است.

$$0 \leq Midx_i - Midx_j \leq d_{max} \quad (15)$$

۲- یافتن بهترین کاندید

پس از تعیین کاندیداهای ممکن برای هر خط در تصویر چپ، فاصله خط تا هر کدام از کاندیداها با توجه به رابطه (۱۳) به دست می آید و سپس کوچکترین فاصله پیدا می شود. اگر این فاصله از یک حد آستانه ای کوچکتر باشد این تطابق پذیرفته می شود و این دو خط برچسب خورده در مراحل بعدی شرکت نمی کنند. در پایان این مرحله تعدادی از خطوط در تصویر چپ با تعدادی از خطوط در تصویر راست متناظر شده اند. همچنین تعدادی از خطوط به اشتباه تطبیق می شوند که به آنها تطبیق نادرست می گوئیم.

## ۵- بازسازی (Reconstruction)

پس از یافتن خطوط متناظر با هم، می بایست بازسازی برای این خطوط انجام شود. بازسازی با توجه به معادلات (۶ و ۳) برای دو نقطه متناظر انجام می شود. در این معادلات بازسازی هر نقطه نسبت به دوربین سمت چپ انجام می شود. برای بازسازی می بایست در معادلات مذکور "مختصات پیکسلی" را به مختصات بر حسب میلی متر تبدیل کنیم بنابر این پارامترهای دوربین را لازم داریم. اگر بخواهیم نقشه زمین موانع را داشته باشیم می بایست ارتباط بین دستگاه مختصات متصل به دوربین سمت چپ و یک دستگاه مختصات متصل به پایه ربات را هم به دست آوریم.



## ۵-۱ کالیبراسیون

"کالیبراسیون" پروسه تعیین پارامترهای داخلی و پارامترهای خارجی سیستم تصویر برداری است. پارامترهای داخلی، مشخصات نوری و هندسه داخلی دوربین را بیان می کند و شامل فاصله کانونی موثر (f)، ضرائب اعوجاج لنزها و پارامترهای اسکن تصویر، مانند مرکز تصویر می باشد. پارامترهای خارجی، موقعیت و جهت سه بعدی دوربین را نسبت به دستگاه مختصات مرجع مشخص می کند.

شکل (۴) دستگاه مختصات متصل به دوربین و دستگاه مختصات متصل به پایه ربات و اثر اعوجاج را نشان می دهد. در شکل (۴)  $(x_w, y_w, z_w)$  دستگاه مختصات محیط و  $(x, y, z)$  مختصات نقطه p در این دستگاه است. O مرکز نوری تصویر شدن است که به فاصله f از صفحه تصویر قرار دارد.  $(X, Y)$  دستگاه مختصات تصویر است که مرکز آن  $O_i$  محل تقاطع صفحه تصویر و محور Z است و موازی محورهای  $x, y$  است.

روابط (۲) و (۶)، برای به دست آوردن اطلاعات عمق، با فرض مدل روزنه ای کامل برای دوربین به دست آمده اند. با این فرض برای نقطه P، اطلاعات تصویر  $(X_u, Y_u)$  مورد نیاز می باشد که به آن مختصات بدون اعوجاج یا ایده آل تصویر می گوئیم. در عمل به جهت وجود اعوجاج شعاعی لنزها، تصویر P در نقطه  $(X_d, Y_d)$  تشکیل می شود که آن را مختصات واقعی نامگذاری می کنیم.  $(X_u, Y_u)$  و  $(X_d, Y_d)$  کمیت های پیوسته می باشند، ولی به جهت ماهیت دیجیتالی صفحات CCD، در عمل مختصات پیکسلی که با  $(X_f, Y_f)$  نشان می دهیم در دست می باشد که در آن  $X_f, Y_f$  شماره سطر و ستون پیکسل تصویر می باشد.

در پروسه کالیبراسیون، از تعدادی نقاط که مختصات آنها در دستگاه  $(X_w, Y_w, Z_w)$  و نیز مختصات پیکسلی آنها در دوربین مشخص است استفاده می شود و با داشتن نقاط و تصویر پیکسلی آنها، پارامترهای داخلی و خارجی که در این نگاشت نقش دارند محاسبه می گردند. در این تحقیق از روش کالیبراسیون Tsai [6] استفاده شده است. در این روش با استفاده از حدود ۶۰ نقطه در محیط و تصویر پیکسلی آنها، تخمین پارامترها صورت می گیرد. روش با اثبات شعاعی بودن اعوجاج لنزها، پارامترها را دسته بندی نموده و در دو مرحله محاسبه می کند. رابطه بین یک نقطه در دستگاه مختصات محیط و مختصات پیکسلی آن طی چهار مرحله مشخص می شود:

**مرحله ۱:** تبدیل از سیستم مختصات محیط  $(X_w, Y_w, Z_w)$  به مختصات 3D سیستم دوربین  $(x, y, z)$  در نقطه O.

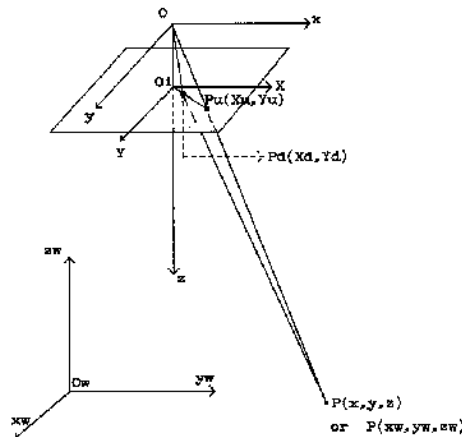
**مرحله ۲:** به دست آوردن مختصات ایده آل تصویر  $(X_u, Y_u)$ ، با داشتن نقطه P در دستگاه مختصات 3D دوربین و با استفاده از تبدیل پرسپکتیو و در نظر گرفتن مدل روزنه ای برای دوربین.

**مرحله ۳:** رفع اثر اعوجاج شعاعی لنزها.

**مرحله ۴:** تبدیل مختصات واقعی  $(X_d, Y_d)$  به مختصات پیکسلی  $(X_f, Y_f)$ .

## ۵-۲ بازسازی خط

پس از انجام کالیبراسیون، اثر اعوجاج لنزها حذف شده و ماتریس های تبدیل از مختصات دوربین به مختصات محیط نیز به دست آمده اند. رابطه (۶) برای به دست آوردن عمق و ماتریس های تبدیل برای بازسازی قابل استفاده می باشد. با توجه به اینکه تصویر هر خط مستقیم بر روی صفحه زمین یک خط مستقیم و یا یک نقطه، در حالتی که خط عمود بر سطح زمین باشد خواهد بود برای بازسازی خط در روی صفحه زمین کافی است که بازسازی برای نقاط ابتدا و انتها انجام شود یعنی تصویر نقطه ابتدا و انتها بر روی زمین به دست می آید و سپس این دو نقطه توسط یک پاره خط به یکدیگر وصل می گردند.



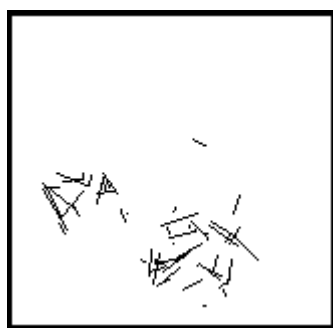
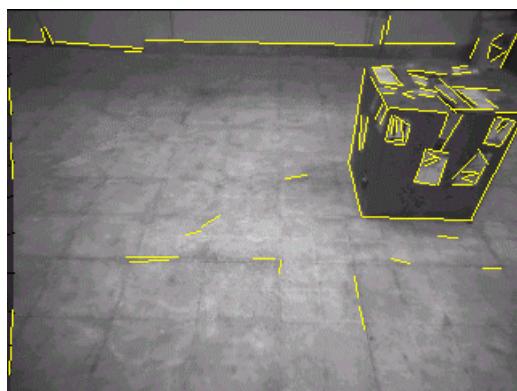
شکل (۴): ارتباط دستگاه مختصات دوربین و دستگاه مختصات محیط و نیز اثر اعوجاج

#### ۶- بستر آزمایشگاهی و نتایج عملی

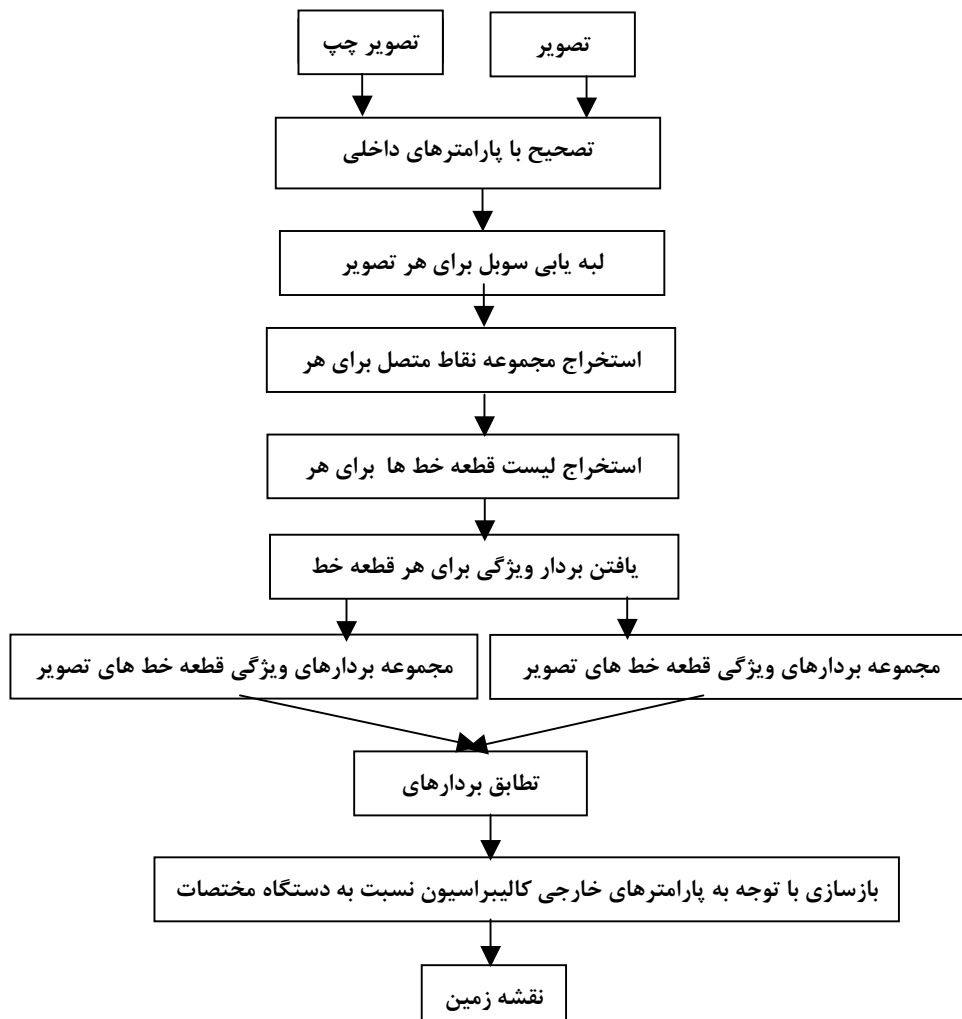
در این تحقیق، دوربین استریوی بکار رفته دوربین MEGA-D است که بر روی یک ربات سیار در ارتفاع حدود ۱/۲ متر نصب شده است. ابعاد CCD های دوربین ۹/۶×۷/۶ میلی متر است که در بالاترین رزولوشن، تصویری با ۹۶۰×۱۲۸۰ پیکسل در اختیار می گذارد. تصویر، به وسیله نرم افزار همراه دوربین، پس از یک مرحله کاهش نمونه ها و سپس متوسط گیری یعنی تبدیل ۴ پیکسل به ۱ پیکسل، به تصویر ۲۴۰×۳۲۰ تبدیل می گردد. فاصله کانونی عدسی دوربین ها ۷/۵ میلی متر است. پروسسور استفاده شده برای اجرای الگوریتم ها یک پنتیوم III با فرکانس ۹۳۳ مگاهرتز است. با توجه به محدوده دید دوربین ها، نقشه زمین در مستطیلی به ابعاد ۲×۳ متر به دست می آید که ربات در وسط ضلع پایین آن قرار دارد. شکل های (۵)، عملکرد الگوریتم را، برای دو صحنه انتخاب شده نشان می دهد. برای هر صحنه در سمت چپ "تصویر چپ" و در سمت راست "تصویر راست" و در زیر آن "نقشه زمین" نشان داده شده است. خطوط استخراج شده برای تصاویر، با رنگ سفید مشخص شده اند. زمان اجرای الگوریتم در صحنه اول ۱۵۵ میلی ثانیه و در صحنه دوم ۲۰۰ میلی ثانیه بوده است. شکل (۶) فلوجارت کلی سیستم را نشان می دهد.

#### ۷- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، تولید نقشه موانع بر روی زمین، با استفاده از بینایی استریو و به منظور ناوبری ربات سیار، ارائه شده است. برای این منظور از یک الگوریتم مبتنی بر ویژگی استفاده شده است. در این الگوریتم، لبه های تصویر به روش لبه یابی سوبل استخراج شده و لبه ها به پاره های مستقیم تقسیم شده اند. برای پاره ها بردار ویژگی به منظور تطبیق پاره خط ها در دو تصویر، محاسبه شده است. در نهایت بازسازی با به دست آوردن تصویر پاره خط های متناظر، نقشه زمین را به دست داده است. از این نقشه در ناوبری ربات می توان استفاده نمود. الگوریتم با استفاده از دوربین MEGA-D و پروسسور پنتیوم III با سرعت 933 MHz مورد ارزیابی قرار گرفته است و نمونه هایی از نقشه های تولید شده ارائه گردیده است. زمان اجرای الگوریتم در نمونه های ارائه شده کمتر از ۲۰۰ میلی ثانیه می باشد که امکان استفاده از این روش را در زمان واقعی و سرعت های معمول نشان می دهد.



شکل (۵) : نتایج اجرای الگوریتم برای تصاویر انتخاب شده



شکل (۶) : فلوچارت کلی سیستم

## ۸- مراجع

- [1] D. Murray, C. Jennings, "Stereo Vision based Mapping and Navigation for Mobile Robots", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1997.
- [2] G. Beccari, S. Caselli, F. Zanichelli, A. Calafiore, "Vision-based line tracking and navigation in structured environments", Computational Intelligence in Robotics and Automation, 1997.
- [3] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, Digital image Processing, Addison Wesley, 19[4] K. Warwick, Robotics: Applied Mathematics and Computational Aspects, Clarendon Press, 1993.

- [5] D. Burschka, S. Lee, G. Hager, “Stereo-Based Obstacle Avoidance in Indoor Environments with Active Sensor Re-Calibration”, Proc. Of IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2002.
- [6] E. Trucco, A. Verri, Introductory Techniques for 3D Computer Vision, Prentice Hall, 1998.
- [7] R. Y. Tsai, “A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the Shelf TV Cameras and Lenses”, IEEE Journal of Robotic and Automation, 1987.