JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۵/ شمارهٔ ۲ / تابستان ۱۳۹۱
ص. ص ۲۳- ۱۵

ملاحظاتی در پیاده‌سازی الگوریتم شناسایی بدون بعد برای نوعی سامانهٔ ستاره‌یاب آزمایشگاهی

جعفر روشنی‌یان[۱] ، شبنم یزدانی[۲*]، سیدمهدی حسنی[۳] و مسعود ابراهیمی[۴]

۱، ۲، ۳ و ۴- مرکز پژوهشی سامانه‌های پرتاب فضایی، دانشکدهٔ مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

* تهران، وفادار شرق، بلوار دانشگاه

Syazdani@kntu.ac.ir

ستاره‌یاب یا سامانه ناوبری نجومی، یکی از دقیق‌ترین ابزارهای تعیین وضعیت ماهواره به شمار می‌رود. این سامانه قادر است با شناسایی ستارگان موجود در محدوده دید اقدام به تعیین وضعیت ماهواره نماید. یکی از بخشهای مهم این سامانه، نرم افزار شناسایی الگوی ستارگان است. در پژوهش حاضر یکی از جدیدترین الگوریتم‌های شناسایی الگوی ستارگان با عنوان الگوریتم شناسایی بدون بعد مورد بررسی قرار گرفته است. این الگوریتم بدون وابستگی به متغیرهای تنظیم دوربین قادر است ستارگان موجود در تصویر را شناسایی نماید. در این راستا ابتدا پایگاه داده‌ای شامل اطلاعات ستارگان و مشخصه شناسایی آنها تهیه شده است. سپس یک روش جستجوی سریع به عنوان ابزار جستجو در این پایگاه بکار رفته و در نهایت بین اندازه پایگاه داده و سرعت به‌روزرسانی اطلاعات وضعیت مصالحه‌ای برقرار گشته است.

واژه‌های کلیدی: ستاره‌یاب، الگوریتم‌های شناسایی الگو، روش بدون بعد، روش بردار k

اختصارات

زاویهٔ مثلث تشکیل‌شده در فضا	α
زاویهٔ مثلث تشکیل‌شده در صفحه	β
بردارهای ستاره در کرهٔ آسمان	r_i
فاصلهٔ کانونی دوربین	f
کوچک‌ترین زاویهٔ مثلث	α_1
بزرگ‌ترین زاویهٔ مثلث	α_2
زاویهٔ میل	Dc
زاویهٔ بعد	Ra
اندازهٔ میدان دید	FOV
عرض از مبدأ	q
شیب خط	m
آرایه‌های برداری	S, I
محدودهٔ بررسی روش جستجو	j_b ,j_t
اندیس بالا و پایین برای جستجو	k_{start}, k_{end}

مقدمه

رشد روز افزون فناوری فضایی در چند دههٔ اخیر، نیاز به استفاده از روش‌های دقیق‌تر برای تعیین وضعیت[۵] ماهواره‌ها و فضاپیماها را بیشتر کرده است. یکی از ابزارهای پرکاربرد در زمینهٔ تعیین وضعیت، حسگر ستاره[۶] است. حسگرهای ستارهٔ امروزی با استفاده از یک دوربین از فضای اطراف ماهواره تصویری تهیه می‌کنند، سپس با مقایسهٔ اطلاعات موجود در تصویر (آرایش ستارگان نسبت به یکدیگر) می‌توانند با اطلاعات موجود در حافظهٔ خود وضعیت زاویه‌ای[۷] ماهواره یا فضاپیما را تعیین کنند. تطبیق

۱. استاد
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسندهٔ مخاطب)
۳. کارشناس ارشد
۴. دکتری

5. Attitude Determination
6. Star Tracker
7. Orientation

دریافت مقاله: ۹۰/۱۲/۲۲ ، تأیید مقاله: ۹۱/۰۵/۲۳

Archive of SID
www.SID.ir

اطلاعات ستارگان موجود در تصویر با پایگاه دادهٔ موجود در حافظهٔ سامانه، توسط الگوریتم شناسایی الگوی ستاره صورت می‌پذیرد.

روش‌های شناسایی الگوی ستارگان به دو دسته، گمشده در فضا[8] و بازگشتی[9] تقسیم می‌شوند. در صورتی‌که از اطلاعات موجود مانند سرعت زاویه‌ای ماهواره یا وضعیت آن در لحظات قبل استفاده شود الگوریتم مربوطه بازگشتی خواهد بود. در چنین الگوریتمی با استفاده از تغییر تدریجی فریم عکس‌ها بر اثر سرعت زاویه‌ای و پیش‌بینی ورود و خروج ستارگان در توالی عکس‌ها، شناسایی انجام می‌شود. شایان ذکر است، سرعت زاویه‌ای را می‌توان از طریق سایر ابزارهای ناوبری نظیر ژیروسکوپ‌ها تعیین کرد.

چنانچه هیچگونه اطلاعاتی از وضعیت فعلی یا پیشین ماهواره موجود نباشد، از الگوریتم‌های گمشده در فضا استفاده می‌شود. با وجود احتمال پایین گم‌شدن یک ماهواره در فضا، در تحقیقات یک دههٔ گذشته تمرکز اصلی محققان بر روی روش‌های گمشده در فضا معطوف شده و الگوریتم‌های سریع و با دقت بالایی تدوین شده‌اند که از نظر سرعت محاسباتی با روش‌های بازگشتی قابل مقایسه هستند [۱-۵].

در یک دسته‌بندی دیگر می‌توان روش‌های شناسایی الگوی ستاره را بر حسب مشخصهٔ مورد استفاده در شناسایی به دو دسته تقسیم کرد، دستهٔ اول الگوریتم‌هایی هستند که از مشخصات صفحه‌ای ستارگان (مختصات ستارگان در تصویر) استفاده می‌کنند. دستهٔ دوم روش‌هایی هستند که از زاویهٔ فضایی بین بردارهای ستاره استفاده می‌کنند. در واقع این روش‌ها از مختصات سه بعدی ستارگان در فضا یعنی مختصات ستارگان در صفحهٔ تصویر به همراه فاصلهٔ کانونی، برای محاسبهٔ زاویهٔ بین دو ستاره استفاده می‌کنند.

روش‌های متنوع با عملکرد و راندمان‌های مختلف را می‌توان در دسته‌بندی فوق جای داد. به عنوان مثال روش شبکه‌بندی [۱] در دستهٔ اول جای دارد چرا که مشخصات ثبت شده در تصویر به صورت دو بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دیگر روش‌های دستهٔ اول می‌توان به روش‌های تشخیص الگو بر مبنای مساحت یا ممان اینرسی مثلث‌های تشکیل شده در صفحهٔ تصویر و روش بدون بُعد اشاره کرد. روشی مانند رأی‌دهی هندسی [۲] که از زوایای فضایی بین ستارگان برای تشخیص الگو استفاده می‌کند در دستهٔ دوم قرار می‌گیرد. روش‌هایی نظیر روش زاویه، مثلث یا روش معروف هرم که کاربرد گسترده‌ای دارد از دیگر روش‌های دستهٔ دوم هستند [۳].

یکی از معایب عمدهٔ همه الگوریتم‌های نام برده، وابستگی آنها به مشخصات دقیق فاصلهٔ کانونی و جابه‌جایی مرکز نوری است. این مسئله تنظیم دقیق دوربین را ضروری می‌کند. به عنوان مثال در روش هرم تغییر فاصلهٔ کانونی باعث تغییر زاویهٔ بین ستاره‌ها و در نتیجه تشخیص نادرست می‌شود.

در سال ۲۰۰۶ سامان [۴] الگوریتم بدون بعد را برای رفع این نقیصه ابداع کرد. این روش که در دسته‌بندی اول جای می‌گیرد از زاویهٔ بین اضلاع مثلث تشکیل شده در صفحهٔ تصویر استفاده می‌کند، بنابراین نه تنها نیازی به تنظیم فاصلهٔ کانونی و محل مرکز نوری ندارد، بلکه قادر به تخمین مقادیر آنها به صورت آنلاین[10] نیز هست و در مواردی از این روش برای تخمین اولیهٔ اندازهٔ فاصلهٔ کانونی نیز استفاده شده است [۵].

در تحقیق حاضر، روش بدون بُعد با ملاحظات مربوط به سیستم مورد نظر پیاده‌سازی شده و نتایج آن با مرجع [۴] مقایسه شده است. در بخش‌های بعدی، توضیح مختصری از روش و چگونگی عملکرد آن، روند تولید پایگاه داده برای یک ستاره‌یاب نمونه، ملاحظات مربوط به پایگاه داده و انتخاب بهترین حجم برای پایگاه داده ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش جستجو در پایگاه داده، صحه‌گذاری روش شناسایی و نیز نتایج به ترتیب در بخش‌های بعدی بررسی و بیان خواهند شد.

روش شناسایی الگوی بدون بعد برای دوربین‌های کالیبره نشده [۴]

تنظیم دوربین سامانهٔ ستاره‌یاب پیش از استفاده در مأموریت‌های فضایی امری متداول است. دو پارامتر مهم دوربین یعنی فاصلهٔ کانونی و محل مرکز نوری به دلیل تأثیر مستقیم بر مکان ستاره‌های تشکیل شده روی تصویر، در میزان درستی شناسایی نقش اساسی ایفا می‌کنند. این پارامترها پیش از پرتاب فضاپیما در آزمایشگاه تنظیم شده و مقادیر دقیق آنها به‌دست می‌آیند. اما با وجود تمامی این ملاحظات، در شرایط واقعی به دلیل خرابی‌های ناشی از پرواز، قرارگیری در جو و نیز اثرات ارتعاشی و گرمایی، این کمیت‌ها تغییر کرده و از مقدار پیش‌تنظیم شدهٔ خود فاصله می‌گیرند.

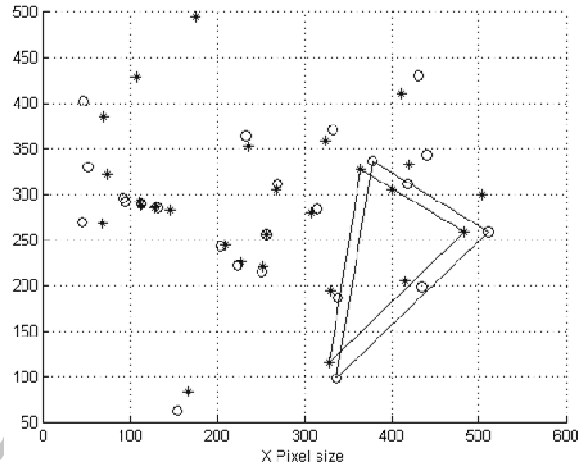
در شکل (۱) دو تصویر از آسمان به ازای دو فاصلهٔ کانونی متفاوت رسم شده‌اند که تغییر اندازه، ناشی از تغییر فاصلهٔ کانونی در آنها کاملاً مشهود است. با وجود تغییر اندازهٔ مثلث، زوایای بین اضلاع حفظ شده و دو مثلث متشابه هستند. از سوی دیگر در مرجع [۴] نشان داده شده است که زاویهٔ α (زاویهٔ مثلث تشکیل شده در فضا به رئوس ستارگان) با زاویهٔ β (زاویهٔ مثلث تشکیل شده در صفحهٔ تصویر به رئوس همان ستارگان) برابر است. این مسئله در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به این دو موضوع، می‌توان گفت که زوایای مثلث‌های تشکیل شده در فضا و

8. Lost in Space
9. Recursive
10. Online

Archive of SID
www.SID.ir

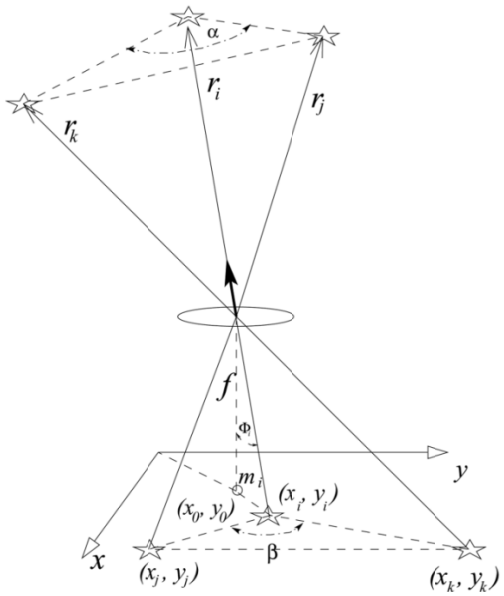
مثلث‌های تشکیل شده در تصویر، بدون توجه به تغییرات فاصلهٔ کانونی و محل مرکز نوری حفظ شده و یکسان باقی می‌مانند.

با درنظرداشتن این فرض، اولین گام در شناسایی الگوی ستارگان تولید یک پایگاه داده از مثلث‌های موجود در فضای اینرسی و دسته‌بندی آنها با توجه به کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین زاویه است. در هنگام شناسایی آنلاین زوایای مثلث صفحه‌ای (مثلث موجود در تصویر) محاسبه شده و به کمک روش جستجوی بردار K با پایگاه داده مذکور مقایسه می‌شود، درصورتی‌که الگوریتم به جواب یکتا برسد شناسایی با موفقیت صورت گرفته است.



شکل ۱- تغییر اندازه و محل تصویر مثلث بر اثر تغییر فاصلهٔ کانونی و مرکز نوری [۴]

برای تولید زوایا از رابطهٔ آشنای ضرب داخلی دو بردار استفاده می‌شود که در اینجا بردارهای تشکیل‌دهندهٔ زاویه همان اضلاع مثلث هستند و از معادلهٔ ۱ پیروی می‌کنند:



شکل ۲- نمایش زاویه مثلث در فضا و در صفحه تصویر [۴]

$$\cos\alpha_1 = \frac{r_{ij}^T r_{ik}}{\|r_{ij}\|\|r_{ik}\|}$$
$$\cos\alpha_2 = -\frac{r_{jk}^T r_{ij}}{\|r_{jk}\|\|r_{ij}\|} \qquad (۱)$$
$$\cos\alpha_3 = \frac{r_{ik}^T r_{jk}}{\|r_{ik}\|\|r_{jk}\|}$$

در معادلهٔ (۱) منظور از $r_{ij} = r_j - r_i$ و $r_{ik} = r_k - r_i$ و $r_{kj} = r_j - r_k$ اضلاع مثلث متناظر با بردارهای یکه ستاره و r_iها بردارهای ستاره در کرهٔ آسمان هستند. زوایای روی صفحهٔ تصویر نیز از روند مشابه قابل استخراج هستند.

روند تولید پایگاه داده

برای تولید پایگاه داده الگوریتم شناسایی بدون بعد، باید اطلاعات مربوط به همه مثلث‌هایی که در یک محدوده دید قرار می‌گیرند، تولید و ثبت شوند. بدین منظور بعد از اطمینان از حضور سه ستاره در میدان دید، مثلثی به رئوس این ستارگان ساخته می‌شود. سپس زوایای بین اضلاع مثلث از رابطه ضرب داخلی محاسبه شده و کوچترین و بزرگترین زاویه به انضمام اندیس سه ستاره‌ای که مثلث را تشکیل می‌دهند به عنوان پایگاه داده ذخیره می‌شوند.

برای تعیین قرارگیری دو ستاره در یک میدان دید، از زاویه فضایی بین آنها استفاده می‌شود. منظور از زاویه فضایی بین دو ستاره در واقع همان ضرب داخلی بردارهای سه بعدی دو ستاره است. این بردارها از مرکز کره سماوی به راس ستارگان کشیده می‌شوند (r_iها). دو ستاره در صورتی در میدان دید قرار می‌گیرند که زاویه فضایی آنها کوچکتر از زاویه دید باشد. البته جهت اجتناب از بررسی تمام ترکیبات ستارگان و افزایش سرعت در نرم افزار تهیه شده، دو شرط اضافی در نظر گرفته می‌شود و تنها ستارگانی که دارای این شرایط باشند، جهت مقایسه زاویه فضایی به کار می‌روند. این شروط عبارتند از:

تفاوت زاویه میل[11] دو ستاره کمتر از اندازه میدان دید باشد.

جفت ستارگانی که شرط اول را ارضا کردند باید شرط زیر در مورد بعد[12] را نیز ارضا کنند:

$$|\cos(Dc(1)) \times (Ra(1) - Ra(2))| < FOV^\circ \qquad (۲)$$

این شرایط به ظاهر ساده سرعت تشخیص ستارگان موجود در یک میدان دید با خط دید مشخص را به شدت افزایش داده و به تبع آن زمان تولید پایگاه داده کاهش می‌یابد.

11. Declination
12. Right ascension

Archive
www.SID.ir

از آنجا که پایگاه داده تولیدی همواره شامل تعداد زیادی مثلث است، اطمینان از صحت جواب‌ها به طریق مقایسه تک به تک کاری دشوار به حساب می‌آید، گرچه برای یک پایگاه داده کوچک می‌توان از این روش تست نیز استفاده نمود. در اینجا برای صحه‌گذاری نرم‌افزار تولید پایگاه داده، از اطلاعات مرجع [۴] استفاده شده است. در مرجع مذکور، پایگاه داده برای سامانه‌ای با میدان دید مربعی ۸ درجه، یکبار برای قدر ۵/۵ و یکبار برای قدر ۵ تولید شده است. با به کار گرفتن این اطلاعات، پایگاه داده تولید شده و نتایج آن در جدول (۱) قابل مشاهده است. در نمونه ذکر شده، کاتالوگ آسمان مورد استفاده اسمیتسونین[13]، و در تحقیق حاضر کاتالوگ هیپارکوس است. بنابراین تفاوت اندک بین تعداد عناصر پایگاه داده به خاطر تفاوت تعداد ستارگان موجود در کاتالوگ‌ها توجیه‌پذیر است.

جدول ۱- مقایسهٔ تعداد عناصر پایگاه داده

قدر	میدان دید	کاتالوگ	تعداد ستارگان	تعداد مثلثات
۵.۵	۸	SAO	۲۸۶۱	۳۳۸۳۶۹
۵.۵	۸	Hipparcos	۲۸۵۱	۳۳۶۲۵۰
۵	۸	SAO	۱۵۷۱	۵۵۳۰۹
۵	۸	Hipparcos	۱۴۰۹	۵۴۵۱۸

برای اطمینان بیشتر از صحت روش پیاده سازی شده، قسمتی از پایگاه داده موجود در مرجع [۴] با پایگاه داده تولید شده توسط نرم‌افزار موجود مقایسه گردید که در جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲- مقایسهٔ زوایای پایگاه داده مرجع ۴ و ستاره‌یاب نمونه

ID1	ID2	ID3	$\alpha_1[1]$	$\alpha_3[1]$	α_1	α_3
۲۴۳۴	۷۲۵	۲۱۸۷	۶.۰۲۲۳۵۵	۱۴۳.۲۶۸۹	۶.۰۲۲۳۵۵	۱۴۳.۲۶۸۹
۴۸۳	۲۵۷۸	۱۴۲۴	۶.۰۲۳۳۱۹	۱۴۷.۵۸۹۲	۶.۰۲۳۳۱۹	۱۴۷.۵۸۹۲
۱۳۱۵	۶۶۷	۳۰۴۷	۶.۰۲۳۵۱۴	۱۴۶.۲۲۸۸	۶.۰۲۳۵۱۴	۱۴۶.۲۲۸۸
۳۶۸۴	۱۵۴۲	۵۰۳	۶.۰۲۳۶۱۳	۱۴۶.۵۰۳۱	۶.۰۲۳۶۱۳	۱۴۶.۵۰۳۱

در جدول (۳) قسمتی از پایگاه داده ساخته شده برای قدر ۵ و محدودهٔ دید ۱۵ درجه که با توجه به روند مشابه تولید شده است قابل مشاهده است. قابل ذکر است که قدر و میدان دید مذکور، مشخصات سامانه ستاره یاب آزمایشگاهی مورد نظر است.

13. Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)

جدول ۳- بخشی از پایگاه دادهٔ تولیدی برای روش بدون بعد

شناسهٔ مثلث	کوچک‌ترین زاویه	بزرگ‌ترین زاویه	شناسهٔ ستارهٔ اول	شناسهٔ ستارهٔ دوم	شناسهٔ ستارهٔ سوم
۲۶۳۱۸۵	۲۸.۶۰۳۹۷	۹۲.۵۱۴۵۱	۶۱۱۹۹	۴۷۳۹۱	۵۸۸۶۷
۲۶۳۱۸۶	۲۸.۶۰۴	۹۴.۸۰۲۲۷	۶۳۷۲۴	۶۷۲۳۴	۶۰۲۶۰
۲۶۳۱۸۷	۲۸.۶۰۴۰۸	۱۱۵.۸۲۳۶	۹۲۰۴۱	۸۸۶۳۵	۸۷۹۳۶
۲۶۳۱۸۸	۲۸.۶۰۴۰۹	۱۱۲.۲۴۸۷	۳۱۱۲۵	۳۰۷۸۸	۲۵۸۵۹
۲۶۳۱۸۹	۲۸.۶۰۴۱۵	۱۲۲.۲۴۸۳	۹۲۸۱۸	۹۴۴۸۱	۹۵۳۷۲
۲۶۳۱۹۰	۲۸.۶۰۴۲۵	۹۷.۷۵۰۸۲	۷۵۸۸	۲۴۸۴	۱۷۴۴۰
۲۶۳۱۹۱	۲۸.۶۰۴۹۵	۸۱.۷۶۲۸۴	۴۴۸۱۶	۴۷۱۷۵	۳۸۸۲۷

ملاحظات تولید پایگاه داده

برای اطمینان از حضور حداقل ۵ ستاره در میدان دید، به‌منظور بالابردن دقت شناسایی، پایگاه داده با استفاده از قدر ۶ ساخته شد که به دلیل بالابودن تعداد عناصر موجود در آن امکان عملیاتی‌شدن نداشت. تعداد ستارگان موجود در کاتالوگ هیپارکوس با قدر ۶ به پایین برابر ۴۹۹۵ ستاره است که در هنگام تولید پایگاه داده به روش مذکور، پس از بررسی ۱۸۸۴ ستاره، تعداد مثلث‌ها در پایگاه داده به بیش از ده میلیون رسید که پیاده‌سازی این حجم بالا از پایگاه داده در عمل امکان‌پذیر نیست. در واقع بالابودن حجم پایگاه داده دو عیب اساسی دارد:

۱. لازم است تا حجم حافظهٔ سامانه برای نگهداری پایگاه داده زیاد باشد.
۲. زمان جستجو در چنین پایگاه داده‌ای بسیار بالا خواهد بود، که فرکانس به‌روزرسانی اطلاعات وضعیت را به شدت کاهش می‌دهد.

به‌عنوان نمونه با وجود ۵ ستاره در تصویر، ۱۰ مثلث تولید می‌شود درحالی‌که با حضور ۱۰ ستاره ۱۲۰ مثلث تولید خواهد شد. راه‌حل‌های زیر برای کاهش حجم پایگاه داده پیشنهاد می‌شود:

۱. کم‌کردن تعداد ستارگان کاتالوگ
۲. حذف مثلث‌ها با زوایای بسیار کوچک که مثلث را شبیه به خط می‌سازند.
۳. حذف مثلث‌های کم مساحت

یکی از متداول‌ترین روش‌های کاهش حجم پایگاه داده، کاهش تعداد ستارگان کاتالوگ است که به سه روش زیر امکان‌پذیر است:

۱. کم‌کردن ستارگان دوتایی
۲. کاهش قدر
۳. یکنواخت‌سازی آسمان

در زیر به بررسی اثر کاهش حجم پایگاه داده توسط کاهش تعداد ستارگان کاتالوگ می‌پردازیم.

Archive of SID
www.SID.ir

کم‌کردن ستارگان دوتایی از کاتالوگ

ستارگان دوتایی ستارگانی با فاصلهٔ زاویه‌ای بسیار کوچک ولی قدرهای متفاوت هستند که به دلیل هم‌پوشانی، در تصویربرداری به‌صورت یک ستارهٔ واحد ظاهر می‌شوند. با حذف این ستارگان از کاتالوگ می‌توان حجم پایگاه داده را تا حدود قابل قبولی (البته در شرایط مقاله) پایین آورد. نتایج این عملیات در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول ۴- حذف ستارگان دوتایی و تفاوت تعداد عناصر پایگاه داده

قدر	میدان دید	کاتالوگ	تعداد ستارگان	تعداد مثلثات
۵.۵	۸	Hipparcos	۲۸۵۱	۳۳۶۲۵۰
۵.۵ بدون ستارگان دوتایی	۸	Hipparcos	۲۴۹۲	۱۱۶۶۵۷
۵.۵	۱۵	Hipparcos	۲۸۵۱	۳۵۸۱۲۸۲
۵.۵ بدون ستارگان دوتایی	۱۵	Hipparcos	۲۴۹۲	۱۲۲۰۴۶۲

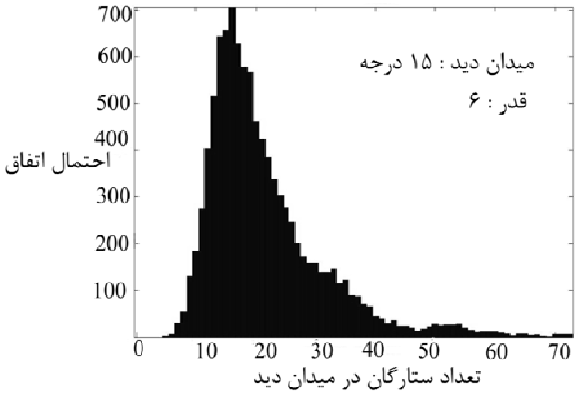
معمولاً ستارهٔ کوچک‌تر نسبت به ستارهٔ بزرگ‌تر قدر بالاتری دارد تا جایی که ممکن است در محدودهٔ قدر مورد بررسی یک ستاره‌یاب قرار نگیرد. در نتیجه با حذف ستارگانی که پرچم دوتایی دارند ممکن است ستارهٔ پرنور را حذف کرده، ترکیب بسیار مناسبی را از دست داده و به تبع زمان محاسباتی و شناسایی را بالا برده باشیم.

به‌عنوان مثال صورت فلکی جبار، یکی از صورت فلکی‌های پرنور در آسمان شب است که در نیمهٔ دوم سال، قابل مشاهده و تصویربرداری است. کمربند جبار شامل سه ستاره با قدرهای ۲/۴، ۱/۶۵ و ۱/۸۵ است که دو ستاره از این کمربند، ستارگان دوتایی به‌حساب می‌آیند و ستارهٔ دوم که در فاصلهٔ زاویه‌ای کمی از آنها قرار دارد یکی با قدر ۶/۸ و دیگری با قدر ۹/۵ اصلاً در محدودهٔ مورد بررسی حسگر ستاره‌یاب قرار ندارند. با حذف این دو ستاره تحت عنوان ستارگان دوتایی در واقع ترکیبات بسیار مفیدی از پایگاه داده را حذف کرده‌ایم که می‌توانند در تشخیص سریع‌تر به الگوریتم کمک کنند.

اما همان‌طورکه در جدول (۴) می‌توان مشاهده کرد، پایگاه داده مربوط به میدان دید ۱۵ درجه بیش از یک میلیون عنصر دارد که حجم بالایی از اطلاعات به حساب آمده و زمان به‌روزرسانی مطلوب را برآورده نمی‌کند.

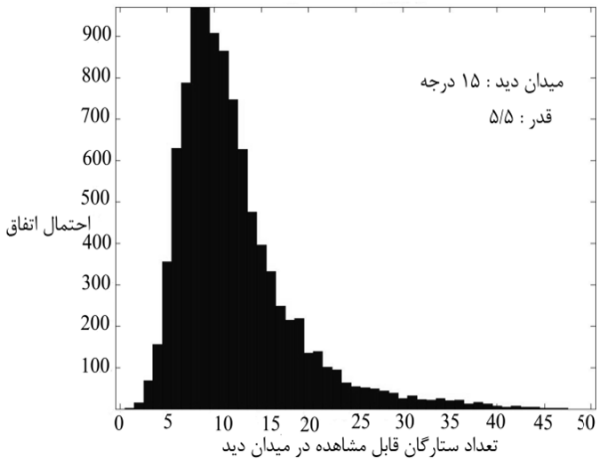
کاهش قدر ستارگان مورد استفاده

راه حل دوم، کاهش قدر ستارگان مورد استفاده است. استفاده از قدر ۶ و میدان دید ۱۵ درجه در ۹۸٪ موارد، وجود حداقل ۵ ستاره در میدان دید را تضمین می‌کند اما این مسئله در مقابل فریم‌هایی است که بسیار بیشتر از ۵ ستاره در خود دارند و با افزایش تعداد ترکیبات پایگاه داده، روند شناسایی را با مشکل روبه‌رو می‌کنند. توزیع ستارگان قدر ۶ به پایین در میدان دید ۱۵ درجه را در هیستوگرام شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد، در حالی‌که وجود ۵ ستاره در میدان دید، ضریب اطمینان تشخیص صحیح را بالا می‌برد، لیکن با ۴ ستاره نیز می‌توان بیش از یک تشخیص انجام داده و از صحت آن مطمئن بود.



شکل ۳- تعداد ستارگان در میدان دید ۱۵ درجه با قدر ۶

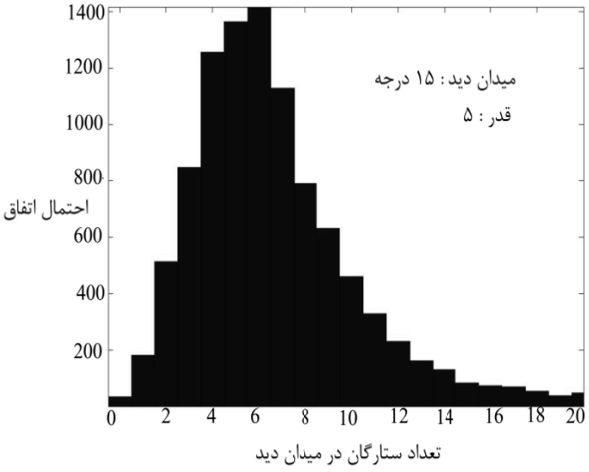
شایان ذکر است که احتمال وجود ۴ ستاره در میدان دید ۱۵ درجه با قدر ۶ به پایین، طبق هیستوگرام شکل (۳) بیش از ۹۹/۸ ٪ است ولی همین احتمال برای میدان دید ۱۵ درجه و قدر ۵/۵ به پایین که در هیستوگرام شکل (۴) نمایش داده شده است برابر ۹۷/۶ است.



شکل ۴- تعداد ستارگان در میدان دید ۱۵ درجه با قدر۵/۵

Archive
www.SID.ir

اما با استفاده از قدر ۵/۵ نیز تعداد ترکیبات بالای یک میلیون عدد تولید می‌شود که حجم بالایی به حساب آمده و قابل استفاده نیست. با کاهش قدر به ۵ احتمال وجود ۴ ستاره در میدان دید به ۸۴/۵٪ کاهش می‌یابد که در هیستوگرام شکل (۵) قابل مشاهده است. استفاده از قدر ۵ باعث تولید پایگاه داده با ۴۳۶۶۴۶ ترکیب می‌شود که در قیاس با قدرهای ۵/۵ و ۶ مناسب است و توزیع یکنواخت‌تری دارد.



شکل۵- تعداد ستارگان در میدان دید ۱۵ درجه با قدر ۵

یکنواخت‌سازی آسمان

برای بهینه‌کردن روند تشخیص الگو در حسگرهای ستاره، از کاتالوگ ستاره با توزیع یکنواخت استفاده می‌شود. در این نوع کاتالوگ، فاصلهٔ زاویه‌ای ستارگان در یک محدودهٔ مشخص به‌گونه‌ای درنظرگرفته می‌شود که احتمال وجود ۵ یا ۶ ستاره در تصویر تثبیت شود. برای تولید این نوع کاتالوگ، توزیع یکنواختی از نقاط روی سطح کره واحد درنظرگرفته و ستارگان موجود در آسمان به محدوده‌ای نزدیک این نقاط نسبت داده می‌شوند. در هر فریم اگر تعداد ستارگان بیشتر از تعداد مورد نیاز بود، بهترین ستارگانی که با توجه به مشخصه‌های شناسایی الگوریتم تعیین می‌شوند (به عنوان مثال ستارگان پرنورتر یا ستارگان نزدیک به مرکز) جدا شده و در تصویر باقی می‌مانند و درصورتی‌که تعداد ستارهٔ کمتری در محدودهٔ دید وجود داشت، از ستارگان با قدر کمتر استفاده می‌شود.

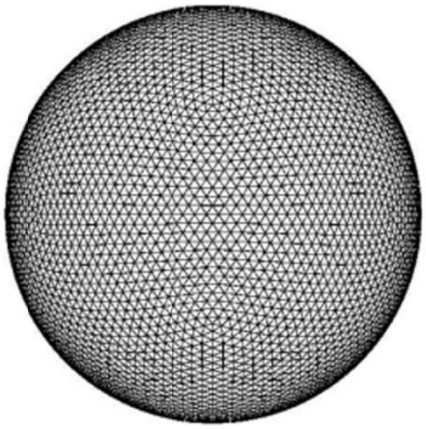
مشکل استفاده از روش‌های یکنواخت‌سازی، همپوشانی محدوده‌های دید است که با حذف ستارگان تکراری رفع می‌شود. یکی از متداول‌ترین روش‌های یکنواخت‌سازی آسمان به شرح زیر است [۶].

۱. روش قطاع‌های کروی

در روش قطاع‌های کروی[14]، آسمان به قطاع‌هایی با شکل‌ها و مساحت‌های یکسان تقسیم می‌شود. این شکل‌ها می‌توانند هر شکلی از جمله دایره، مثلث، مربع یا حتی شش ضلعی را شامل شوند. در نتیجه نقاط مرکزی این شکل‌ها، توزیع یکنواختی از نقاط روی کرهٔ سماوی را طبق شکل (۶) به نمایش خواهند گذاشت. سپس ستارگان موجود در هر قطاع با توجه به قدرشان فیلتر می‌شوند. به جای استفاده از مشخصهٔ قدر می‌توان از نزدیکی ستارگان با قدر مناسب به مرکز قطاع نیز استفاده کرد. این روش همان‌طورکه ذکر شد، با مشکل هم‌پوشانی محدوده‌های دید مواجه است.

یکنواخت‌سازی آسمان با استفاده از روش قطاع‌های کروی به دو صورت عملی شده است. در حالت اول، قطاع‌های دایروی به قطر ۱۵ درجه با گام نیم درجه درنظرگرفته شده و ۵ ستارهٔ برتر که بهترین قدر را دارند، انتخاب می‌شوند.

در این روش تعداد ۲۸۸۵ ستاره برگزیده می‌شوند که منجر به تولید ۲۵۴۴۴۷۹ مثلث می‌شود که همچنان بسیار فراتر از حد مطلوب به حساب می‌آید.



شکل ۶- یکنواخت‌سازی آسمان به کمک قطاع‌های یکسان [۷]

در حالت دوم، قطاع‌های مشابه درنظرگرفته شده ولی ستارگان منتخب، ستارگان نزدیک به مرکز هستند که ۲۱۳۵ ستاره با قدر ۶ به پایین را شامل می‌شوند. با وجود تعداد کمتر ستارگان ولی ترکیب مثلثات برابر ۲۶۵۶۶۹۵ است. این افزایش تعداد ترکیبات از چیدمان ستارگان نسبت به یکدیگر و نسبت به مرکز ناشی می‌شود. ستارگانی که در این حالت برگزیده می‌شوند شرایط به مراتب مناسب‌تری دارند و ترکیبات تولیدی از آنها شرایط ذکر شده در بند ۳ را ارضا می‌کنند.

14. Spherical Patches

www.SID.ir

با تفاسیر ارائه شده و ترکیبات تولیدی از شرایط مختلف قابل درک است که بهترین حالت کاهش قدر به ۵ با ثابت نگه‌داشتن میدان دید ۱۵ درجه است که تعداد ترکیبات آن برابر ۴۳۶۶۴۶ است.

روش جستجو

مهم‌ترین بخش هر الگوریتم شناسایی در حسگر ستاره‌یاب، بخش جستجوی آن به حساب می‌آید. یک روش جستجوی بهینه که در کم‌ترین زمان دقیق‌ترین مقایسه را بین اطلاعات ورودی و پایگاه داده انجام دهد موفقیت عملکرد یک الگوریتم را رقم می‌زند. روش‌های معمول موجود مانند درخت دو دویی[15] با وجود دقت مناسب، زمان بالا و محاسبات زیادی احتیاج دارند، در نتیجه روش‌های مبتنی بر جستجوی مقایسه‌ای چندان مناسب به حساب نمی‌آیند.

در سال ۱۹۹۷ مورتاری روش جدیدی برای جستجو و مقایسهٔ عناصر پایگاه داده با اطلاعات ورودی ابداع کرد [۸ و ۷] که از آن سال تاکنون، روش اصلی جستجوی اکثر الگوریتم‌های شناسایی ستاره به‌شمار می‌رود و علاوه بر کاربرد در شناسایی ستارگان عمومیت خود را در سایر مباحث نیازمند مقایسهٔ عنصر به عنصر نیز حفظ کرده است. روش جستجوی فوق که به روش جستجوی بردار k معروف است در ادامه به طور خلاصه بیان شده است و طبق جدول (۳) که قسمتی از یک پایگاه داده است، مثالی در مورد آن حل خواهد شد.

فرض کنیم y آرایه‌ای از داده‌ها به طول n باشد (این داده‌ها می‌توانند فاصلهٔ زاویه‌ای بین زوج ستاره‌ها در میدان دید باشند) و s همان آرایه اما مرتب شده به‌ترتیب نزولی باشد یعنی $s(i) \le s(i+1)$.

فرض کنیم I برداری باشد که نحوهٔ مرتب شدن را حفظ کند یعنی $y(I(i)) = s(i)$. با فرض اینکه y به‌طور یکنواخت توزیع شده است، معادلهٔ خط مستقیمی که دو نقطهٔ $[1, y_{min}]$ و $[n, y_{max}]$ را به هم متصل می‌کند به صورت (۳) خواهد بود:

$$z(x) = mx + q \qquad (۳)$$

که در آن $m = \frac{y_{max} - y_{min}}{n-1}$ و $q = y_{min} - m$. با شروع از $k(1) = 0$ بردار k به‌صورت زیر ساخته می‌شود:

$$k(i) = j \quad if \quad s(j) \le z(i) \le s(j+1) \qquad (۴)$$

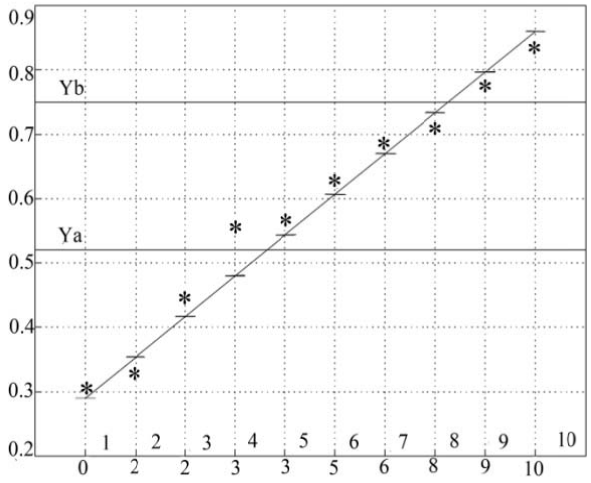
که در آن اندیس i از ۲ تا (n-1) تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، $k(i)$ تعداد عنصرهای $s(j)$ کمتر از مقدار $z(i)$ را مطابق شکل (۷) می‌دهد.

15. Binary Search Tree

بعد از اینکه بردار k ساخته شد، یافتن دو اندیسی که به ازای آنها تمام داده‌هایی که در بازه $[y_a, y_b]$ قرار می‌گیرند مشخص شوند، تقریباً یک کار بدون جستجو است. در حقیقت اندیس‌های مرتبط با این مقادیر از (۵) به‌دست می‌آیند:

$$j_b = \left\lfloor \frac{y_a - q}{m} \right\rfloor, \quad j_t = \left\lceil \frac{y_b - q}{m} \right\rceil \qquad (۵)$$

که در آن تابع $\lfloor x \rfloor$ اولین عدد صحیح کوچک‌تر از x و $\lceil x \rceil$ اولین عدد صحیح بزرگ‌تر از x است.



شکل ۷- روش بردار k

بعد از محاسبهٔ j_b و j_t می‌توان مقادیر زیر را از (۶) محاسبه کرد:

$$k_{start} = k(j_b) + 1, \; k_{end} = k(j_t) \qquad (۶)$$

داشتن مقادیر k_{start} و k_{end} بیانگر راه‌حل مسئلهٔ جستجو است چراکه عنصرهای مورد جستجوی $y_i \in [y_a, y_b]$ تمام مقادیر $y(I(k))$ هستند که در آن k از k_{start} تا k_{end} تغییر می‌کند.

در نمونه مورد مقایسه در صورتی‌که q=۱.۰۰۰۲ و m=۰.۰۰۰۱۳۵ بوده و ورودی الگوریتم، کوچک‌ترین زاویه برابر ۲۸.۶۰۴۰۹ درجه باشد برای شروع عملیات جستجو باید یک محدودهٔ بالا و پایین حول زاویهٔ کوچک‌تر انتخاب شود.

این محدوده را می‌توان با اعمال یک اسکالر αerror که اندازهٔ آن رابطهٔ مستقیم با اندازهٔ بازهٔ انتخاب شده دارد، ایجاد کرد. به عنوان نمونه درصورتی‌که αerror =۰.۰۱۲ انتخاب شود بازهٔ مورد بررسی از اندیس ۲۶۳۰۵۳ شروع و به ۲۶۳۲۷۲ ختم می‌شود که شامل ۲۱۹ مثلث است درحالی‌که اندیس مثلث مطلوب ۲۶۳۱۸۸ است.

هرچه αerror کوچک‌تر باشد این محدوده کوچک‌تر می‌شود و الگوریتم سعی می‌کند خود را بیشتر به زاویهٔ ورودی محدود کند مثلاً

Archive of SID
www.SID.ir

اگر αerror =۰.۰۰۰۱ باشد، محدودهٔ جستجو از اندیس ۲۶۳۱۸۴ تا ۲۶۳۱۹۰ تغییر خواهد کرد که زمان جستجوی کمتری لازم دارد. همان‌طورکه از جدول (۳) نیز قابل مشاهده است زوایای کوچک در بازه‌های متوسط، در رقم چهارم اعشار با یکدیگر تفاوت دارند، در صورتی‌که میزان αerror مقدار کوچکی درنظرگرفته شود ولی زاویهٔ کوچک با دقت چهار رقم اعشار با میزان واقعی موجود در پایگاه داده مطابقت نداشته باشد امکان اینکه ترکیب اصلی حتی در بازهٔ تشخیص قرار نگیرد بسیار است. حال همان حالت ابتدایی مثال را درنظر بگیرید که ۲۱۹ مثلث با توجه به زاویهٔ کوچک‌شان انتخاب شده‌اند. در اینجا برای رسیدن به جواب یکتا لازم است زاویهٔ بزرگ‌تر نیز با پایگاه داده مقایسه شود ولی این زاویه فقط با بازه به‌دست آمده مقایسه خواهد شد و آن ترکیبی که کم‌ترین فاصله را از زاویهٔ بزرگ‌تر داشته باشد، پاسخ مسئله انتخاب می‌شود. در اینجا نیز نکتهٔ مشابهی وجود دارد، درصورتی‌که صرفاً کم‌ترین فاصلهٔ زاویهٔ بزرگ‌تر از مقادیر موجود در پایگاه داده درنظرگرفته شود همچنان امکان تشخیص اشتباه وجود دارد چرا که اگر میزان αerror به اندازهٔ کافی بزرگ درنظر گرفته نشده باشد و مثلث اصلی در بازه قرارنگرفته باشد با محدودکردن زاویهٔ بزرگ‌تر، الگوریتم قطعاً به پاسخ اشتباه می‌رسد، در نتیجه برای منطبق‌کردن زاویهٔ بزرگ‌تر باید تفاوت مقدار ورودی با مقدار موجود در بازه از یک حد آستانه‌ای کوچک‌تر باشد، این شرط باعث می‌شود درصورتی‌که به دلیل دقت پایین در محاسبهٔ زاویه، αerror از حد مناسب کوچک‌تر بود الگوریتم بدون تشخیص به کار خود پایان دهد که بهتر از پاسخ غلط است!

صحه‌گذاری الگوریتم

برای صحه‌گذاری الگوریتم شناسایی ستاره فرض می‌شود زوایای تولیدی از شبیه‌ساز آسمان و آزمون‌های آسمان شب بدون انحراف وارد الگوریتم شوند تا بتوان از صحت عملکرد جستجو و همچنین مناسب بودن مقادیر محدودهٔ تشخیص اطمینان حاصل کرد. برای صحه‌گذاری الگوریتم فرض می‌کنیم خط دید به‌طور تصادفی انتخاب شود و قسمتی از آسمان را نشانه رود، ستاره‌های موجود در این محدوده دید و مختصات آنها در تصویر به الگوریتم شناسایی داده و الگوریتم با انتخاب یک مثلث پایه شروع به شناسایی می‌کند. برای انتخاب مثلث پایه، می‌توان سه شرط به الگوریتم اعمال کرد.

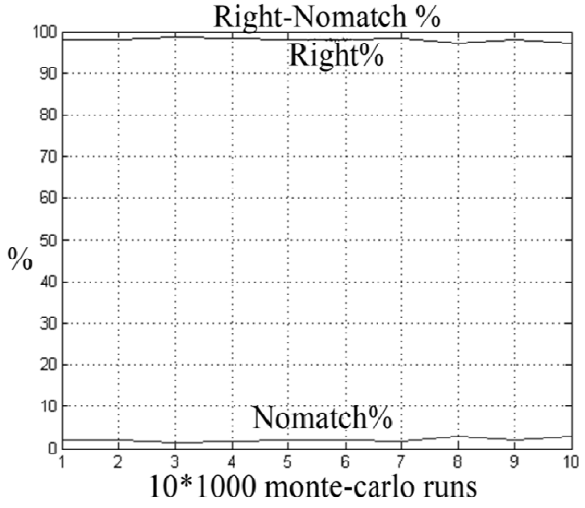
۱. نزدیکی ستارگان به مرکز تصویر
۲. قدر
۳. مساحت مثلث تشکیل شده

شرط معمول برای شروع انتخاب ستارگان در تصویر فاصلهٔ آنها از یکدیگر و همچنین از مرکز تصویر است. در حالت کلی فرض می‌شود ستارگانی از تصویر انتخاب شوند که زاویهٔ فضایی‌اشان با خط دید از آستانه‌ای مشخص بزرگ‌تر و از حد آستانهٔ دیگری کوچک‌تر باشد که باعث تولید یک حلقه در مرکز تصویر می‌شود.

شرط دوم برای انتخاب ستارگان مناسب در تصویر قدر آنهاست. با وجود اینکه الگوریتم‌های پردازش تصویر موجود قادرند با دقت قابل قبولی قدر ستارگان تصویربرداری شده را تخمین بزنند ولی اکثریت الگوریتم‌های شناسایی از این مشخصهٔ ستارگان در شناسایی استفاده نمی‌کنند چرا که میزان اندازه‌گیری شده، همواره تخمینی از مقدار حقیقی بوده و این عدم صحت می‌تواند شناسایی را با خطا مواجه کند ولی برای انتخاب ستارگان مناسب در تصویر می‌توان از تخمین قدر ستارگان موجود در تصویر استفاده کرده و برای شروع، ستارگانی انتخاب شوند که قدرشان از سایرین کمتر بوده و به عبارت دیگر سه ستارهٔ روشن‌تر تصویر باشند.

شرط سوم مربوط به مساحت مثلث منتخب است، در صورتی‌که مساحت مثلث از میزان معینی کوچک‌تر باشد خطاهای شناسایی بیشتر بوده و الگوریتم را با مشکل مواجه خواهند کرد.

با وجود بدون خطا بودن زوایا و تطبیق یک به یک زوایای ورودی و زوایای موجود در پایگاه داده، αerror در میزان صحت پاسخ‌ها بسیار تاثیرگذار است و به دلیل تصادفی بودن خط دید می‌تواند درصد شناسایی درست را بین ۹۸/۹ تا ۱۰۰ درصد تغییر دهد چراکه با کوچک‌ترشدن بازهٔ تشخیص ترکیباتی که در لبه‌های میدان دید می‌افتند یا در ابتدا و انتهای پایگاه داده هستند شناسایی نشده و درصد عدم تطبیق را بالا می‌برند. در این آزمایش همان‌طورکه انتظار می‌رفت پاسخ غلط تشخیص داده نشده است. نتایج مربوط به ۱۰ آزمایش با ۱۰۰۰ خط دید تصادفی را می‌توان در شکل (۸) مشاهده کرد.



شکل ۸- میزان تشخیص درست و عدم تشخیص برای خط دید تصادفی

Archive of SID
www.SID.ir

نتیجه‌گیری

رایانهٔ مورد استفاده دارای مشخصات PC Intel(R) Core™ i7 CPU 12Gram است و زمان محاسباتی با توجه به نرخ به‌روزرسانی کمتر از ۲ هرتز، در محدودهٔ مجاز باقی می‌ماند. همچنین از برنامهٔ متلب برای تولید کدهای شناسایی استفاده شده است.

حجم پایگاه داده با توجه به قدر و محدودهٔ دید انتخابی اندازه مناسبی دارد، چرا که تخمین رفتار داده‌های پایگاه داده با استفاده از یک خط ممکن بوده و توزیع مناسبی از محدوده‌ها را در حین جستجو برمی‌گرداند. درصورتی‌که با تغییر مشخصات فنی حسگر مجبور به افزایش پایگاه داده شویم لازم است از روش‌های معمول برای کاهش حجم یا تخمین رفتار پایگاه داده از طریق بردار k چندسطحی استفاده کرد.

از پیاده‌سازی الگوریتم بدون بعد و نتایج به‌دست آمده می‌توان امکان کاربردی بودن و عملیاتی‌سازی الگوریتم روی ستاره‌یاب را بررسی کرد. در ادامه پیشنهاد می‌شود الگوریتم در حضور خطاهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری گوناگون که موجب تغییر زوایا می‌شوند آزمایش شده و نتایج آن با مقادیر مطلوب مقایسه شود.

مراجع

[1] Padgett, C. and Kreutz-Delgado, K., "A Grid Algorithm for Autonomous Star Identification," *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine,* Vol. 7, No.1, 1997, pp. 202-213.

[2] Kolomenkin, M., Pollak, S., Shimshoni, I. and Lindenbaum, M., "Geometric Voting Algorithm for Star Trackers," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst*. Vol. 44, No.1, 2008, pp. 441–456.

[3] Mortari, D., Junkins, J. J. and Samaam, M. A. "Lost-In-Space Pyramid Algorithm for Robust Star Pattern Recognition," *Presented as paper AAS 01-004 at the Guidance and Control Conference*, Breckenridge, Colorado, 2001.

[4] Mortari, D. and Samaan, M. A., "Non-Dimensional Star Identification for Uncalibrated Star Cameras," *The Journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 54, No. 1, 2006, pp. 1–17.

[5] Swanzy, M. J., "Analysis and Demonstration: A Proof of Concept Compass Star Tracker," [Master Thesis], Texas A&M University December, 2006.

[6] Samaan, M. A., Bruccoleri, Ch., Mortari, D., and Junkins, J., "Novel Techniques for Creating Nearly Uniform Star Catalog," Texas A&M University, Paper AAS03-609, 2003.

[7] Mortari, D., "Search-less Algorithm for Star Pattern Recognition," *Journal Astronaut. Science*, Vol. 45, No.2, 1997, pp. 179–194.

[8] Mortari, D., "K-vector Range Searching Techniques," *AAS 00-128 of the 10th Annual AIAA/AAS Space Flight Mechanics Meeting,* Clearwaters, FL, 2000.

Archive of SID

www.SID.ir