

Automatic Star Identification Using Triangle Base and Increase Search Speed

H. Sedaghat¹, A. R. Toloie^{2*} and H. Ghanbarpoor³

1. Department of Aerospace Engineering, Malek_Ashstar University of Technology

2, 3-Department of Aerospace Engineering, New Technology Shahid Beheshti University

*Evine St., Tehran, IRAN

hasan8642@yahoo.co

A current method by which star trackers identify stars is to match the angles between stars within its field of view to angles stored in a catalog. If an angle can be matched to one pair of stars, the attitude of the star tracker can be determined. However, the measurement of the angle will include error, and so the true angle can only be known to lie within a certain measured range. The result is, after comparing the measured angle to the catalog of angles, more than one pair of stars can be the correct solution. A method for narrowing down to one solution involves employing many angles within the field of view in a certain order, called "pivoting," which can be time consuming and does not always yield a solution. another method presented here matches planar triangles made from sets of three stars within the field of view to planar triangles stored within a catalog. By using both the area and polar moment properties of the planar triangle, the range of possible solutions is very quickly narrowed, fewer pivots to other planar triangles are required, and the method is more likely to yield the correct solution than the angle method. New method presented here use these two methods simultaneously, first, by angle method candidate some stars to identification. In this level reduces stars in FOV. Second, by triangle method in fewer time identification completed, because FOV is smaller. So this new method is faster than triangle and more accurate than angle method and we do not pivoting the same as each method. In addition, Simulation results show the performance of the new method as well as its robustness with respect to including false stars.

Keywords: star identification algorithm, triangle method, angle method, pivoting

1. M. Sc. Graduate

2. Assistant Professor (Corresponding Author)

3. PhD

شناسایی اتوماتیک ستاره به روش مثلثی و افزایش سرعت جستجوی آن

حسن صداقت^۱، علی رضا طلوعی^{۲*}، حبیب قنبر پور^۳

۱- دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه مالک اشتر

۲ و ۳- مهندسی فضایی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی

*تهران، خ. اوین

hasan8642@yahoo.com

یک روش متداول در جستجوگرهای ستاره‌ای برای شناسایی ستاره‌ها هم‌تناسازی زوایای بین ستاره‌های موجود در میدان دید با زوایای ذخیره شده در کاتالوگ است. اگر یک زاویه با یک جفت ستاره هم‌تا شود، وضعیت جستجوگر ستاره را می‌توان تعیین کرد. با وجود این، اندازه‌گیری زوایا با خطا همراه است، بنابراین پاسخ صحیح در یک بازه قرار می‌گیرد و نتیجه آن بعد از مقایسه زوایای اندازه‌گیری شده با کاتالوگ این است که بیشتر از یک جفت ستاره صحیح پیدا می‌شود. یک روش برای همگراکردن سریع پاسخ، روش اشتراک‌گیری است، که بسیار زمان‌بر است و رسیدن به پاسخ صحیح را تضمین نمی‌کند. روش دیگری که اینجا معرفی شده، روش مثلثی است. در این روش، مثلث‌های مسطح به‌وجود آمده از ترکیب‌های سه ستاره‌ای با مثلث‌های موجود در کاتالوگ ستاره‌ها از نظر مساحت و ممان قطبی مقایسه شده و هم‌تاهای مناسب پیدا شده‌اند. بنابراین استفاده از این دو خاصیت باعث همگرایی سریع‌تر پاسخ شده و مانند روش زاویه از اشتراک‌گیری بهره گرفته شده است. روش جدیدی که در اینجا ارائه شده، استفاده هم‌زمان از دو روش زاویه و مثلث است. ابتدا با استفاده از روش زاویه، تعدادی از ستاره‌های موجود در کاتالوگ را برای ستاره‌های مورد نظر در میدان دید کاندیدا می‌کنیم، سپس با استفاده از روش مثلث ستاره‌های صحیح را انتخاب می‌کنیم. این ترکیب باعث افزایش سرعت الگوریتم جستجو نسبت به روش مثلثی می‌شود زیرا حجم محاسبات را بسیار کاهش داده و دقت آن نیز به مراتب نسبت به روش زاویه بالاتر است. این روش در مقابل ستاره‌های اشتباه در میدان دید نیز مقاومت بیشتری نسبت به هرکدام از روش‌ها دارد. دستورالعمل‌های اخیر، به‌طور مشخص برای دوربین‌های ستاره‌ای نسل دوم توسعه داده شده‌اند، در واقع این دستورالعمل‌ها گسترشی است از دستورالعمل‌هایی که در اوایل دهه ۸۰ میلادی توسط جانکنینز، تورنر و وایت، که در این زمینه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم جستجوی ستاره، کاتالوگ ستاره، روش مثلثی، اشتراک‌گیری

مقدمه

می‌شوند، الگوریتم‌های گم‌شده در فضا، که در آنها اطلاعاتی در مورد موقعیت فضاییما در دست نیست، و الگوریتم‌های بازگشتی^۵، که اطلاعات مربوط به موقعیت را دارند. این الگوریتم‌ها از زوایای بین ستاره‌ای، قدر ستاره و برخی روابط بین این مقادیر برای تشخیص ستاره‌ها استفاده می‌کنند. شناسایی ستاره فقط یک مرحله

نیاز به اطلاعات موقعیت (جهت‌گیری) فضاییما انگیزه اصلی اختراع بسیاری از ابزارها و الگوریتم‌ها، به‌خصوص فرآیند شناسایی اتوماتیک ستاره‌هاست. این الگوریتم‌ها به دو دسته اصلی تقسیم

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. استادیار (نویسنده مخاطب)

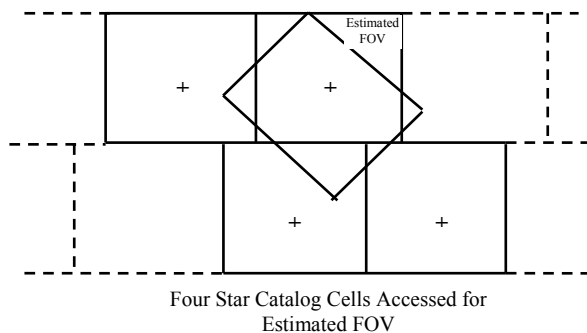
۳. دکتری

4. Lost-In-Space
5. Recursive

پیشینه تحقیقات انجام شده

بعد از اولین جستجوگرهای ستاره که با دوربین‌های مجهز به CCD و توسط سالامون^۷ در سال ۱۹۷۶ در JPL [۵]، جانکینز^۸، ترنر^۹، استریکورد^{۱۰} [۶ و ۷] و دیگران توسعه داده شدند، کار بر روی الگوریتم‌هایی که توانایی شناسایی ستاره در زمان واقعی^{۱۱} را دارند، شروع شد. هنگامی که آنها مزایای استفاده از زوایای بین ستاره‌ها را فهمیدند، مشکل اصلی، هم‌تاسازی آیت‌های بین ستاره‌ای در پایگاه داده‌ها بود. بعد از چندین سال کار و ارائه مقالات مختلف، جانکینز مقاله‌ای با عنوان «تشخیص الگوی ستاره و تعیین موقعیت فضاپیما» را در سال ۱۹۸۱ چاپ کرد [۸]. همچنین این الگوریتم توانایی شناسایی ستاره‌های سه قلو (مثلی) را داشت، که دارای محدودیت‌های اولیه از نظر تخمین اولیه موقعیت فضاپیما قبل از شروع به کار در زمان واقعی بود که علت آن استفاده جانکینز از زیر کاتالوگ‌های آسمان بود. شکل (۱)، که هر کدام نشان‌دهنده بخشی از آسمان‌اند (برای تسریع سرعت محاسبه). بنابراین این روش برای حالت‌هایی که ستاره وجود ندارد پرقدرت عمل می‌کند چون شامل تمام حالت‌های ترکیبی قابل مشاهده است.

در سال ۱۹۸۶، گروس^{۱۲} [۹] روشی جدیدتر را برای جستجوی ستاره‌ها در زیر کاتالوگ‌ها ارائه داد که در آن جای‌گشت‌های ثابت اضلاع مثلث نظیر لگاریتم محیط مثلث را طبقه‌بندی می‌کرد.



شکل ۱- زیر کاتالوگ‌ها، هم ساین میدان دید

گروس پذیرفته بود که الگوریتم آن با چندجمله‌ای‌های مرتبه بالا از n اجرا می‌شود- بیشتر از آنچه در روش جانکینز بود. اما تعداد فاکتورهای ثابت در الگوریتم گروس کمتر است.

در فرآیند تعیین وضعیت فضاپیماست. اولین الگوریتم‌ها برای اندازه‌گیری بردارهای مختصات بدنی برای مشخص کردن موقعیت ستاره‌ها هستند. هدف اولیه فرآیند شناسایی ستاره، تبدیل بردارهای مختصات بدنی به بردارهای مختصات اینرسی است. الگوریتم‌های ثانویه نشان‌دهنده تبدیلات مناسب است تا موقعیت فضاپیما تعیین شود. هنگامی که ستاره‌ها با دوربین مجهز به سیستم CCD رؤیت شدند، اطلاعات لازم برای فرآیند شناسایی نظیر قدر و فاصله زوایای بین ستاره‌ها در دسترس‌اند.

مأموریت شناسایی ستاره چهار قسمت دارد: ابتدا، الگوریتم باید بردارهای بدنی و قدر را دریافت کند. سپس، پایگاه داده‌ها، هم‌تاهایی برای ستاره‌های موجود پیدا کند، در سومین مرحله ستاره‌های صحیح تخمین زده می‌شود و در آخر تخمین موقعیت با استفاده از روش بازگشتی تکرار می‌شود. الگوریتم‌ها دارای سه بخش زیر هستند:

مرحله استخراج خصوصیات (پارامترهای لازم برای مقایسه عکس با کاتالوگ)

جستجوی پایگاه داده‌ها

کاربرد آنها از نظر خواص الگوی انتخابی ستاره‌ها براساس تعداد ستاره‌های مورد استفاده در الگو بعد از اولین جستجوی ستاره با دوربین‌های مجهز به CCD، الگوریتم‌هایی که توانایی شناسایی ستاره در زمان واقعی^۶ را دارند، شروع می‌شود. بعد از اینکه زوایای بین ستاره‌ها مشخص شد، نوبت هم‌تاسازی آیت‌های بین ستاره‌ای در پایگاه داده‌هاست. الگوریتم‌های مختلفی نظیر روش زاویه، مثلی، هرمی و ... در این زمینه ارائه شده‌اند. هدف اصلی از به‌وجود آمدن این الگوریتم‌ها رسیدن به سرعت و دقت بالاتر و حجم کمتر اطلاعات ذخیره شده است. در این مقاله روش جدید ترکیبی ارائه می‌شود که نتیجه آن افزایش سرعت و دقت در فرآیند شناسایی است و نحوه کار بدین ترتیب است:

آسمان را با توزیع تصادفی ۲۰۰۰ ستاره

فرض میدان دید دوربین (0.25×0.25)

پنج ستاره بزرگ‌تر را انتخاب و ارزیابی می‌کنیم.

این ستاره‌ها به روش زاویه، مثلث و روش جدید ترکیبی مورد شناسایی می‌شوند و از نظر زمان مورد نیاز، تأثیر نویز و دقت نیز با هم مقایسه می‌شوند [۲].

7. salomon

8. Junkins

9. Turner

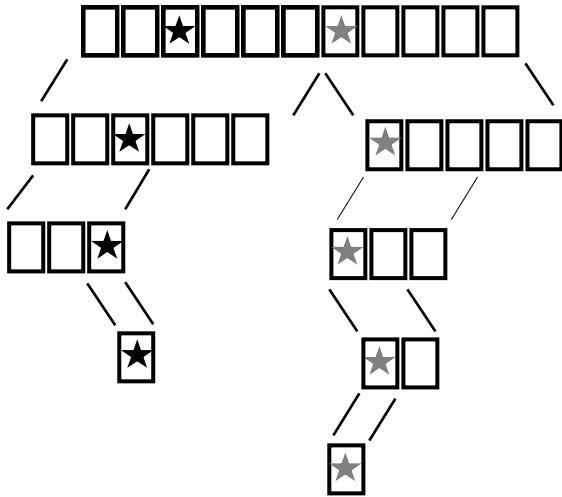
10. Strikwerda

11. Real-Time

12. Groth

6. Real-Time

(شکل ۲). او از روش انتخاب دو ستاره نزدیک لیب برای تشکیل الگو، و تشکیل پایگاه داده استفاده می‌کرد (بجای استفاده از تمام ستاره‌های مشاهده شده). با وجود اینکه این عمل زمان‌بر است ولی در مقایسه برای مقادیر بزرگ n مناسب‌تر است.



شکل ۲- درخت دودویی کوین

در سال ۲۰۰۷، گوانگ جان^{۱۹} [۱۵] روش جدیدی را ارائه کرد، مشابه روش لیب، که از زوایای بین ستاره‌ای و زاویه به وجود آمده توسط دو ستاره با ستاره مرکزی استفاده می‌کند که با استفاده از جستجوی پایگاه داده خطی و مقایسه بیت به بیت، از نظر زمانی مناسب است.

در سال ۲۰۰۸، کولومنکین^{۲۰} [۱۶] روی الگوریتم جستجوی کمتر، بهینه‌سازی‌هایی را انجام داد تا زمان مورد نیاز برای جستجوی بردار k را کاهش دهد.

شبیه‌سازی داده‌های جستجوگر ستاره

جستجوگر ستاره، ابزاری است برای عکس‌برداری از آسمان است. این جستجوگر با دوربین‌های مجهز به CCD از ستارگان عکس‌برداری می‌کند. سپس عکس گرفته شده توسط نرم‌افزارهایی تحلیل و به خروجی مورد نظر در مختصات مناسب تبدیل می‌شود. پس از آن الگوریتم‌های شناسایی، کاتالوگ مورد نظر از ستاره‌های موجود را در میدان دید تشکیل می‌دهد و با کاتالوگ موجود در حافظه رایانه مقایسه می‌کند. نمودار این الگوریتم در شکل‌های (۳) و (۴) آورده شده است.

در سال ۱۹۸۷ ساساکی^{۱۳} [۱۰] و سایر محققان نشان دادند که چگونه می‌توان زمان جستجو را با استفاده از مساحت مثلث‌های ستاره‌ای و جمع شدت روشنایی به عنوان علائم اولیه در شناسایی ستاره به کار برد. روش او چگونگی جستجو در پایگاه داده‌ها را توضیح نمی‌داد و فقط نیاز به تعداد ستاره‌های انتخاب شده از پایگاه داده‌ها با استفاده از روش‌های موازی، سریال یا مشابه را داشت.

بعد از آن در سال ۱۹۸۹، آقای ون بزویجن^{۱۴} [۱۷] در مقاله‌اش نشان داد که سرعت الگوریتم شناسایی ستاره با استفاده از اطلاعات اضافه موجود در کاتالوگ ستاره می‌تواند افزایش یابد. او به طور مستقیم روی رابطه بین تعداد ستاره‌ها و مقدار اطلاعات در دسترس از الگوی ستاره با تعداد ستاره‌های مشخص کار کرد. متأسفانه در اجرای روش او، برخی مواقع، فضایما مجبور بود برای دیدن ستاره‌ها بچرخد، که این نقص بزرگی به شمار می‌آمد.

در سال ۱۹۹۱، همراه با جانکینز و گروه مشاورانش، دیوید اندرسون^{۱۵} [۱۱] به ابهامی در ماتریس جایگشت مثلث‌ها و پارامترهای الگوی ستاره که بین ستاره‌های انتخاب شده مستقل بودند، اشاره کردند. با توجه به آزمون و خطای الگوی مثلثی، اندرسون پیشنهاد استفاده از یک عملگر آرایه‌ای را در ماتریس جایگشت داد، که باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم می‌شد.

در سال بعد، لیب^{۱۶} [۱۲] ارتباط مهمی از فرآیند انتخاب خواص با زمان جستجوی پایگاه داده‌ها پیدا کرد، که مشکل حالت گم شده در فضا را حل کرد. لیب پیشنهاد داد که از نزدیک‌ترین دو ستاره به عنوان ستاره انتخاب شده در الگوی ستاره‌ها استفاده شود، و فاصله زاویه‌ای بین آنها به عنوان پارامتر مشخصه، همانند شکل (۶)، در نظر گرفته شود. در روش لیب، پایگاه داده‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه زمان جستجو در آن نیز کاهش می‌یابد. در روش او فقط از زوایای بین ستاره‌ای استفاده شده و توجهی به قدر آنها نشده است.

بعد از آن در سال ۱۹۹۵، شل^{۱۷} [۱۳] روش بسیار مستقیم‌تر را ارائه کرد. زوایای بین ستاره‌ای به همراه روشنایی آنها، که تعداد جایگشت‌ها را هنگامی که از سه ستاره استفاده می‌کنیم کاهش می‌دهد. متأسفانه سائز کاتالوگ در روش شل بزرگ است، که برای تکنیک‌های جستجو مناسب نیست.

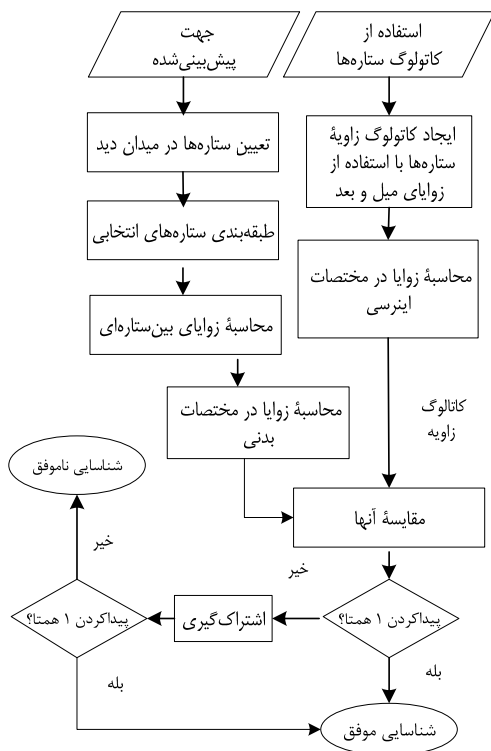
در سال ۱۹۹۶ کوین^{۱۸} [۱۴] اولین کسی بود که مشکل جستجوی پایگاه داده را بررسی کرد، و نشان داد که روش درخت دودویی در جستجوی پایگاه داده از نظر زمانی مناسب است

13. Sasaki
14. Van Bezooijen
15. David Anderson
16. Liebe
17. Scholl
18. Quine

19. Guangjun
20. Kolomenkin

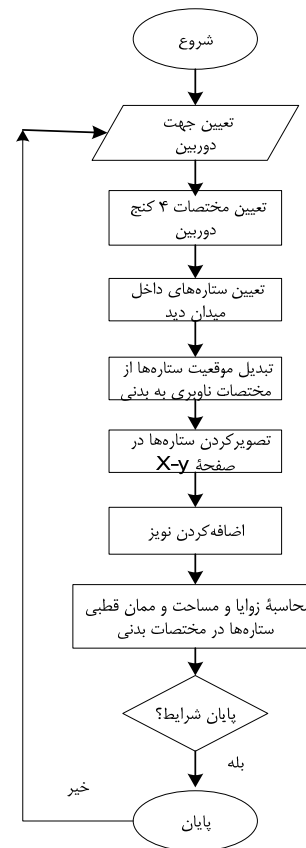
الگوریتم زاویه

در این روش با استفاده از زوایای بین بردارهای یک ستاره‌ها و مقایسه آنها با زوایای ذخیره شده در کاتالوگ ستاره‌ها، ستاره موردنظر پیدا می‌شود. روش بسیار شناخته‌شده که شامل هم‌تاسازی اختلاف زاویه‌ای جفت ستاره‌ها بین ستاره‌های میدان دید و کاتالوگ است برای تشکیل کاتالوگ زاویه‌ها، از یک ساختار داده به نام درخت چهارتایی^{۲۱} [۱۸] فضایی استفاده می‌کنند. این ساختار برای ذخیره موقعیت در فضای دو بعدی به‌صورتی که قابل شناسایی بدون امتحان هر کدام از آنها باشد، به‌کار می‌رود. از این ساختار برای این استفاده می‌شود که کاتالوگ زاویه‌های هر ستاره در هم‌سایگی در فاصله کمتر از مقدار موردنظر باشد که به‌شدت مقدار نهایی تعداد جفت‌های مورد نیاز برای امتحان کردن و زمان مورد نیاز برای تشکیل کاتالوگ را کاهش می‌دهد [۳-۱].

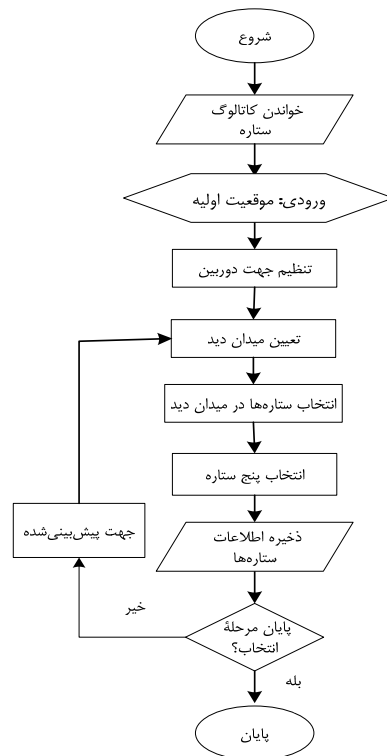


شکل ۵- نمودار روش زاویه

هنگامی که زاویه‌ها تبدیل به کاتالوگ شدند، آنها را مرتب می‌کنیم. برای پیدا کردن سریع تمام زاویه‌های موجود در یک محدوده، از یک تکنیک به نام بردار- k ^{۲۲} استفاده می‌شود. اگر زاویه بین هر جفت ستاره بر اساس موقعیت آن در کاتالوگ رسم شود، یک خط این دو

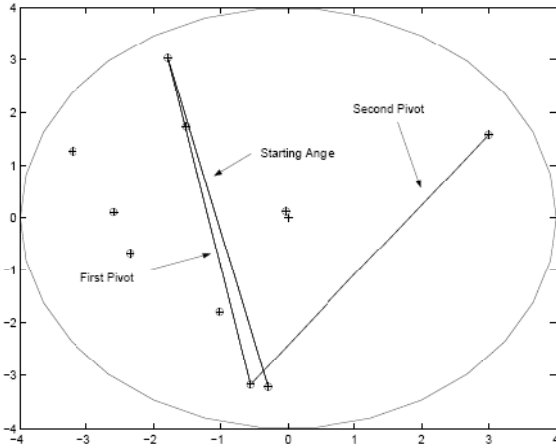


شکل ۳- نمودار فرآیند انتخاب و تشکیل کاتالوگ ستاره



شکل ۴- نمودار نحوه تولید داده‌های جستجوگر ستاره از ستاره‌های انتخاب شده

21. quad-tree
22. k-vector



شکل ۷- فرآیند اشتراک‌گیری زوایا در روش زاویه

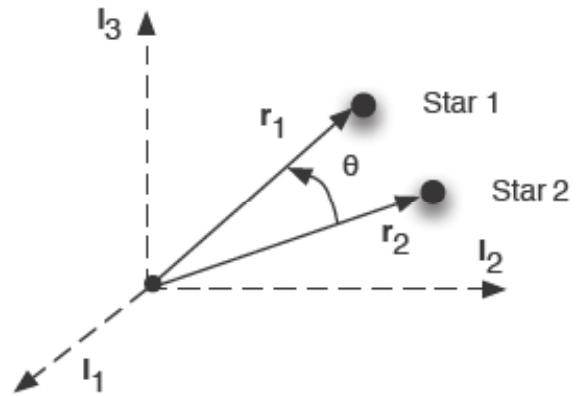
الگوریتم مثلثی

در این روش که به دو دسته مثلث مسطح و کروی تقسیم می‌شود، مساحت و ممان سطح مثلث‌هایی را که از اتصال سه ستاره به دست می‌آیند اندازه‌گیری کرده و با مقادیر ذخیره‌شده در کاتالوگ مقایسه می‌کنیم (شکل ۸). در این روش نیز از بردار K و اشتراک‌گیری برای دسترسی سریع‌تر و دقیق‌تر به پاسخ می‌توان استفاده کرد. این روش نسبت به روش قبلی به پاسخ‌های دقیق‌تری می‌رسد [۲-۱].

بجای اندازه‌گیری زاویه بین جفت ستاره‌ها، روش صفحه‌ مثلثی، یک صفحه‌ مثلثی از سه ستاره تشکیل می‌دهد. ایده آن این است که اطلاعات بیشتری از یک مثلث مسطح نسبت به یک زاویه به دست می‌آید، که امکان شناسایی سریع‌تر را با تعداد نهایی ستاره کمتر به جستجوگر ستاره می‌دهد. در الگوریتمی که اینجا اشاره می‌کنیم، از ممان قطبی و سطح مثلث برای مشخص کردن ستاره‌ای که در جستجوگر مورد بررسی است، استفاده می‌شود. یک نکته منفی این روش عدم کارایی آن با کمتر از ۳ ستاره در میدان دید آن است، در حالی که در روش زاویه به دو ستاره نیاز است. بعد از خطای اندازه‌گیری جستجوگر، معمولاً بیشتر از دو ستاره در روش زاویه مورد نیاز است. چیزی که مشاهده می‌شود این است که در روش مثلثی ستاره‌های مشترک کمتری مورد نیاز است که در نهایت نسبت به روش زاویه به تعداد کمتری ستاره برای رسیدن به پاسخ صحیح نیاز دارد.

همانند روش زاویه، مثلث‌ها باید با سطح و ممان قطبی نظیر بردار k ذخیره شوند تا با این مشخصات سریع‌تر در دسترس قرار گیرند. بنابراین دو کاتالوگ مجزا مورد نیاز نیست، دو فهرست متصل ساختار داده به‌جای الگوی مثلثی استفاده می‌شوند.

ستاره را به یکدیگر متصل می‌کند. معادله این خط معرف بردار k برای نشان‌دادن موقعیت ستاره در کاتالوگ با زاویه مشخص است.



شکل ۶- روش محاسبه زوایای بین ستاره‌ها

زاویه بین دو ستاره

زاویه بین بردارهای ستاره‌ها از رابطه (۱) به دست می‌آید. که r_1 و r_2 بردارهای یکه آن ستاره‌اند.

$$\theta = \cos^{-1}(r_1 \cdot r_2) \quad (7)$$

بردارهای r_1 و r_2 در فضای اینرسی‌اند. بنابراین، فقط اندازه‌ها در مختصات بدنی در دسترس‌اند. زاویه θ نیز مانند بردارهای اینرسی و بدنی استفاده می‌شود.

زاویه مشترک

اگر بیشتر از یک پاسخ ممکن برای زاویه اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد، روشی را که مشخص‌کننده پاسخ صحیح است روش زاویه مشترک نامند. بعد از مشخص شدن تمام پاسخ‌های ممکن برای اولین زاویه، زاویه دومی در میدان دید انتخاب می‌شود؛ به طوری که یک ستاره مشترک با زاویه اول داشته باشد. زمانی که تمام پاسخ‌های ممکن برای زاویه دوم مشخص شدند، ستاره‌هایی که هر دو زاویه را ارضا می‌کنند امتحان می‌شوند. هر زاویه‌ای که ستاره مشترک با یکی از این دو زاویه نداشته باشد حذف می‌شود. اگر تعداد پاسخ‌ها به یک کاهش نیافت از ستاره مشترک دیگری استفاده می‌شود. زاویه سوم یک ستاره مشترک با زاویه دوم دارد و پاسخ‌هایی که ستاره مشترک با زوایای دوم و سوم نداشته باشند حذف می‌شوند. این روند تا رسیدن به پاسخ مجرد یا خاتمه فرآیند و یا رسیدن به جواب ادامه پیدا می‌کند. اگر قبل از رسیدن به پاسخ عملیات پایان پذیرد، پاسخ غیرقطعی است (شکل ۷).

سطح صفحه مثلثی

با استفاده از سه بردار واحد برای سه ستاره، که با \tilde{b}_1 ، \tilde{b}_2 و \tilde{b}_3 نشان داده می‌شوند، سطح صفحه مثلثی با استفاده از فرمول هرونز به صورت زیر است:

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \quad (8)$$

که

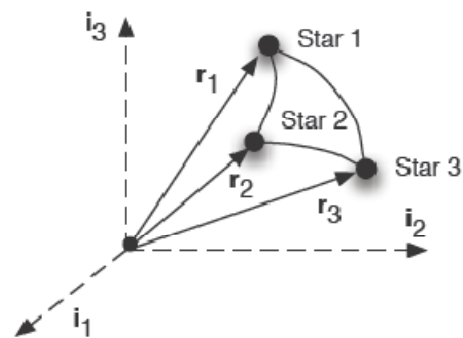
$$s = \frac{1}{2}(a+b+c) \quad (9)$$

$$a = \|\tilde{b}_1 - \tilde{b}_2\| \quad (10)$$

$$b = \|\tilde{b}_2 - \tilde{b}_3\| \quad (11)$$

$$c = \|\tilde{b}_1 - \tilde{b}_3\| \quad (12)$$

معادله برای مختصات جستجوگر ستاره داده شده است، اما در مختصات ECI نیز قابل استفاده است:



شکل ۸- نمایی از مثلث کروی

ممان قطبی صفحه مثلثی

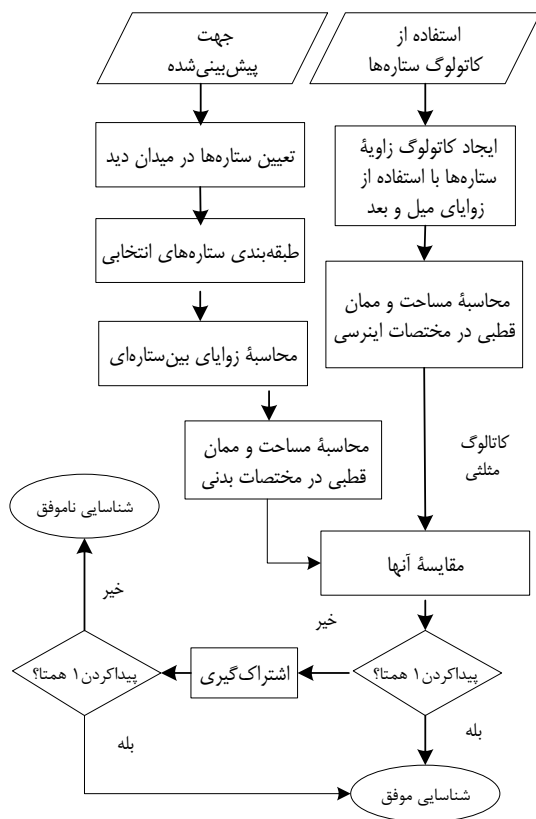
ممان قطبی ارتباط خوبی با سطح دارد، به طوری که ممکن است دو سطح دارای مساحت یکسان باشند در حالی که ممان قطبی آنها بسیار با هم متفاوت است. به علاوه، دو سطح مثلثی که دارای ممان قطبی یکسان هستند می‌توانند مساحت‌های کاملاً متفاوتی داشته باشند. زمان هم‌تاسازی، استفاده از این دو خاصیت، تعداد پاسخ‌های ممکن را به شدت کاهش می‌دهد. ممان قطبی برای یک صفحه مثلثی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\mathcal{J} = A(a^2 + b^2 + c^2) / 36 \quad (13)$$

اشتراک الگوی مثلثی

روش هم‌تاسازی صفحات مثلثی مشابه روش زاویه‌ای است. یک صفحه مثلثی از سه ستاره در میدان دید و سطح و ممان قطبی محاسبه شده، تشکیل شده است. محدوده‌ای که در آن سطح و

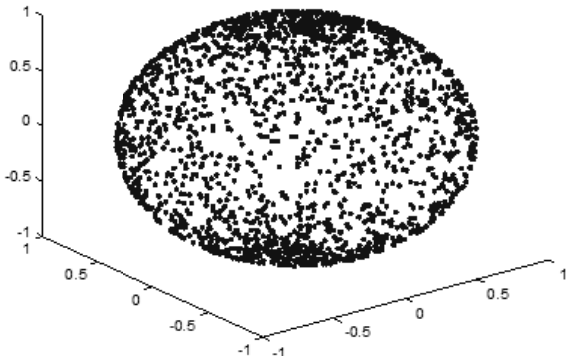
ممان قطبی صحیح وجود دارند با استفاده از انحراف استاندارد برای هر کدام محاسبه شده‌اند. در کاتالوگ، مثلث‌هایی که دارای مساحت و ممان قطبی داخل محدوده هستند برای مثلث داخل میدان دید، انتخاب می‌شوند. ایده‌آل این است که تنها یک پاسخ ممکن وجود داشته باشد، که معمولاً این اتفاق نمی‌افتد. هنگامی که بیشتر از یک پاسخ وجود دارد، یک اشتراک همانند روش زاویه ایجاد می‌شود. مثلث دیگر از ستاره‌های داخل میدان دید به طوری که دو ستاره مشترک با مثلث اول داشته باشد، تشکیل می‌شود، همانند شکل (۱۰). فهرستی از پاسخ‌های ممکن ایجاد شده و سپس پاسخ‌های بین مثلث اول و دوم مقایسه می‌شوند. هر پاسخ در هر فهرست که حداقل دو ستاره مشترک نداشته باشد حذف می‌شود. بعد از مقایسه اگر بیشتر از یک پاسخ وجود داشت، اشتراک‌گیری را ادامه می‌دهیم. اشتراک‌گیری تا زمان رسیدن به یک پاسخ مجرد یا تمام ستارگان برای اشتراک‌گیری ادامه پیدا می‌کند. اشتراک با یک ستاره هم امکان‌پذیر است ولی روش مؤثری نیست. تعداد مثلث‌هایی که می‌توانند یک ستاره به اشتراک بگذارند بیشتر از ۲ است، بنابراین پاسخ نیازمند تعداد بیشتری اشتراک است. تست هر پاسخ ممکن با مثلث اول به جای مقایسه با اشتراک، کار زمان‌بری است که صدها پاسخ به ازای هر مثلث در میدان دید وجود دارد. برای کاهش تعداد ترکیبات در تست، ۳ درخت تست دودویی ایجاد می‌شود.



شکل ۹- نمودار روش مثلثی

شبیه‌سازی

در این مرحله ابتدا به شبیه‌سازی آسمان می‌پردازیم. کاتالوگ در دسترس ۲۰۰۰ ستاره دارد که با زوایای میل و بعد به صورت شانسی (زندم) تولید شده‌اند. در شکل (۱۱) کاتالوگ مورد نظر مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲- شبیه‌سازی آسمان

در مرحله بعد باید جهت دوربین و مختصات چهار کنج آن را مشخص کنیم تا بتوانیم ستاره‌های موجود در میدان دید را انتخاب کنیم. جهت دوربین را با زوایای رول، پیچ و یاو مشخص می‌کنیم که به صورت ورودی برنامه هستند و می‌توانند تغییر کنند. بازه هر کدام از این زوایا عبارت است از:

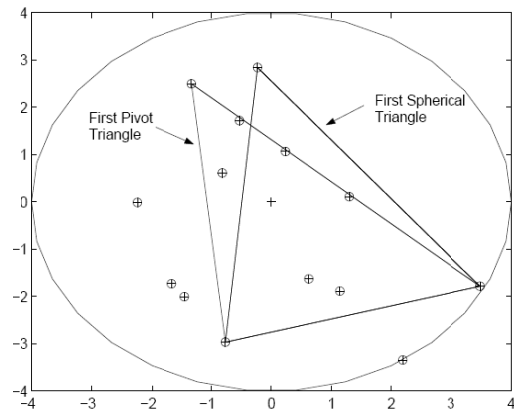
$$roll = [-\pi, \pi], pitch = [-\pi/2, \pi/2], yaw = [-\pi/2, \pi/2]$$

پنجره دوربین مورد نظر مربعی و از مرکز برابر با $0.25/0$ میلی‌متر در هر جهت است. سپس تعداد پنج ستاره از ستاره‌های موجود در میدان دید دوربین را انتخاب می‌کنیم. این ستاره‌ها بزرگ‌ترین ستاره‌های موجود در میدان دید هستند. مختصات این ستاره‌ها در دستگاه ناوربی قرار دارد که باید به دستگاه بدنی آورده و سپس روی صفحه نمایشگر تصویر شوند (به مختصات $x-y$ آورده شوند). در شکل (۱۲) ستاره‌های تصویر شده آورده شده‌اند. سپس به مختصات آنها نویز اضافه می‌کنیم تا به حالت واقعی نزدیک‌تر شویم. در اینجا مقدار نویز وارده به صورت زیر است:

$$H_x = 0.004, H_y = 0.002$$

در مرحله بعد کاتالوگ زوایا، مثلث و ممان قطبی را جهت مقایسه با کاتالوگ اصلی ذخیره شده تولید می‌کنیم. در ادامه ابتدا با استفاده از روش زاویه تعدادی ستاره برای ورودی مرحله مثلثی کاندیدا کرده و سپس در مرحله مثلث ستاره‌های مورد نظر را با دقت و سرعت بیشتری شناسایی می‌کنیم. شکل (۱۰) نمودار مورد نظر را نشان داده است.

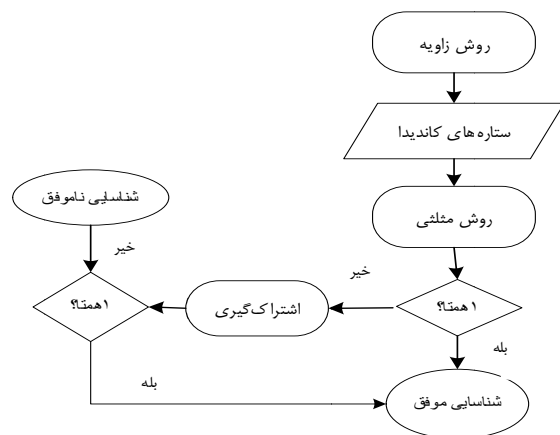
اولین درخت شامل ستاره‌های شماره ۱ از هر پاسخ ممکن اول است. درخت دوم شامل ستاره شماره ۲ و درخت سوم شامل ستاره شماره ۳ است. یکی از ستاره‌های مثلث، مشترک چک می‌شود که آیا در هر کدام از سه درخت دودویی وجود دارد، و اگر وجود داشت، دو ستاره دیگر را چک می‌کند تا ببیند با هر ستاره‌ای در مثلث در درخت دودویی همتا می‌شود یا نه. اگر نشد، ستاره دوم در درخت دودویی تست می‌شود- مشابه اولی. اگر هنوز همتایی پیدا نشد، آن مثلث از فهرست پاسخ‌ها خارج می‌شود. این روش تعداد مقایسه‌ها را برای تست کاهش می‌دهد، که به شدت سرعت الگوریتم را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰- فرآیند اشتراک‌گیری مثلث‌ها در روش مثلثی

روش جدید

در روش جدید از ترکیب دو روش زاویه و مثلث استفاده می‌کنیم که مزایای هر دو روش را دارد، یعنی سرعت جستجوی آن همانند روش زاویه بالاست و دقت این روش نیز مانند روش مثلث زیاد است. در این روش ابتدا با استفاده از روش زاویه ستاره‌هایی را در میدان دید برای ستاره مورد نظر کاندیدا می‌کنیم که نسبت به کل ستاره‌ها میدان دید بسیار کمتری دارند، سپس با استفاده از روش مثلث ستاره مورد نظر را انتخاب می‌کنیم.



شکل ۱۱- نمودار روش جدید

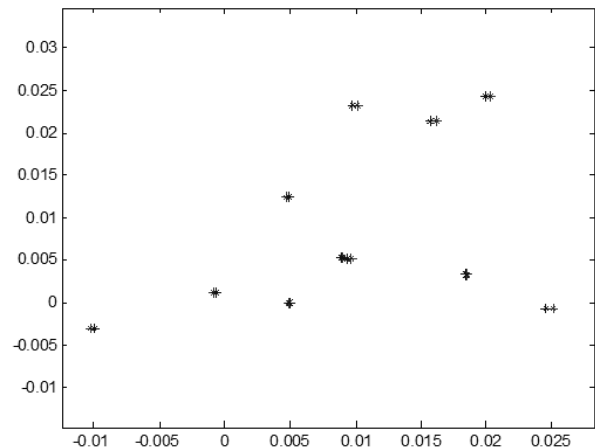
روش زاویه و روش مثلث مسطح است که از دو بخش مساحت و ممان قطبی تشکیل شده‌اند. در اجرای این الگوریتم، هیچگونه اطلاعات اولیه از موقعیت یا خروجی حسگر دیگری در دست نیست و فقط از خروجی حسگر ستاره‌نگر استفاده شده است.

نتایج مقایسه روش‌ها در شرایط مساوی با محدودیت‌های یکسان در جدول (۳) آورده شده است. مشاهده می‌شود که تعداد حداقل ستاره‌های مورد نیاز در روش زاویه، کمتر از روش‌های دیگر است، ولی به دلیل اهمیت موضوع، تعداد حداقل ستاره‌های مورد نیاز برای شناسایی موفق همراه با اشتراک‌گیری در روش مثلث و روش جدید کمتر از روش زاویه است. در روش مثلثی نیاز به اشتراک کمتری برای رسیدن به پاسخ صحیح است، زیرا از دو عامل مقایسه‌ای مساحت و ممان قطبی استفاده می‌کند و احتمال اینکه دو مثلث مساحت برابر و ممان قطبی یکسان داشته باشند بسیار ضعیف است. نرخ موفقیت نیز در روش جدید حدود ۳۰٪ بیشتر از روش زاویه و ۱۰٪ بیشتر از روش مثلث است. زمان شناسایی در این روش بیشتر از روش زاویه است، اما نسبت به روش مثلث سریع‌تر است، زیرا از ترکیب دو روش استفاده شده که به شدت زمان را نسبت به روش مثلث کاهش می‌دهد. زمان روش زاویه در روش جدید ما زمان روش زاویه به صورت مجزا کمتر است زیرا در روش جدید ما نمی‌خواهیم در انتهای مرحله زاویه به پاسخ قطعی برسیم و هدف در استفاده از روش زاویه، ایجاد همگرایی در رسیدن به پاسخ است. تأثیر نویز نیز روی این روش کمتر از روش‌های مثلث و زاویه است، زیرا در چند مرحله فاکتورگیری و عمل مقایسه صورت می‌گیرد که خود یکی از امتیازات این روش نسبت به روش‌های دیگر است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده مشاهده شد که روش جدید نسبت به روش زاویه دقیق‌تر و نسبت به روش مثلث سریع‌تر است. روش ترکیبی نسبت به نویز نیز قوی‌تر است زیرا در سه مرحله مقایسه انجام می‌گیرد.

جدول ۳- مقایسه روش‌های مثلث و زاویه پس از هزار بار شبیه‌سازی

| جدید | مثلث | | زاویه | مورد |
|------|-------------------|-----------|-------|---------------------------------------|
| | مساحت و ممان قطبی | فقط مساحت | | |
| ۳ | ۳ | ۳ | ۲ | حداقل ستاره‌های مورد نیاز |
| ۴ | ۴ | ۴ | ۳ | حداقل ستاره‌های مورد نیاز برای موفقیت |
| %۹۸ | %۹۵ | %۸۷ | %۷۰ | نرخ موفقیت کامل |
| ۲~ | ۵~ | ۱۳~ | ۳۰~ | نتایج ناصحیح |



شکل ۱۳- تصویر ستاره‌های موجود در میدان دید در صفحه (x-y) و اثر اعمال نویز در موقعیت آنها

در جدول (۱) نمونه‌ای از کاتالوگ زاویه و در جدول (۲) نمونه‌ای از کاتالوگ مثلثی را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱- نمونه‌ای از کاتالوگ ستاره‌های موجود در میدان دید دوربین

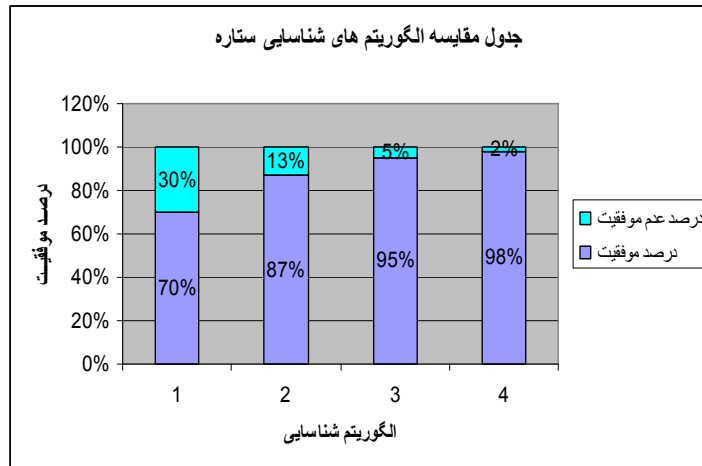
| کاتالوگ زوایای پنج ستاره | | | | | |
|--------------------------|--------|--------|-------|-------|---|
| شماره ستاره | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | -۰۹۳۰۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳ | -۰۹۱۶۹ | -۰۹۵۹۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۴ | -۰۹۸۲۵ | ۱۰۱۹۳ | ۱۰۰۸۴ | ۰ | ۰ |
| ۵ | -۰۹۸۲۵ | ۱۰۱۹۳ | ۱۰۰۸۵ | ۱۰۶۲۸ | ۰ |

جدول ۲- نمونه‌ای از کاتالوگ ستاره‌های موجود در میدان دید دوربین

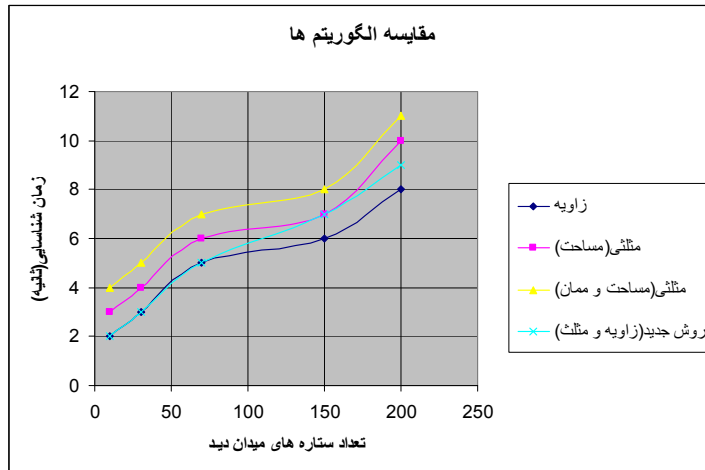
| شماره ستاره‌های تشکیل‌دهنده مثلث | مساحت | ممان |
|----------------------------------|-------|-------|
| ۱ | ۰۴۶۷۲ | ۰۰۱۳۷ |
| ۱ | ۰۴۷۵۵ | ۰۰۱۳۹ |
| ۱ | ۰۴۸۱۳ | ۰۰۱۴۱ |
| ۱ | ۰۴۵۹۱ | ۰۰۱۳۴ |
| ۱ | ۰۴۶۴۵ | ۰۰۱۳۶ |
| ۱ | ۰۴۷۲۷ | ۰۰۱۳۸ |

نتیجه‌گیری

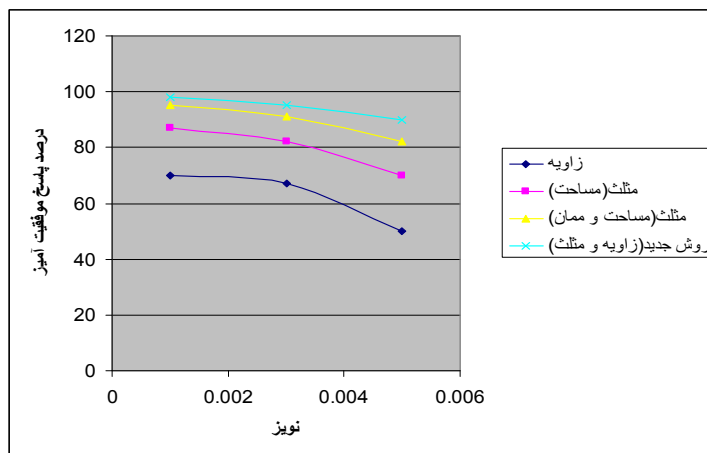
در این مقاله روش جدیدی را پیاده‌سازی کرده‌ایم که از ترکیب دو روش پایه در شناسایی الگوی ستاره‌ای استفاده می‌کند، که شامل



نمودار ۱ - مقایسه روش های زاویه (۱)، مثلث با مساحت (۲)، مثلث با مساحت و ممان (۳)، روش جدید (۴)



نمودار ۲ - مقایسه زمان شناسایی ستاره در الگوریتم های مختلف



نمودار ۳ - تأثیر نویز در موقعیت ستارگان روی میزان موفقیت الگوریتم های

مراجع

- [10] Sasaki, T., "A Star Identification Method for Satellite Attitude Determination Using Star Sensors," In *Proc. 15th International Symposium on Space Technology and Sciences*, 1986, pp. 1125–1130.
- [11] Anderson, D., *Autonomous Star Sensing and Pattern Recognition for Spacecraft Attitude Determination*, (PhD Thesis), Texas A&M University, 1991.
- [12] Liebe, C. C., "Pattern Recognition of Star Constellations for Spacecraft Applications," *IEEE Aeronaut. Electron. Syst. Mag.* Vol. 10, Issue 2–12, 1992.
- [13] Scholl, M. S., "Star-Field Identification for Autonomous Attitude Determination," *J. Guidance, Control & Dynamics*, Vol.18, 1995, pp. 61–65.
- [14] Quine, B. M. and Whyte, H. F. D., "A Fast Autonomous Star-Acquisition Algorithm for Spacecraft," *Control Engin. Pract.*, Vol. 4, 1996, pp. 1735–1740.
- [15] Guangjun, Z., Wei, X. and Jiang, J., "Full-Sky Autonomous Star Identification Based on Dial and Cyclic Features of Star Pattern," *Image Vision Comput.*, Vol. 26, 2008, pp. 891–897.
- [16] Kolomenkin, M., Pollak, S., Shimshoni, I. and Lindenbaum, M., "Geometric Voting Algorithm for Star Trackers," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, Vol. 44, 2008, pp. 441–456.
- [17] Bezooijen, R. W. H. V., *Automated Star Pattern Recognition*, (PhD Thesis), Stanford University, 1989.
- [18] Padgett, C. and Delgado, K. K., "A Grid Algorithm for Autonomous Star Identification," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, Vol. 33, 1997, pp. 202–213.
- [1] Cole, C. L. and Crassidis, J. L., "Fast Star Pattern Recognition Using Planar Triangles," American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [2] Gottlieb, D. M., "Star Identification Techniques," *Spacecraft Attitude Determination and Control*, pp.259-266, 1978.
- [3] Gambardella, P., *Algorithm for Autonomous Star Identification*, Tech. Rep. TM-84789, NASA, 1980.
- [4] Bae, S. and Schutz, B. E., *Geoscience Laser Altimeter System (GLAS)*, Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.2, October 2002.
- [5] Salomon, P. H. "A Microprocessor Controlled CCD Star Tracker," In *AIAA, 14th Aerospace Sciences Meeting*, Washington, DC, USA, 1976.
- [6] Junkins, J. L., White, C. and Turner, J., "Star Pattern Recognition for Real-Time Attitude Determination." *Journal Astronaut. Sci.* Vol. 25, 1977, pp. 251–270.
- [7] Junkins, J. L. and Strikwerda, T. E., "Autonomous Star Sensing and Attitude Estimation," In *Proc. Annual Rocky Mountain Guidance and Control Conference*, No. 79-013. 1979.
- [8] Strikwerda, T. E. and Junkins, J. L., *Star pattern Recognition and Spacecraft Attitude Determination*, Technical Report, ETL-0260, U.S Army Engineer Topographic Laboratories: Fort Belvoir, VA, USA, 1981.
- [9] Groth, E. J., "A Pattern Matching Algorithm for Two-Dimensional Coordinates Lists," *Journal Astronom*, No.19, 1986, pp.1244–1248.