

مروری بر روش‌های تناظریابی در ردیاب‌های ستاره‌ای

فاطمه علی‌دوست^{۱*}، فرزانه دادرسیان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری- گروه مهندسی نقشه‌برداری- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
falidoost@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری فتوگرامتری- گروه مهندسی نقشه‌برداری- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران
fdadrasjavan@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۲، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

چالش اصلی در سنجنده‌های ستاره‌ای، معمولاً در حالتی است که هیچ اطلاعاتی از وضعیت سنجنده وجود ندارد و الگوریتم‌های مورد استفاده در این حالت، باید نسبت به ستاره‌های اشتباه موجود در تصاویر پایدار باشد و بتوانند با سرعت نسبتاً بالا و دقت کافی، وضعیت اولیه‌ی سکوی فضایی یا هوایی را تخمین بزنند. الگوریتم‌های پردازشی در این حالت شامل سه قسمت اصلی است: تعیین مرکز ستاره‌ها در تصویر اخذ شده، تشخیص الگو و شناسایی ستاره‌ها و تعیین وضعیت سکو. هدف اصلی این گزارش، شرح الگوهای ستاره‌ای متفاوتی است که در قسمت تناظریابی و شناسایی ستاره‌ها به کار گرفته می‌شوند. بدین منظور برای ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید، موقعیت‌ها در سیستم مختصات تصویر محاسبه می‌شود و از روی این مختصات، الگوی ستاره‌ها بدست می‌آید. سپس یک کاتالوگ ستاره‌ای راهنما از یک پایگاه داده مرجع استخراج می‌شود که شامل الگوهای ممکن بر اساس الگوریتم مورد استفاده است. اگر الگوی ستاره‌های موجود در تصویر با تنها یک الگو از ستاره‌های موجود در کاتالوگ ستاره‌ای راهنما متناظر شود، پروسه‌ی شناسایی پایان می‌یابد. در این گزارش با مروری بر روش‌های تناظریابی در یک ردیاب ستاره‌ای، سه روش متداول برای تشخیص الگو به نام روش زاویه، روش مثلث مسطح و روش مثلث کروی از نظر حجم محاسباتی، تعداد ستاره‌های مورد نیاز در میدان دید، کارایی روش، نرخ موفقیت و زمان مورد نیاز مقایسه شده‌اند. از بین این سه روش، روش مثلث مسطح، دارای کارایی و موفقیت بیشتر نسبت به روش زاویه، و همچنین بدون پیچیدگی و حجم محاسباتی بالا نسبت به روش مثلث کروی است.

واژگان کلیدی: سنجنده ستاره‌ای، تشخیص الگو، الگوریتم زاویه، مثلث کروی، مثلث مسطح، شناسایی ستاره.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یک سیستم ردیاب ستاره‌ای شامل زیر سیستم‌هایی چون سیستم نوری و پردازش‌های تصویری، سیستم تشخیص الگو و شناسایی ستاره و سیستم تعیین وضعیت است. از این بین، سیستم تشخیص الگو و شناسایی ستاره، شامل یک پایگاه داده از ستاره‌های مرجع به اسم کاتالوگ ستاره‌ای و الگوریتم‌های سریع تشخیص الگو است. وظیفه‌ی این زیر سیستم، تشخیص الگوی ستاره‌های موجود در تصویر اخذ شده و ستاره‌های مرجع موجود در یک کاتالوگ ستاره‌ای به منظور شناسایی ستاره‌های مشاهداتی است. یک کاتالوگ ستاره‌ای، پایگاه داده‌ای است که الگوریتم‌های جستجو برای تناظریابی الگوی ستاره‌ها از آن استفاده می‌کنند و شامل اطلاعاتی از قبیل اسم ستاره، مختصات سماوی ستاره (بعد و میل ستاره)، روشنایی ظاهری و مطلق آن در باندهای مختلف، اطلاعات نورسنجی، اطلاعات مربوط به حرکت خاص ستاره، اطلاعات طیفی و غیره است. کاتالوگ‌های ستاره‌ای در ابعاد مختلف و شامل هزار تا صدها میلیون ستاره هستند که اطلاعات آنها توسط ماهواره‌های خاص یا تلسکوپ‌های زمینی جمع‌آوری شده است [۸،۹،۱۰،۱۱]. می‌توان از مختصات ستاره یا روشنایی ستاره و یا هر دو برای پیدا کردن الگوی ستاره استفاده کرد [۲].

در یک سیستم سنجنده ستاره‌ای، زیرسیستم مربوط به تناظریابی ستاره‌ها، هنگامی که اطلاعات وضعیتی از ماهواره وجود ندارد^۱ یا این اطلاعات محدود است استفاده می‌شود. این زیرسیستم، مدارات CCD را کنترل می‌کند تا تصویری اخذ کند، سپس زیرسیستم تشخیص ستاره را فراخوانی می‌کند تا همه‌ی ستاره‌های تصویر را پیدا کند و در نهایت، بهترین تناظر را با ستاره‌های کاتالوگ از طریق الگوریتم‌های تناظریابی پیدا می‌کند. تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه یافتن بهترین روش تناظریابی در سنجنده‌های ستاره‌ای انجام شده است که در ادامه تعدادی از آنها مرور می‌شود.

در سال ۱۹۹۵، Jacobs به منظور تناظریابی ستاره‌ها، الگوریتمی به نام Ven Bezooijen را ارائه نمود. در این الگوریتم فاصله زاویه‌ای هر جفت ستاره

مشاهده شده با فاصله زاویه‌ای تمام جفت ستاره‌های کاتالوگ مقایسه می‌شود. سپس بردارهای متناظر به سیستم مختصات مناسب برای تعیین وضعیت انتقال می‌یابند. الگوریتم‌های زیادی می‌تواند برای تناظر یابی استفاده شود که سریع‌تر هستند اما اکثر آنها در مورد ستاره‌های اشتباه، دارای معایبی نسبت به روش Ven Bezooijen هستند. طبق نتیجه این تحقیق، تنها الگوریتم Ven Bezooijen در برابر یک یا تعداد زیادی ستاره اشتباه در تصویر، پایدار است [۱۲].

طی سال‌های ۲۰۰۴ الی ۲۰۰۶، Cole و همکارانش سه روش پایه در تشکیل الگو از ستاره‌ها به نام روش زاویه^۲، روش مثلث صفحه‌ای^۳ و روش مثلث کروی^۴ را ارائه و تناظریابی بین ستاره‌های موجود در تصویر با ستاره‌های موجود در کاتالوگ ستاره‌ها را با استفاده از این سه روش با یکدیگر مقایسه نمودند [۴،۷].

در سال ۲۰۰۶، الگوریتمی به منظور شناسایی ستاره‌ها در سنجنده‌هایی از نوع CMOS و CCD برای مأموریت سکوی فضایی در حالت Lost In Space توسط Ying و همکارش توسعه یافت. در این روش، برای داشتن یک شناسایی سریع و قابل اعتماد، از یک پایگاه داده کارا و روش تشخیص الگو به نام تناظریابی چهار ستاره‌ای مستقل از روشنایی استفاده می‌شود. بنابراین در این روش، نیاز به اطلاعات قدر ستاره‌ها نیست. روش تشخیص الگوی ستاره‌ای شامل موقعیت مستقیم جفت ستاره‌های انتخاب شده و روش تناظریابی آرایه‌ای است. استراتژی مورد استفاده برای تناظریابی ستاره تنها یک حد آستانه‌ی ساده و در عین حال قابل اعتماد است. در این روش حجم حافظه مورد نیاز کاهش و سرعت تشخیص بهبود می‌یابد. روش تشخیص الگوی مورد استفاده وقتی که دقت اندازه‌گیری زوایا حداقل ۰/۰۱ درجه باشد، دارای نرخ موفقیت ۹۹/۹ درصدی برای شناسایی ستاره‌ها است [۲].

در سال ۲۰۱۰، Quan و همکارش یک روش جدید برای تشخیص الگوی ستاره‌ای بر اساس الگوریتم تطبیقی کلونی مورچه‌ها^۵ به منظور افزایش سرعت

^۲ Angle Method^۳ Planar Triangle Method^۴ Spherical Triangle Method^۵ Adaptive Ant Colony Algorithm^۱ Lost In Space Mode

در سال ۲۰۱۲، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های شناسایی ستاره در حالت Lost In Space توسط Ho ارائه و عملکرد آنها برای ماهواره‌های کوچک بررسی و مقایسه شده است. در روش ارائه شده، یک الگو به هر ستاره موجود در کاتالوگ بر اساس موقعیت سایر ستاره‌ها در یک شبکه‌ای که در داخل میدان دید قرار داده شده است، اختصاص می‌یابد. در این روش، ابتدا یک ستاره انتخاب و نزدیکترین ستاره همسایه به آن پیدا می‌شود. سپس تصویر اخذ شده به گونه‌ای دوران داده می‌شود که ستاره‌ی انتخاب شده در مرکز میدان دید قرار گیرد و ستاره‌ی همسایه به آن بر روی محور x قرار گیرد. سپس یک بردار با مقادیر صفر و یک، برای هر سلول این شبکه ساخته می‌شود. در صورتی که ستاره در تصویر اخذ شده در داخل این سلول باشد، مقدار بردار برای این سلول برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. سپس الگوی ستاره‌های موجود در تصویر با استفاده از کاتالوگ ستاره‌ها شناسایی می‌شود [۱۵].

۲- تشخیص الگوی ستاره‌ها

به منظور تناظریابی بین ستاره‌های داخل تصویر و ستاره‌های موجود در کاتالوگ ستاره‌ها، نیاز است مجموعه‌ای از اطلاعات منحصر به فرد از تصویر استخراج شود. تناظریابی الگو^۱ شامل انطباق یک الگو برای هر ستاره از کاتالوگ بر اساس موقعیت آن ستاره‌ها در میدان دید است. الگوریتم‌های متفاوتی از نظر دقت و منابع محاسباتی برای تشخیص الگوی ستاره‌ها وجود دارد که مهمترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم زاویه، الگوریتم مثلث کروی و الگوریتم مثلث مسطح است که در فرایند شناسایی ستاره استفاده می‌شوند. در ادامه خصوصیات هر یک از این سه روش، بررسی می‌شود.

۲-۱- روش زاویه

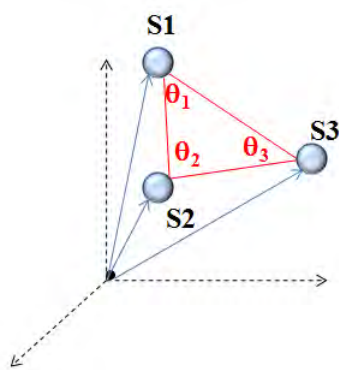
در این روش از زاویه بین بردارهای ستاره‌ای برای تعیین سه تایی‌های ستاره‌ای استفاده می‌شود [۴، ۶، ۷]. شکل ۱ بردارهای ساخته شده توسط دو ستاره و زاویه داخلی آنها را نشان می‌دهد:

تشخیص ستاره در یک سنجنده ستاره‌ای ارائه دادند. در این روش دایره‌هایی ترسیم می‌شود که مرکز هر دایره یک ستاره روشن و شعاع آن فاصله زاویه‌ای مشخصی است. سپس از قابلیت پردازش‌های موازی در الگوریتم کلونی مورچه‌ها استفاده و فاصله زاویه‌ای هر جفت ستاره در دایره محاسبه می‌شود. این فاصله به عنوان مسیری در این الگوریتم در نظر گرفته شده و از خصوصیت بهینه‌سازی الگوریتم برای جستجوی مسیر بهینه در یک دایره استفاده می‌شود. این مسیر بهینه برای تشخیص الگوی ستاره‌ای و افزایش موفقیت تشخیص و سرعت آن به کار گرفته می‌شود. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد در صورتی که خطای موقعیتی حدود ۵۰ اینچ باشد، سرعت موفقیت شناسایی در این روش ۹۸ درصد خواهد بود در حالی که سرعت موفقیت روش شناسایی دلونی فقط ۹۴ درصد است. همچنین زمان شناسایی در این روش تا ۵۰ میلی ثانیه خواهد بود [۱].

مرکز فضایی آلمان، یک سنجنده ستاره‌ای جدید و مدرن را در سال ۲۰۱۱ طراحی کرد که به عنوان سنجنده تعیین وضعیت برای مأموریت ماهواره‌ی SHEFEX استفاده شد. به منظور تعیین مرکز ستاره از روش یافتن متوالی استفاده شده است. همچنین روش جستجو بر مبنای روش بردار k است. الگوریتم شناسایی ستاره به میزان ۹۷ درصد موفق بوده و در برابر ستاره‌های اشتباه، نویز و نرخ‌های زاویه‌ای کوچک پایدار است [۱۳].

در سال ۲۰۱۱، Jalabert و همکارانش به منظور یافتن ستاره‌های متناظر در تصویر اخذ شده و کاتالوگ ستاره‌ها، از الگوریتمی موسوم به الگوریتم Shazam بهره گرفتند. در این روش، الگوهای ستاره‌ای بر اساس یک پترن سه تایی تشکیل می‌شوند که هر سه تایی شامل اطلاعاتی در مورد مثلث تشکیل شده توسط سه ستاره است. سپس برای تناظریابی هر سه تایی در تصویر با سه تایی موجود در کاتالوگ ایجاد شده، از کدهای موسیقی موسوم به hash استفاده می‌شود. هدف اصلی از ارائه این الگوریتم، کاهش تعداد مراحل محاسباتی به منظور ارسال اطلاعات در بالاترین فرکانس و افزایش پایداری محاسبات در برابر پارازیت‌های احتمالی و گوناگون است [۱۴].

^۱ Pattern Matching



شکل ۲- روش مثلث صفحه ای

معادلات ۲ برای محاسبه سه زاویه صفحه‌ای استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arccos\left(\frac{a^2 - c^2 - b^2}{-2cb}\right) \\ \theta_2 &= \arccos\left(\frac{b^2 - a^2 - c^2}{-2ac}\right) \\ \theta_3 &= \arccos\left(\frac{c^2 - a^2 - b^2}{-2ab}\right)\end{aligned}\quad (2)$$

معادلات فوق بر اساس قانون کسینوس ها و برای محاسبه زوایای صفحه ای است [۱۶]. به جای استفاده از سه زاویه صفحه‌ای، می‌توان دو پارامتر مساحت و ممان قطبی در یک مثلث مسطح را به منظور تناظریابی در نظر گرفت [۷]. مجموعه معادلات (۳) برای محاسبه‌ی ممان‌ها و مساحت مورد استفاده قرار می‌گیرند:

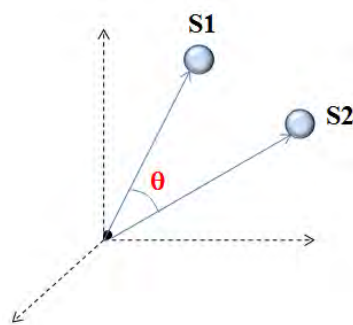
$$\begin{aligned}Area &= \sqrt{S(S-a)(S-b)(S-c)} \\ Moment &= Area(a^2 + b^2 + c^2)/36\end{aligned}\quad (3)$$

که در آن:

$$S = 1/2(a + b + c) \quad (4)$$

متغیرهای a و b و c اضلاع مثلث صفحه‌ای هستند که از رابطه (۵) حاصل می‌شوند.

$$\begin{aligned}a &= \|\vec{V}_1 - \vec{V}_2\| \\ b &= \|\vec{V}_2 - \vec{V}_3\| \\ c &= \|\vec{V}_3 - \vec{V}_1\|\end{aligned}\quad (5)$$



شکل ۱- روش زاویه

به منظور محاسبه زاویه بین بردارها، از ضرب داخلی بین بردارها به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\theta = \frac{\arccos(\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2)}{\|\vec{V}_1\| \cdot \|\vec{V}_2\|} \quad (1)$$

در رابطه فوق، V_1 و V_2 بردارهایی از مبدا سیستم مختصات تا مرکز جرم دو ستاره و θ زاویه داخلی بین این دو بردار است. این بردارها در فضای اینرشیال محاسبه می‌شوند. با این حال، اندازه‌گیری‌ها تنها در سیستم مختصات بدنه سنجنده معلوم است و در فضای اینرشیال اطلاعاتی از این دو بردار وجود ندارد. در این حالت می‌توان زاویه θ را در سیستم مختصات بدنه در نظر گرفت. مشکل اصلی در مورد زاویه θ وجود خطاهای اندازه‌گیری در آن است که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. در صورتی که توزیع اندازه‌گیری‌ها، یک توزیع گوسین باشد، انحراف استاندارد این توزیع می‌تواند محاسبه شود و برای تعیین بازه‌ای که مقدار واقعی اندازه‌گیری‌ها در آن قرار دارد، استفاده شود [۴،۷].

۲-۲- روش مثلث مسطح

این روش بر اساس ساخت یک مثلث صفحه‌ای است. و زوایایی که در داخل مثلث قرار دارند برای پروسه‌ی جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷،۵،۱۶]. شکل (۲) نحوه ساخته شدن مثلث را توسط ستاره‌ها و سه زاویه صفحه‌ای مربوط به آنها نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از همه‌ی این مثلث‌ها با هم جمع می‌شوند تا ممان کل مثلث کروی به دست آید.

$$Moment = \sum \theta^2 dA. \quad (۶)$$

علاوه بر این، مساحت یک مثلث کروی طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$Area = 4 \tan^{-1} \sqrt{\tan \frac{S}{2} \tan \frac{S-a}{2} \tan \frac{S-b}{2} \tan \frac{S-c}{2}} \quad (۷)$$

که در آن:

$$S = 1/2(a + b + c) \quad (۸)$$

متغیرهای a و b و c اضلاع مثلث کروی هستند که از رابطه (۹) حاصل می‌شوند.

$$\begin{aligned} a &= \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_2|}{|\vec{V}_1| |\vec{V}_2|} \right), \\ b &= \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_2 \cdot \vec{V}_3|}{|\vec{V}_2| |\vec{V}_3|} \right), \\ c &= \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{V}_3 \cdot \vec{V}_1|}{|\vec{V}_3| |\vec{V}_1|} \right) \end{aligned} \quad (۹)$$

در رابطه فوق، بردارهای V_1 و V_2 و V_3 نمایش دهنده بردار از مبدا تا ستاره‌ی مورد نظر در سیستم مختصاتی است که بردار ممان در آن اندازه‌گیری می‌شود، این سیستم می‌تواند سیستم مختصات زمین مرکز اینرشیا یا سیستم مختصات دوربین باشد. برای تعیین بازه‌ی خطای اندازه‌گیری، انحراف استاندارد مساحت‌های اندازه‌گیری شده باید محاسبه شود [۴].

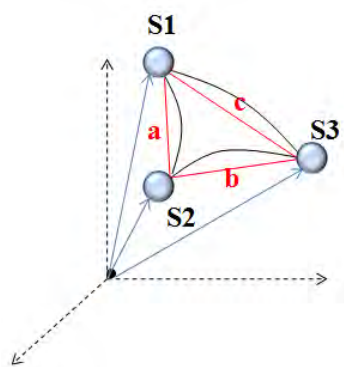
۳- تناظریابی با الگوهای مختلف

الگوریتم‌های مورد استفاده برای تناظریابی می‌تواند در مورد تناظریابی برای یک ستاره یا گروهی از ستاره‌ها اجرا شوند. در مورد یک ستاره، پارامتر مورد استفاده برای تناظریابی بین تصاویر متوالی یا یک تصویر و

برای تعیین بازه‌ی خطای اندازه‌گیری، انحراف استاندارد مساحت‌های اندازه‌گیری شده باید محاسبه شود. دو پارامتر مساحت و ممان قطبی برای هر دو مثلث منحصر به فرد هستند، معمولاً مساحت دو مثلثی که ممان قطبی یکسانی دارند، با هم برابر نیست و بالعکس. در نتیجه تعداد جواب‌های ممکن برای هر دو مثلث متناظر به شدت کاهش می‌یابد. این الگوریتم می‌تواند دارای دو کاربرد باشد: یکی بر روی زمین و برای ساختن جدول جستجو و دیگری در هنگام مأموریت ماهواره در پردازش‌های تشخیص الگو. کاربرد اول در سیستم مختصات زمین مرکز اینرشیا و دومی در سیستم مختصات دوربین یا بدنه سکو می‌تواند باشد [۷].

۲-۳- روش مثلث کروی

این روش نیز همانند روش قبل، بر اساس ممان قطبی و مساحت مثلث‌های کروی یافت شده در تصویر برای تخمین وضعیت سنجنده ستاره‌ای است. ممان قطبی و مساحت مثلث‌ها روی تصویر می‌تواند با مقادیر مشابه آنها که در جدول جستجو ذخیره شده است، مقایسه شوند [۴]. مثلث‌های کروی ساخته شده بین سه ستاره به صورت شکل (۳) خواهد بود.



شکل ۳- روش مثلث کروی

طبق رابطه ۶، ممان قطبی یک مثلث در اطراف مرکز جرم آن و از طریق شکستن مثلث به مثلث‌های کوچکتر محاسبه می‌شود. مساحت هر مثلث کوچک، dA در مربع فاصله کمانی بین مرکز جرم مثلث کوچک و مرکز جرم کل مثلث بزرگ (θ) ضرب می‌شود. سپس

کاتالوگ ستاره‌ای، قدر مطلق در باند مرئی ستاره است. این روش در صورتی که هیچ نویزی در تصویر وجود نداشته باشد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما از آنجایی که این شرط در عمل امکان پذیر نیست از پارامترهای دیگری که بر اساس زوایای داخلی مثلث هستند، در تناظریابی استفاده می‌شود.

به منظور شناسایی ستاره‌ها و تعیین وضعیت سنجنده، نیاز است تا تناظریابی بین الگوی ایجاد شده از ستاره‌های داخل میدان دید و الگوی متناظر آنها در کاتالوگ ستاره‌ها در کمترین زمان و با بالاترین نرخ موفقیت انجام شود. لذا لازم است از روش‌های جستجو و ساختارهای داده‌ای در تناظریابی استفاده شود. در ادامه نحوه تناظریابی بعد از ایجاد و تشخیص الگوی ستاره‌ای، در هر یک از روش‌ها بررسی می‌شود.

۳-۱- تناظریابی روش زاویه

روش معمول مورد استفاده در سنجنده‌های ستاره‌ای برای شناسایی ستاره‌ها، تناظریابی بین زوایای ستاره‌های موجود در میدان دید سنجنده ستاره‌ای با زوایای ذخیره شده در کاتالوگ است [۴،۵،۶]. در حالتی که یک زاویه بتواند متناظر شود، وضعیت سنجنده ستاره‌ای می‌تواند محاسبه شود. برای ایجاد یک کاتالوگ از زاویه‌ها، یک ساختار داده به نام کواد-تری کروی استفاده می‌شود. چنین ساختاری به منظور ذخیره اشیاء در یک فضای دو بعدی استفاده می‌شود به نحوی که هر شیئی بتواند در یک ناحیه مشخص یافت شود بدون اینکه لازم باشد کلیه اشیاء مورد جستجو قرار گیرند. در این روش، ساختار کواد-تری به منظور مرتب سازی کلیه زوایای داخل یک کاتالوگ ستاره‌ای استفاده می‌شود به صورتی که تنها همسایه‌های یک ستاره با شعاع مشخصی از آن مورد بررسی قرار می‌گیرند که آیا زوایای بین آنها تا حدی است که ستاره‌ها داخل میدان دید دوربین قرار گیرند یا خیر. چنین روش جستجویی، باعث کاهش شدید تعداد جفت ستاره‌هایی می‌شود که باید مورد آزمایش قرار گیرند و علاوه بر این زمان ایجاد یک کاتالوگ نیز به شدت کاهش می‌یابد [۴،۷].

هنگامی که کاتالوگ زوایا ساخته شد، بر حسب مقدار زوایا، مرتب می‌شود. برای یافتن کلیه زوایایی که در یک بازه خاص قرار دارند از تکنیکی به نام بردار k

استفاده می‌شود. در صورتی که زاویه بین هر دو جفت ستاره بر حسب موقعیتش در کاتالوگ زوایا بر روی نموداری رسم شود، یک خط می‌تواند اولین و آخرین زاویه را به هم متصل کند. معادله چنین خطی می‌تواند برای تولید بردار k استفاده شود و موقعیت هر زاویه ساخته شده از جفت ستاره‌ها را در کاتالوگ تعیین کند. چنین روشی باعث کاهش بار محاسباتی می‌شود. علاوه بر این جستجو برای هر زاویه تنها در محدوده‌ی کوچکی و نه کل کاتالوگ انجام می‌شود [۲،۴،۷].

• چرخش محور زاویه^۱

در صورتی که بیش از یک راه حل ممکن برای زاویه اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد، یک روش برای تعیین جواب صحیح استفاده از روش چرخش محور^۲ است. بعد از اینکه همه‌ی جواب‌های ممکن برای اولین زاویه تعیین شدند، زاویه دوم در داخل میدان دید دوربین به نحوی انتخاب می‌شود که زاویه‌ی بعدی دارای یک ستاره‌ی مشترک با اولین زاویه باشد. بعد از اینکه کلیه جواب‌های ممکن برای دومین زاویه تعیین شد، ستاره‌هایی که در هر دو زاویه وجود داشتند، بررسی می‌شوند. از آنجایی که جواب صحیح برای هر دو زاویه‌ای است که دارای یک ستاره‌ی مشترک باشند، بنابراین هر زاویه در یک لیست که یک ستاره‌ی مشترک با حداقل یک زاویه در داخل لیست دیگر ندارد، کنار گذاشته می‌شود. بعد از این حذف، در صورتی که تعداد جواب‌های ممکن برای هر زاویه اندازه‌گیری کاهش نیابد، یک چرخش محور دیگر انتخاب و عملیات تکرار می‌شود. زاویه سوم به نحوی انتخاب می‌شود که حداقل یک ستاره مشترک با زاویه دوم داشته باشد و تمام جواب‌های ممکن برای زاویه دوم و سوم که دارای ستاره‌ی مشترک با هم نیستند، حذف می‌شوند. عملیات چرخش محور زاویه تا جایی ادامه می‌یابد که تنها یک جواب برای زاویه مورد نظر پیدا شود و یا اینکه این زوایا از میدان دید سنجنده خارج شوند. در صورتی که قبل از رسیدن به جواب منحصر به فرد، زوایا از میدان دید خارج شوند، نتایج حاصل دارای قاطعیت نخواهند بود.

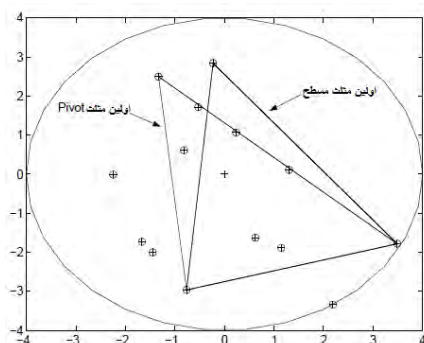
^۱ Angle Pivot

^۲ Pivoting

و ممان قطبی محاسبه شود که باعث افزایش حجم ذخیره اطلاعات حتی بیش از ۱۰ برابر روش زاویه‌ای می‌شود. در این روش نیز برای جستجوی سریع می‌توان از روش جستجوی بردار k استفاده کرد با این تفاوت که به جای برازش یک خط، یک سهمی به نقطه اول و آخر برازش داده می‌شود زیرا در این حالت مساحت هر مثلث در مقابل موقعیتش در لیست مرتب شده دیگر خطی نخواهد بود [۴،۵،۶،۷].

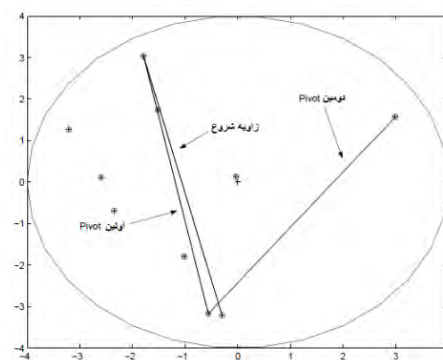
• چرخش محور مثلث مسطح

روش تناظریابی برای مثلث‌های مسطح مشابه روش تناظریابی برای زوایا است. یک مثلث مسطح از سه ستاره در داخل میدان دید ساخته شده است و مساحت و ممان قطبی آن محاسبه شده است. علاوه بر این با کمک محاسبه انحراف استاندارد برای این دو فاکتور، بازه مجاز برای مقادیر آنها به دست آمده است. در نتیجه می‌توان تمام مساحت‌ها و ممان قطبی‌های موجود در کاتالوگ که در داخل این بازه قرار می‌گیرند، برای بررسی جواب، انتخاب شوند. به طور ایده‌آل باید یک جواب منحصر به فرد وجود داشته باشد که در عمل این امر، برقرار نیست. هنگامی که بیش از یک راه حل وجود داشته باشد، باید عملیات چرخش محور مثلث مسطح انجام شود. بعد از تشکیل اولین مثلث و تعیین کلیه جواب‌های ممکن برای آن، دومین مثلث از ستاره‌های داخل میدان دید به محوی انتخاب می‌شود که دو ستاره با مثلث اول اشتراک داشته باشند. در شکل (۵) نحوه عملیات چرخش محور زاویه برای اولین و دومین مثلث مسطح دیده می‌شود [۷].



شکل ۵- چرخش محور مثلث مسطح در میدان دید سنجنده ستاره‌ای [۷]

در شکل زیر نحوه عملیات چرخش محور برای روش زاویه دیده می‌شود [۴،۷].



شکل ۴- روش Pivot زاویه [۷]

روش زاویه، یک روش کم حجم از نظر محاسباتی و بدون نیاز به سایر سنجنده‌های وضعیتی است [۵].

۳-۲- تناظریابی روش مثلث مسطح

به جای اندازه‌گیری زاویه بین جفت ستاره‌ها، در روش مثلث مسطح، بین هر سه ستاره، مثلث‌های مسطح ایجاد می‌شود. ایده اصلی این روش پیدا کردن اطلاعات بیشتر از یک مثلث به جای یک زاویه است در نتیجه سنجنده ستاره ای قادر خواهد بود سریع‌تر و در کل با استفاده از تعداد ستاره‌ی کمتری ستاره‌ها را شناسایی کند. در این روش، مساحت و ممان قطبی مثلث‌ها برای بررسی هر مثلث استفاده می‌شود. یکی از مشکلات این روش این است که به حداقل سه ستاره در داخل میدان دید دوربین نیاز است در حالی که روش زاویه‌ای تنها دو ستاره نیاز دارد. اگر چه به علت وجود خطاهای اندازه‌گیری در یک سنجنده‌ی ستاره‌ای، حتی در روش زاویه نیز به بیش از دو ستاره برای رسیدن به جواب صحیح نیاز است. علاوه بر این می‌توان نشان داد که روش مثلث مسطح به تعداد کمتری از عملیات چرخش محور زاویه نیاز دارد تا به جواب منحصر به فرد برسد، در نتیجه در کل تعداد ستاره‌های مورد استفاده در این روش کمتر خواهد بود. در این روش، برای جستجو در کاتالوگ ایجاد شده، نیاز به روش‌های موثری تری از ساختار کواد-تری کرووی وجود دارد زیرا ترکیب سه ستاره به جای دو ستاره، به شدت تعداد حالت‌های مورد آزمایش را افزایش می‌دهد. برای هر مثلث باید مساحت

یک لیست از جواب‌های ممکن تهیه می‌شود و سپس جواب‌های بین اولین مثلث مسطح و دومین مثلث مسطح با هم مقایسه می‌شود. هر جوابی در این لیست که دارای دو ستاره‌ی مشترک با حداقل یک جواب از لیست دیگر نباشد، حذف می‌شود. بعد از پایان مقایسه، در صورتی که باز هم بیش از یک جواب وجود داشته باشد، محور چرخش دیگری انتخاب شده و عملیات حول آن تکرار می‌شود. این عملیات تا جایی ادامه می‌یابد که تنها یک جواب باقی بماند و یا مثلث دیگری برای اجرای عملیات وجود نداشته باشد. اجرای عملیات با یک ستاره‌ی مشترک بین دو مثلث نیز امکان پذیر است اما به اندازه‌ی کافی موثر نیست. در این حالت تعداد مثلث‌هایی که یک ستاره مشترک دارند، بیش از تعداد مثلث‌هایی است که دو ستاره مشترک دارند، و زمان اجرای عملیات و تعداد عملیات چرخش محور مورد نیاز افزایش می‌یابد [۷].

۳-۳- تناظریابی روش مثلث کروی

این روش بر اساس ممان قطبی و مساحت مثلث‌های کروی یافت شده در تصویر برای تخمین وضعیت سنجنده ستاره‌ای است. ممان قطبی و مساحت مثلث‌ها روی تصویر می‌تواند با مقادیر مشابه آنها که در جدول جستجو ذخیره شده است، مقایسه شوند. نحوه‌ی جستجو و pivoting دقیقاً مشابه با حالت مثلث مسطح است [۴]. الگوریتم تناظریابی مثلث کروی دارای این مزیت نسبت به روش استفاده از زاویه است که اطلاعات بیشتری از یک مثلث کروی بدست می‌آید و با کمک مساحت مثلث و ممان قطبی حاصل از این روش، ابهام‌های به وجود آمده در تناظر یابی کاهش می‌یابد. از معایب این روش افزایش زمان محاسباتی و حجم ذخیره داده است [۵].

در این روش، سه مثلث در میدان دید با مثلث‌های کروی یک کاتالوگ متناظر می‌شود. با استفاده از خصوصیات مساحت و ممان قطبی در یک مثلث کروی امکان کاهش ابهام و به دست آوردن یک جواب منحصر به فرد به شدت افزایش می‌یابد. علاوه بر این عملیات pivoting کمتری نیز لازم خواهد بود [۵].

۴- مقایسه روش‌های تناظریابی

به منظور مقایسه روش‌های تناظریابی توسط Cole، مجموعه‌ای ۱۰۰۰ تایی از وضعیت‌های یک سنجنده ستاره‌ای با مقادیر تصادفی تولید شد. هر روش به طور مجزا آزمایش شد تا دیده شود که آیا حداقل یک زاویه و یا یک مثلث در داخل میدان دید به درستی تعیین می‌شود و یا خیر. با این حال، خروجی الگوریتم تشخیص الگوی ستاره، محاسبه وضعیت نهایی سنجنده نیست، بلکه تنها ستاره‌های تشکیل دهنده الگو (زاویه یا مثلث) را شناسایی می‌کند. در صورتی که تمام ستاره‌های تعیین شده توسط این الگوریتم‌ها واقعا در داخل میدان دید سنجنده قرار گیرند، نتایج، صحیح تلقی می‌شود. اما در صورتی که ستاره‌ای حاصل از خروجی این الگوریتم‌ها در خارج میدان دید قرار گیرد، نتایج رد خواهند شد. در صورتی که الگوریتم نتواند جواب منحصر به فردی تعیین کند، نتایج غیر قاطع خواهند بود. علاوه براین، هر دو روش در مقابل وجود ستاره‌های اشتباه در میدان دید مورد ارزیابی قرار گرفتند [۴،۷]. در جدول (۱) سه روش زاویه، مثلث مسطح و مثلث کروی از نظر pivot مورد نیاز، زمان مصرفی و حساسیت روش به وجود ستاره‌های اشتباه با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- مقایسه آماری سه روش تناظریابی

پارامتر	زاویه	مثلث مسطح	مثلث کروی
حداقل ستاره مورد نیاز	۲	۳	۳
حداقل ستاره مورد نیاز برای موفقیت روش	۳	۴	۴
نرخ کلی موفقیت	٪۶۱	٪۹۴	۹۲
نتیجه غیر قاطع	٪۳۷	٪۵	۶
نتیجه غیر صحیح	کمتر از ٪۱	کمتر از ٪۱	کمتر از ٪۱
متوسط تعداد pivot مورد نیاز	۴/۶۷	۱/۰۹۷	۱/۲۹
متوسط تعداد ستاره مورد نیاز	۶/۶۷۱	۴/۰۹۷	۴/۲۹
متوسط زمان مورد نیاز (ثانیه)	۶/۲۱۷	۱/۰۲۲	۱/۶۵
نتایج صحیح برای ستاره اشتباه	٪۲۵	٪۵۲	٪۵۲
نتایج غیر قاطع برای ستاره اشتباه	٪۵۷	٪۴۲	٪۳۶
نتایج غیر صحیح برای ستاره اشتباه	٪۱۸	٪۵	٪۱۰

حجمی از حافظه است. الگوریتم زاویه ای تنها نیاز دارد دو بردار واحد از دو ستاره و زاویه ای بین آنها را ذخیره کند. در الگوریتم مسطح باید دو نقطه به همراه مساحت و ممان قطبی برای هر مثلث ذخیره شود. علاوه بر این در این الگوریتم ممان قطبی و مساحت سه بردار واحد ستاره باید ذخیره شود. برای الگوریتم مثلث کروی هم به همین صورت است.

نتایج حاصل از آزمایشات نشان می‌دهد که روش مثلث کروی در شناسایی ستاره ۹۲ درصد موفق است در حالی که این مقدار برای روش زاویه ای ۵۵ درصد است. با این حال روش مثلث کروی در بهترین حالت نیاز به حداقل سه ستاره در میدان دید دارد ولی روش زاویه ای تنها به دو ستاره نیاز دارد. در مقایسه این دو روش از نظر زمان محاسباتی، نتایج نشان می‌دهد که محاسبات روش مثلث کروی تنها ۱/۶۵ ثانیه طول خواهد کشید در حالی که روش زاویه ای دارای زمانی برابر با ۶/۸۹ ثانیه است. الگوریتم تناظریابی مثلث مسطح دارای عملکردی مشابه با روش مثلث کروی است. هر دو روش از نظر محاسباتی بسیار کارا تر از روش زاویه ای هستند با این حال به علت پیچیده بودن معادله مثلث کروی، الگوریتم تناظریابی مثلث مسطح کارا تر است. نتایج نشان می‌دهد که روش مثلث مسطح سریع تر و موفق تر از روش زاویه ای است. علاوه بر این، این روش در برابر ستاره های اشتباه به مراتب کارا تر است. هر دو روش مستقل از سایر سنجنده های وضعیتی هستند و می‌توانند در مد *lost in space* استفاده شوند.

علاوه بر این توانایی دو الگوریتم مثلث کروی و مسطح در برابر روش زاویه ای در [۴] و [۷] مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول (۲) ارائه شده است. طبق این جدول، روش مثلث مسطح اغلب دو برابر موفق تر از روش زاویه است. علاوه بر این در صورت محدود کردن تعداد عملیات *pivot* به منظور کاهش زمان اجرا، روش مثلث مسطح پنج برابر سریع تر از روش زاویه خواهد بود. علاوه بر این روش مثلث مسطح در کل به تعداد ستاره ای کمتری (۴/۰۹۷ ستاره) نسبت به روش زاویه (۶/۶۷۱ ستاره) دارد. در حالتی که ستاره ای اشتباهی وجود نداشته باشد، تعداد نتایج نادرست هر دو روش با هم برابر است. همچنین در صورتی که ستاره ای اشتباهی به داخل میدان دید اضافه شود، دقت هر دو روش کاهش می‌یابد، اما برای روش مثلث مسطح، این کاهش دقت به مراتب کمتر است [۷].

روش مثلث کروی اغلب دو برابر موفق تر از روش زاویه است. علاوه بر این در صورت محدود کردن تعداد عملیات *pivot* به منظور کاهش زمان اجرا، روش مثلث کروی چهار برابر سریع تر از روش زاویه خواهد بود. علاوه بر این روش مثلث کروی در کل به تعداد ستاره ای کمتری (۴/۲۹ ستاره) نسبت به روش زاویه (۶/۸۶ ستاره) دارد. در حالتی که ستاره ای اشتباهی وجود نداشته باشد، تعداد نتایج نادرست هر دو روش با هم برابر است. همچنین در صورتی که ستاره ای اشتباهی به داخل میدان دید اضافه شود، دقت هر دو روش کاهش می‌یابد، اما برای روش مثلث کروی، این کاهش دقت به مراتب کمتر است [۴].

۵- نتیجه گیری

از بین این الگوریتم ها، الگوریتمی با بهترین عملکرد بر اساس حجم محاسباتی، میزان حافظه مورد نیاز و زمان اجرا برای ردیاب ستاره ای انتخاب می‌شود. محاسبات الگوریتم زاویه ای خیلی آسان است و توان محاسباتی خیلی کمی دارد. هر دو الگوریتم مثلث مسطح و مثلث کروی نیاز به محاسبات بیشتری نسبت به الگوریتم زاویه ای دارند. مشکل ترین الگوریتم، الگوریتم مثلث کروی است زیرا دارای محاسبات بازگشتی برای تعیین ممان قطبی است. علاوه بر این هر الگوریتم نیازمند

جدول ۲- نمودارهای آماری مقایسه سه روش تناظریابی زاویه، مثلث مسطح و مثلث کروی [۴،۷]

آزمون	زاویه	مثلث مسطح	مثلث کروی
<p>نتایج کلی روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>توزیع نتایج روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>توزیع نتایج روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>توزیع نتایج روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>
<p>pivot مورد نیاز روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>زمان CPU مورد نیاز روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>زمان CPU مورد نیاز روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>زمان CPU مورد نیاز روش‌ها بدون محدودیت pivot</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>
<p>نتایج روش‌ها با وجود ستاره اشتباه در میدان دید</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>نتایج روش‌ها با وجود ستاره اشتباه در میدان دید</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>نتایج روش‌ها با وجود ستاره اشتباه در میدان دید</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>	<p>نتایج روش‌ها با وجود ستاره اشتباه در میدان دید</p> <p>نتیجه صحیح ستاره های خیلی زیاد نتایج غیر قاطع نتایج غیر صحیح</p>

- [1] W. Quan, J. Fang, "A Star Recognition Method Based on the Adaptive Ant Colony Algorithm for Star Sensors", *Sensors*, Volume 10, Issue 3, Pages 1955-1966, 10 March 2010..
- [2] D. Ying, X. Fei, Y. Zheng, "Brightness Independent 4-Star Matching Algorithm for Lost-in-Space 3-Axis Attitude Acquisition", *Tsinghua Science & Technology*, Volume 11, Issue 5, Pages 543-548, October 2006..
- [3] Jer-Nan Juang, "An Efficient and Robust Singular Value Method for Star Pattern Recognition and Attitude Determination", Langley Research Center, Hampton, Virginia, Hye Young Kim and John L. Junkins, Texas A&M University, College Station, Texas, NASA/TM-2003-212142, January 2003..
- [4] g L. oole, John L. aaassidis, aaæt tt aa aattennee cogniiion ss ing ppheiiical Tii angles", 2004..
- [5] AAAA M. UUFFMA,, ssssigning aaar Trackers to Meet Micro-saedliee qq quieements,, uu bmitted oo hre department of aeronautical and astronautical engineering in partial fulfillment of the degree of master of science in aeronautics and astronautics at the Massachusetts institute of technology, May 26, 2006..
- [6] Jack A. Tappe, "Development of Star Tracker System for Accurate Estimation of ppacecratt ttt iude,, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY, CALIFORNIA, December 2009..
- [7] iiiii g L. oole, John L. ssssidis, aaæt tt aa aattenn eeogniiion ss ing lanaT iit angles", 2006..
- [8] ESA, "The Hipparcos and Tycho Catalogues, Section 1.1 Introduction to the Hipparcos and Tycho ttt alogues,, ESA SP-1200, 1997.
- [9] F. Verbunt, R. H. van Gent, TThee ediiions of the saa catalogue of Tycho aaah, Machine-readable versions an. compaiison wi h h h e modern ii ppacos aa alogue,, eeecht nn ivessyy, ss oooomy & Astrophysics, DOI: 10.1051/0004-6361/201014002, A&A 516, A28, 2010.
- [10] Barry M. Lasker, et. al., TEE OOOODD-GENERATION GUIDE STAR CATALOG: DESCRIPTION AND OOCRRRT,,,, ss,,, nomical Jounral, American Astronomical Society, doi:10.1088/0004-6256/136/2/735, 136:735-766, 2008 August.
- [11] .. eebbunt , van Gent, TThe saa caadogue of vv v elius Machine-readable version and comparison with the modenn pppparcos Caadogue,, Asoooomy & ss rrophysics, OO:: 101051/0004-6361/201014003, A&A 516, A29, 2010.
- [12] Jacobs M. J., A Low Cost High Precision Star Sensor. 1995.
- [13] Samaan M., Theil S., Development of a Low Cost Star Tracker for the SHEFEX Mission. Aerospace Science and Technology, In Press, 2011.
- [14] Jalabert E., Fabacher E., Guy N., Lizydestrez S., Rappin W., Rivier G., Optimization of Star Research Algorithm for ESMO Star Tracker. In: 8th International ESA Conference on Guidance, Navigation and Control Systems - GNC 2011, Karlovy Vary, Czech, 2011.
- [15] Ho K., A Survey of Algorithms for Star Identification with Low-cost Star Trackers. *Acta Astronautica*, v. 73, 2012, pp. 156-163.
- [16] eenneth nnniel Diaz, eeefformance nnalysis of a ii xed ooint tt ar Taæker ll goiihm oo ss e Onboadd a ii cosaedlite,, uugust 2006.

