شبیه‌سازی الگوریتم‌های جستجو در پایگاه داده به‌منظور افزایش سرعت شناسایی ستاره

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

مونا زاهدنمازی[1*]، علیرضا طلوعی[2]، رضا قاسمی[3]
۱- دانشجوی دکترا، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، m_zahednamazi@sbu.ac.ir
۲- دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم

چکیده

چالش اصلی برای استفاده از حسگر ستاره، به‌عنوان یک حسگر هنگام تعیین وضعیت، مسئله زمان است. تعیین وضعیت به‌وسیلهٔ حسگر ستاره شامل پنج مرحلهٔ اصلی است: انتخاب کاتالوگ و الگوریتم شناسایی ستاره، ساخت پایگاه داده، پردازش تصویر، شناسایی ستاره و درنهایت تعیین وضعیت. شناسایی ستاره شامل پیاده‌سازی الگوریتم منتخب بر ستارگان میدان دید و جستجو در پایگاه داده می‌شود. در فرایند تعیین وضعیت به‌وسیلهٔ حسگر ستاره، جستجو در پایگاه داده بیشترین زمان را به خود اختصاص می‌دهد. این مقاله به مطالعهٔ سه روش جستجو در پایگاه داده، بررسی سرعت جستجو و ملاحظه روش‌ها برای به‌کارگیری در حسگر ستاره می‌پردازد. این روش‌ها عبارت‌اند از: جستجوی سه‌بخشی، جستجوی فیبوناچی و میان‌یابی. از الگوریتم‌های ارائه‌شده تاکنون برای جستجو در پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره استفاده نشده است. به‌منظور بررسی تأثیر ابعاد پایگاه داده بر زمان شناسایی هر روش با استفاده از ۷ پایگاه داده با ابعاد مختلف، موردمطالعه قرارگرفته است. نتایج به‌دست‌آمده، برتری روش جستجوی میان‌یابی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: حسگر ستاره، جستجو در پایگاه داده، الگوریتم هرمی، روش جستجوی فیبوناچی، روش جستجوی میان‌یابی، روش جستجوی سه‌بخشی

Simulation of database search algorithms towards star-identification speed enhancement

Mona zahednamazi[1], Alireza Toloei[2], Reza Ghasemi[3]
1 PhD Student, Faculty of new technologies and aerospace engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, m_zahednamazi@sbu.ac.ir
2 Associate Professor, Faculty of new technologies and aerospace engineering, Shahid Beheshti University, Tehran,
3 Associate Professor, Faculty of engineering,Qom university,Qom

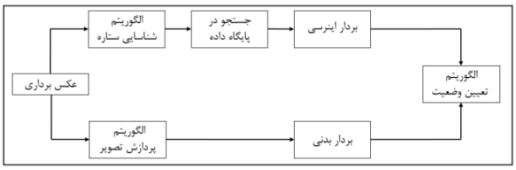
Abstract

The main challenge of the star sensor as a real-time sensor is the execution time of attitude determination. Attitude determination using the star sensor includes five main steps: star catalog and identification algorithm selection, database construction, image processing, star identification and finally, attitude determination. Star identification consists of the implementation of the selected identification algorithm on the field of view stars and database searching. in the process of attitude determination using the star sensor, database searching is the most time-consuming part. This paper deals with three methods for database searching and surveys the search time for each of the presented algorithms also the consideration of using them as the database search methods for the star sensor. The methods are the ternary search technique, Fibonacci search technique, and interpolation search technique. The presented algorithms have not been used so far in the star sensor database searching. To survey the influence of the database dimensions on the identification time, each of the presented methods was studied using seven databases with different dimensions. The results show the superiority of the interpolation search method.

Keywords: *Star sensor, Database search, Pyramid algorithm, Ternary search technique, Fibonacci search technique, interpolation search technique.*

۱. مقدمه

یکی از نیازمندی‌های اساسی در فضاپیما و ماهواره تعیین وضعیت است [۱]. بدون دانش از وضعیت، فضاپیما یا هر وسیلهٔ دیگر قادر نخواهد بود در مسیر مأموریت خود حرکت کند و در انجام آن با شکست مواجه خواهد شد. که برای تعیین آن از حسگرهای وضعیت استفاده می‌شود. معروف‌ترین حسگرهای وضعیت عبارتنداز: حسگر خورشید، حسگر زمین، مغناطیس‌سنج، ژیروسکوپ و ستاره. حسگر ستاره یکی از جدیدترین حسگرهای وضعیت است که به‌خصوص برای مأموریت‌های خارج از جو بسیار مناسب است. حسگر ستاره نسبت به سایر حسگرهای وضعیت مزایای بسیاری دارد. کاربرد این حسگر برخلاف حسگر خورشید، زمین و مغناطیس‌سنج به تعیین وضعیت در اطراف زمین محدود نمی‌شود. به دلیل پراکندگی ستارگان در سراسر کرهٔ سماوی، حسگر ستاره در فضای عمیق نیز کاربردی است. همچنین برخلاف نمونه‌های متداول حسگرهای نام برده شده که قابلیت تعیین وضعیت در دو محور را دارند، این حسگر قادر به تعیین وضعیت سه محوره است. به دلیل ثابت بودن موقعیت ستارگان در فضا، حسگر ستاره می‌تواند وضعیت را با دقت بسیار زیاد (از مرتبهٔ ثانیهٔ قوسی) تعیین کند [۲]. حسگر ستاره دارای دو مد عملیاتی گم‌شده در فضا و بازگشتی است. در مد گم‌شده در فضا، این حسگر قادر است بدون اطلاع از وضعیت پیشین و کمک‌گرفتن از سایر حسگرها و ابزارها، وضعیت فعلی را فقط با اتکا بر خود، تعیین کند. این مد تا حدودی زمان‌بر است؛ زیرا حسگر باید در سراسر آسمان جستجو کند. در مد بازگشتی حسگر ستاره وضعیت فعلی را با کمک اطلاعات قبلی وضعیت تعیین می‌کند؛ بنابراین در مد بازگشتی وضعیت با سرعت بیشتری تعیین می‌شود، زیرا با دانستن حدودی وضعیت نیاز به جستجو در سراسر آسمان نیست [۳]. تعیین وضعیت با استفاده از حسگر ستاره شامل پنج مرحله است: ۱) انتخاب کاتالوگ و الگوریتم شناسایی ستاره؛ ۲) ساخت پایگاه داده بر اساس کاتالوگ ستاره و الگوریتم شناسایی منتخب؛ ۳) عکس‌برداری از آسمان، پردازش تصویر و تعیین مختصات مرکز ستاره؛ ۴) پیاده‌سازی الگوریتم منتخب بر ستارگان میدان دید، جستجو در پایگاه داده و شناسایی ستاره؛ ۵) پیاده‌سازی یکی از روش‌های تعیین وضعیت. فرایند تعیین وضعیت توسط حسگر ستاره در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نحوهٔ عملکرد یک حسگر ستاره

پایه و اساس حسگر ستاره، کاتالوگ ستاره است که فهرستی از ستارگان آسمان و ویژگی‌های آن‌هاست. از میان این ویژگی‌ها شمارهٔ شناسایی ستاره، قدر ستاره (معیاری از سنجش روشنایی ستاره) و زوایای بعد و میل ستاره (مشخص‌کنندهٔ مکان ستاره در کرهٔ سماوی) در حسگر ستاره مورداستفاده قرار می‌گیرند. هر حسگر ستاره از یک الگوریتم شناسایی ستاره بهره می‌برد. الگوریتم شناسایی در حالت کلی الگویی است که روی ستاره‌های فهرست شده در کاتالوگ ستاره پیاده‌سازی شده است. این الگو می‌تواند ویژگی‌های مختلفی مانند زوایای میان ستاره‌ها، فواصل آن‌ها و... باشد. برای شناسایی ستاره صدها الگوریتم ازجمله الگوریتم‌هایی مانند شبکهٔ

عصبی، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبکه و ... پیشنهاد شده است باوجوداین یکی از متداول‌ترین ویژگی‌های مورداستفاده در مأموریت‌های واقعی، استفاده از زوایای میان ستارگان است؛ زیرا از اعوجاجات سیستم تصویربرداری تأثیر نمی‌پذیرد [۴]. با استفاده از کاتالوگ ستاره و الگوریتم شناسایی ستاره پایگاه داده ساخته می‌شود و پیش از آغاز مأموریت در حافظهٔ حسگر بارگذاری می‌شود. مراحل ۳، ۴ و ۵ یعنی پردازش تصویر، شناسایی ستاره و تعیین وضعیت در حین مأموریت انجام می‌شوند. هر حسگر ستاره شامل یک بخش عکس‌برداری است. این بخش از ستاره‌های میدان دید حسگر عکس می‌گیرد. در حسگر ستاره بردار اینرسی از شناسایی ستاره و با پیاده‌سازی الگوریتم شناسایی منتخب بر ستارگان تصویر به دست می‌آید و بردار بدنی نیز با توجه به موقعیت مختصات مرکز ستارگان در تصویر تعیین می‌شود. برای تعیین مختصات مرکز ستاره الگوریتم‌های متعددی ازجمله مرکز جرم، تابع نقطه گستر، ردیابی پرتو [۵]... پیشنهاد شده است که برخی از الگوریتم‌ها سریع‌تر و برخی دقیق‌ترند. برای تعیین وضعیت نیز می‌توان هم از روش‌های قطعی مبتنی بر حل مسئلهٔ واهبا و هم از روش‌های تخمینی مانند فیلتر کالمن استفاده کرد. با وجود دقت بالاتر فیلتر کالمن، در کاربردهای عملی حسگر ستاره استفاده از روش‌های قطعی مبتنی بر حل مسئله واهبا به دلیل سرعت بالاتر متداول است [۶]. با توجه به موارد عنوان‌شده، برای انجام هر مرحله انتخاب‌های متعددی وجود دارد، باوجوداین در کاربردهای عملی تعداد انتخاب‌ها بسیار محدودند زیرا اگر زمان تعیین وضعیت طولانی شود، نتیجه دیگر قابل‌استفاده نیست. در حسگر ستاره لزوماً روش‌های پیچیده بهترین روش‌ها نیستند، بلکه در رویکردی کاملاً متضاد ساده‌ترین و سریع‌ترین روش‌هایی که دقت بالایی دارند، در کاربردهای عملی مورداستفاده قرار می‌گیرند. به‌طور مثال در الگوریتم‌های شناسایی ستاره با وجود الگوریتم‌هایی مانند ژنتیک و شبکهٔ عصبی، الگوریتم هرمی در چندین مأموریت ازجمله ماهوارهٔ HETE[1] و قطب‌نمای ستاره‌ای-اینرسی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. در موضوع شناسایی ستاره علاوه بر نوع الگوریتم شناسایی مورداستفاده، یک فرایند اجتناب‌ناپذیر جستجو در پایگاه داده است. در کاربردهای عملی پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره معمولاً از ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ ساخته می‌شود. تعداد این ستارگان در کاتالوگ ستاره‌ای هیپارکوس ۵۰۴۵ ستاره است. درصورتی‌که با استفاده از این ستارگان در ساده‌ترین حالت یک پایگاه‌دادهٔ یک‌بعدی شامل زوایای میان زوج ستارگان ساخته می‌شود، این پایگاه داده شامل بیش از ۱۲۷۰۰۰۰۰ داده خواهد بود که پاسخ‌های موردنظر در میان این داده‌ها قرار دارد. بنابراین در موضوع جستجو در پایگاه داده هیچ راه ساده و کوتاهی برای یافتن پاسخ وجود ندارد. در پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره به‌طور خاص و به دلیل محدودیت‌هایی که در دقت سیستم‌های اندازه‌گیری وجود دارد، اغلب در جستجو بیش از یک پاسخ به دست می‌آید و پاسخ صحیح در میان پاسخ‌های یافت‌شده قرار دارد. در مقاله‌ها و پایان‌نامه‌های مربوط به حسگر ستاره برای جستجو در پایگاه داده تاکنون روش‌های نصف‌کردن و بردار k مورداستفاده قرار گرفته‌اند [۷]. آخرین روش جستجوی ارائه‌شده

1- High Energy Transient Explorer (HETE) satellite

در موضوع جستجو در پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره روش بردار k است که اساس متفاوتی با سایر روش‌های جستجو در پایگاه داده دارد. نگارندگان در مقاله‌ای جداگانه روش‌های نصف‌کردن و بردار k را برای پایگاه داده متشکل از ستارگان روشن‌تر از قدر ۵ موردبررسی قرار داده‌اند [۸]. با وجود مزیت‌های روش بردار k این روش برای پایگاه‌های دادهٔ بزرگ مانند پایگاه‌دادهٔ متشکل از ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ که شامل بیش از دوازده میلیون و هفتصدهزار داده است، عملکرد چندان مناسبی ندارد. استفاده از روش بردار k برای جستجو در پایگاه‌های‌دادهٔ بزرگ به محدودهٔ زمانی وسیعی برای دستیابی به پاسخ‌ها منجر خواهد شد. به‌طور مثال برای الگوریتم شناسایی هرمی ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ در صورت استفاده از روش بردار k برای جستجو در پایگاه داده، محدودهٔ زمانی دستیابی به پاسخ بین ۰/۰۱ ثانیه تا بیش از ۰/۰۹ ثانیه متغیر است که با توجه به نسبت ۹ برابری برای بیشترین و کم‌ترین زمان، بازهٔ بزرگی تلقی می‌شود. باوجوداین، روش بردار k در بدترین حالت از روش‌های نصف‌کردن و سه‌بخشی پاسخ‌های بهتری دارد. در این مقاله سه روش جستجو در پایگاه داده بررسی شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از: سه‌بخشی، فیبوناچی و میان‌یابی. این روش‌ها و نتایج آن‌ها تاکنون در مقاله‌های داخلی و بین‌المللی مربوط به حسگر ستاره موردبررسی قرار نگرفته‌اند. برای استفاده از این روش‌ها در حسگر ستاره و دست‌یابی به‌تمامی پاسخ‌های موجود در کوتاه‌ترین زمان ممکن، روش خوشه‌بندی داده‌ها پیشنهاد شده است. این نوع خوشه‌بندی با توجه به دقت حسگر انجام می‌شود و با وجود سادگی، در حسگر ستاره بسیار کاربردی است در ادامه، بخش ۲ به توصیف کاتالوگ ستارگان و پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره می‌پردازد. در بخش ۳ الگوریتم شناسایی مورداستفاده معرفی می‌شود. روش‌های جستجو در پایگاه داده در بخش ۴ معرفی می‌شوند. بخش ۵ به مسئله خوشه‌بندی در پایگاه داده می‌پردازد. در بخش ۶ شبیه‌سازی‌ها و نتایج بیان می‌شود. بخش‌های ۷ و ۸ نیز به ترتیب به نتیجه‌گیری و مراجع اختصاص دارد.

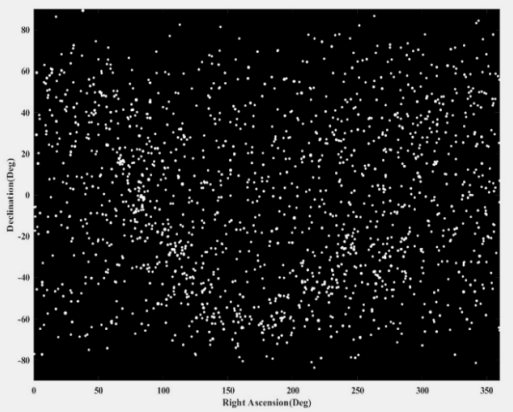
۲. پایگاه داده در حسگر ستاره

کاتالوگ ستاره فهرستی شامل ستارگان آسمان به همراه ویژگی‌های آن‌هاست. این فهرست می‌تواند تمام یا بخشی از آسمان را پوشش دهد. هر ستاره در هر کاتالوگ با یک شمارهٔ شناسایی منحصربه‌فرد مشخص می‌شود. در کاتالوگ‌های مشهور مانند هیپارکوس برای هر ستاره ده‌ها ویژگی گفته شده است. در میان کاتالوگ‌های ستاره، تعدادی از آن‌ها به دلیل دقت بالا در بیان موقعیت ستارگان، تعداد قابل‌قبول ستارگان و پوشش کامل آسمان برای کاربرد در حسگر ستاره مناسب‌تر هستند [۹]. کاتالوگ ستاره بخش بنیادی حسگرهای ستاره است. زیرا پایگاه داده با پیاده‌سازی الگوریتم شناسایی منتخب روی ستارگان فهرست شده در کاتالوگ ستاره‌ای منتخب ساخته می‌شود. به‌منظور کاهش حجم پایگاه داده، افزایش سرعت شناسایی و کاهش احتمال شناسایی اشتباه، تمامی ستارگان کاتالوگ برای ساخت پایگاه داده مورداستفاده قرار نمی‌گیرند و پایگاه داده با ستارگان روشن‌تر از یک قدر[۲] مشخص (معیار تعیین میزان روشنایی ستارگان قدر نامیده می‌شود، هرچه این عدد کوچک‌تر باشد، ستاره روشن‌تر است) ساخته

2- Magnitude (M_v)

می‌شود. در ساخت پایگاه داده اغلب از ستارگان روشن‌تر از قدر ۵ یا ۶ استفاده می‌شود. ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ در کاتالوگ ستاره‌ای هیپارکوس در شکل ۲ ترسیم شده‌اند.

الگوها و ویژگی‌هایی که یک گروه از ستارگان متشکل از دو یا تعداد بیشتری ستاره در کنار یکدیگر شکل می‌دهند، الگوریتم شناسایی ستاره نامیده می‌شود. این ویژگی می‌تواند زاویهٔ میان دو ستاره، مساحت مثلث تشکیل‌شده از سه ستاره [۱۰-۱۱]، شبکهٔ متشکل از تعدادی ستاره در یک همسایگی و ... باشد. از زمان ابداع حسگر ستاره تاکنون الگوریتم‌های شناسایی ستاره بسیاری پیشنهاد شده است [۱۲-۱۴].



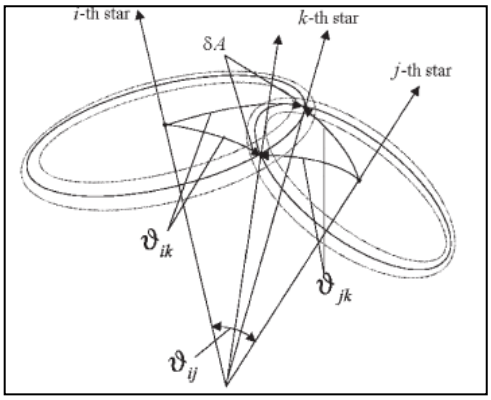
شکل ۲ .نقشهٔ ستارگان در کاتالوگ هیپارکوس(روشن‌تر از قدر ۶)

از پیاده‌سازی الگوریتم شناسایی بر ستارگان روشن‌تر از یک قدر مشخص در کاتالوگ ستاره، پایگاه داده حاصل می‌شود. پایگاه داده پیش از انجام مأموریت در حافظهٔ حسگر ستاره بارگذاری می‌شود. در حین انجام مأموریت همان الگوریتم شناسایی که پایگاه داده بر اساس آن ساخته شده بر ستارگان میدان دید پیاده‌سازی شده و سپس پایگاه داده برای یافتن گروهی از ستارگان که ویژگی‌های یکسانی با ستارگان میدان دید داشته باشند، مورد جستجو قرار می‌گیرد. ازآنجاکه این مرحله از تمامی مراحل فرایند تعیین وضعیت با حسگر ستاره زمان بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد، استفاده از یک الگوریتم مناسب برای جستجو در پایگاه داده اهمیت بسیار دارد.

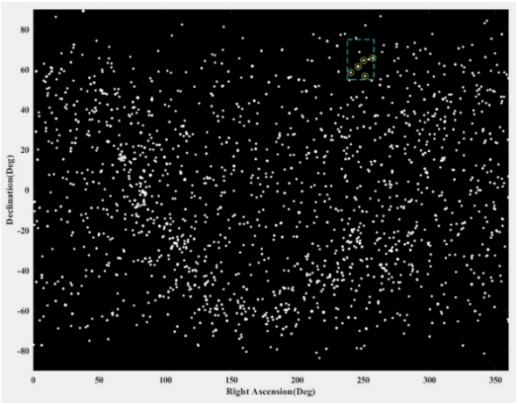
۳. الگوریتم شناسایی ستاره

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، پایگاه داده بر اساس یک الگوریتم شناسایی منتخب ساخته می‌شود. دقت و بازدهی الگوریتم‌های شناسایی با یکدیگر متفاوت است. فارغ از بحث الگوریتم‌های جستجو در پایگاه داده، زمان شناسایی از الگوریتم شناسایی مورداستفاده نیز تأثیر می‌پذیرد. علاوه بر آن الگوریتم شناسایی باید دقت و بازدهی بالایی نیز داشته باشد. الگوریتم شناسایی مورداستفاده در این مقاله الگوریتم هرمی است. این الگوریتم دقت و بازدهی بالایی دارد و در کاربردهای عملی نیز استفاده شده است. این الگوریتم به‌طور سنتی ۴ ستاره را در میدان دید شناسایی می‌کند. در الگوریتم هرمی برای شناسایی ستاره‌های میدان دید از زوایای میان زوج ستاره‌ها استفاده می‌شود. پس از محاسبهٔ زوایای زوج ستاره‌های میدان دید، با در نظر گرفتن محدودهٔ مشخصی برای خطا، پایگاه داده برای یافتن زوج ستاره‌هایی با زوایای میانی یکسان با زوایای میان هر یک از زوج ستاره‌های میدان دید، مورد جستجو قرارمی‌گیرد. پاسخ نهایی شامل ستارگان مشترک میان ستارگان یافت شده در پایگاه داده است. الگوریتم هرمی در شکل ۳ نشان داده شده است. به دلیل اینکه الگوریتم شناسایی موضوع اصلی این مقاله نیست خوانندگان علاقه‌مند برای جزئیات بیشتر می‌توانند به مرجع [۱۳] مراجعه کنند. در این

مقاله به‌منظور افزایش دقت و بازدهی، الگوریتم هرمی برای یافتن ۵ ستاره در میدان دید پیاده‌سازی شده است. ستاره‌های شناسایی‌شده با استفاده از الگوریتم هرمی در میدان دید یک حسگر ستاره با ابعاد $20^{\circ} \times 20^{\circ}$ در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. الگوریتم شناسایی ستاره هرمی



شکل ٤. پنج ستارهٔ شناسایی‌شده در میدان دید با استفاده از الگوریتم هرمی

۴. روش‌های جستجو در پایگاه داده

در حالت کلی جستجو به معنای یافتن یک مؤلفه مشخص یا یک مؤلفه با خواص مشخص در میان مجموعه‌ای از داده‌هاست. در مسئله جستجو در پایگاه داده در حسگر ستاره، پایگاه داده برای یافتن داده‌هایی که طبق الگوریتم شناسایی، مشخصات یکسانی با ستارگان میدان دید داشته باشند، مورد جستجو قرار می‌گیرد. به‌طورکلی دو حالت وجود دارد ۱) پاسخ در پایگاه داده وجود دارد ۲) پاسخ در پایگاه داده وجود ندارد. اگر پاسخ در پایگاه داده وجود داشته باشد، پس از جستجو یافت می‌شود و اگر وجود نداشته باشد، الگوریتم پس از جستجوی همه پایگاه داده خاتمه می‌یابد. در اینجا مباحثی مانند نویز و مقاوم‌سازی موضوعیت ندارد زیرا مسئله وجود یا عدم وجود است. مسئله در اینجا جستجوی تمامی پایگاه داده در کوتاه‌ترین زمان ممکن است. به‌منظور افزایش دقت و به‌خصوص افزایش سرعت این فرایند، در کاربردهای متنوع روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که در ادامه به توصیف و شبیه‌سازی سه روش در پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره پرداخته خواهد شد. در تمامی الگوریتم‌هایی که در ادامه بیان می‌شود، فرض بر این است که داده‌ها به ترتیب صعودی مرتب شده باشند.

۴-۱. روش سه‌بخشی

در این روش پایگاه‌دادهٔ مرتب‌شده به سه بخش مساوی تقسیم می‌شود، بنابراین در پایگاه داده دو جایگاه میانی وجود دارد. مقدار عددی دادهٔ مورد جستجو با مقادیر عددی داده‌های موجود در هر یک از دو جایگاه میانی مقایسه می‌شود [۱۵]. درصورتی‌که دادهٔ مورد جستجو با هیچ‌یک از داده‌های میانی برابر نباشد:

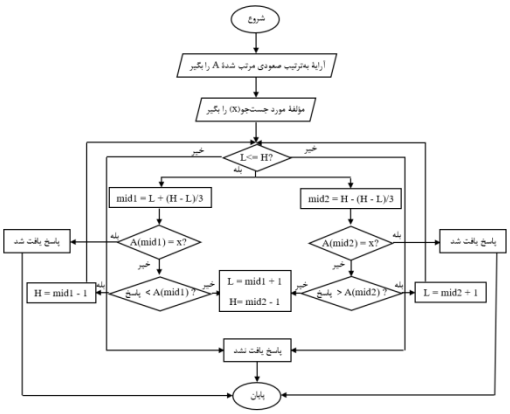
الف) اگر دادهٔ مورد جستجو از اولین دادهٔ میانی کوچک‌تر باشد بدین معناست که دادهٔ مورد جستجو در $\frac{1}{3}$ ابتدایی از پایگاه داده قرار دارد؛ بنابراین بخش‌های باقی‌مانده ازپایگاه‌داده حذف می‌شوند.

ب) اگر دادهٔ مورد جستجو از اولین دادهٔ میانی بزرگ‌تر و از دومین دادهٔ میانی کوچک‌تر باشد،

بدین معناست که دادهٔ مورد جستجو در $\frac{1}{3}$ میانی از پایگاه داده قرار دارد و باید این بخش در ادامه مورد جستجو قرار گیرد.

ج) اگر دادهٔ مورد جستجو از دومین دادهٔ میانی بزرگ‌تر باشد درواقع دادهٔ مورد جستجو در $\frac{1}{3}$ پایانی از پایگاه داده قرار دارد؛ بنابراین سایر بخش‌های پایگاه داده حذف شده و این بخش مورد جستجو قرار می‌گیرد.

این فرایند در گام‌های بعد تا زمان حصول نتیجه ادامه می‌یابد. روندنمای اجرای این الگوریتم جستجو در شکل ۵ نشان داده شده است. روش جستجوی سه‌بخشی نسبت به روش سنتی نصف کردن که در آن پایگاه داده به دو بخش مساوی تقسیم شده و در هر گام دادهٔ مورد جستجو با یک دادهٔ میانی مقایسه می‌شود، سرعت بیشتری دارد زیرا در هر گام به‌جای جستجو در نیمی از پایگاه داده، $\frac{1}{3}$ از پایگاه داده مورد جستجو قرار می‌گیرد.



شکل ۵. روندنمای روش جستجوی سه‌بخشی

۴-۲. روش فیبوناچی

دنبالهٔ فیبوناچی یک سری از اعداد است که در آن هر عدد در دنباله از مجموع دو عدد پیشین خود به دست می‌آید. البته اولین و دومین عدد در دنباله یعنی ۰ و ۱ از این قاعده مستثنی هستند. رابطهٔ (۱) روش به دست آمدن این دنباله را نشان می‌دهد.

$$F(j) = F(j-1) + F(j-2) \quad for \quad j \geq 2 \qquad (۱)$$
$$F_0 = 0 \quad , F_1 = 1$$

با توجه به رابطهٔ (۱) چند عدد ابتدایی این دنباله را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

F = ۰,۱,۱,۲,۳,۵,۸,۱۳,۲۱,۳۴,۵۵,...

آنچه سری فیبوناچی را از سایر سری‌های اعداد متمایز می‌کند این نکته است که نسبت هر دو عدد متوالی در این دنباله درنهایت به نسبت طلایی یعنی ۱/۶۱۸ همگرا می‌شود.

روش جستجوی فیبوناچی ابتدا توسط فرگوسن ابداع شد [۱۶] و پس‌ازآن توسط افراد مختلف اصلاحاتی روی آن انجام گرفت [۱۷]. این روش در بهینه‌سازی نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد [۱۸-۱۹]. در این روش، جستجو در یک پایگاه‌دادهٔ مرتب‌شده انجام می‌شود. برخلاف روش سه‌بخشی که در آن پایگاه داده به بخش‌های مساوی تقسیم می‌شد، در روش فیبوناچی پایگاه داده به بخش‌های نامساوی تقسیم می‌شود. این بخش‌بندی با استفاده از اعداد فیبوناچی انجام می‌شود.

مراحل روش جستجوی فیبوناچی به شرح زیر است [۲۰]:

۱) اگر A پایگاه داده، n ابعاد پایگاه داده، x مؤلفه مورد جستجو و F سری فیبوناچی باشد، کوچک‌ترین عدد فیبوناچی که بزرگ‌تر یا مساوی با n است را بیابید.

۲) Offset = 0

۳) i=min(offset+F(j-2),n)

۴) مؤلفه موجود در جایگاه iام پایگاه داده را بررسی کنید. اگر با مؤلفه مورد جستجو برابر بود،

پاسخ یافت شده است. در غیر این صورت اگر:

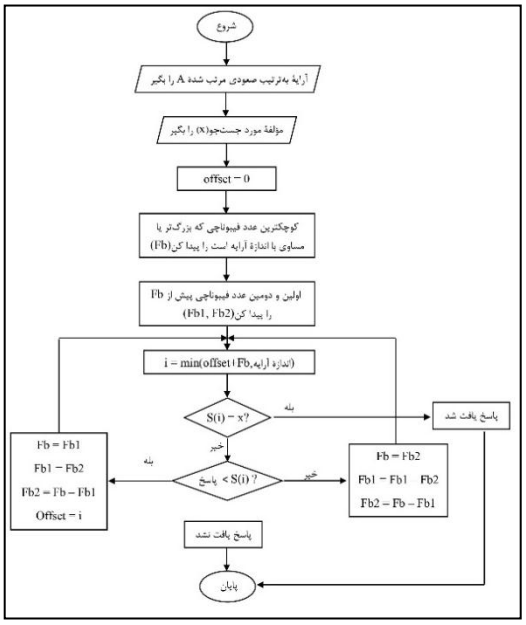
الف) A(i) < x

F(j) = F(j-1)
F(j-1) = F(j-2)
F(j-2) = F(j) – F(j-1)
Offset = i

ب) A(i) > x

F(j) = F(j-2)
F(j-1) = F(j-1) -F(j-2)
F(j-2) = F(j) – F(j-1)

روندنمای روش جستجوی فیبوناچی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. روندنمای روش جستجوی فیبوناچی

در روش فیبوناچی برای بخش‌بندی پایگاه داده به‌جای ضرب و تقسیم از جمع و تفریق استفاده می‌شود که برای برخی پردازنده‌ها بهینه است.

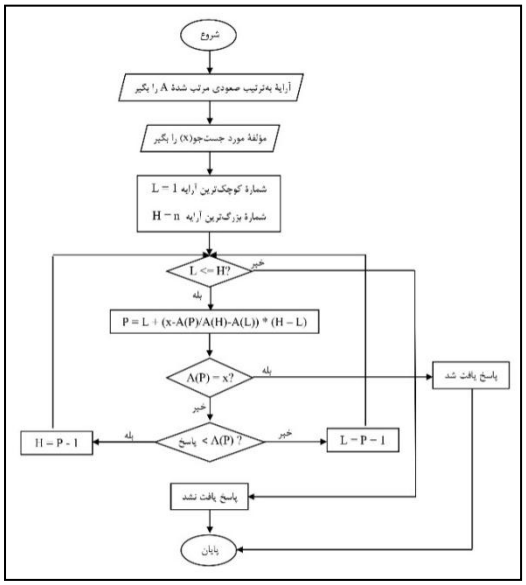
۴-۳. روش میان‌یابی

این روش ابتدا در سال ۱۹۵۷ توسط پترسون مطرح شد [۲۱]، اما بعدها در سال ۱۹۷۷ موردبررسی دقیق‌تری قرار گرفت [۲۲]. این روش در بهینه‌سازی [۲۳] و پایگاه‌های‌دادهٔ دینامیک [۲۴] مورداستفاده قرار گرفته است. روش میان‌یابی الگوریتمی است که برای جستجو در یک پایگاه داده مرتب‌شده از مؤلفه‌های اسکالر مورداستفاده قرار می‌گیرد. اگر x مقدار مؤلفه مورد جستجو در بازهٔ A باشد، آنگاه جایگاه آن (P) در بازهٔ مورد جستجو با استفاده از رابطهٔ (۲) تخمین زده می‌شود [۲۵].

$$P = l + ((x - A[l]) \times (h - l)/(A[h] - A[l])) \quad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، l حد پایین و h حد بالای بازهٔ مورد جستجو است.

نحوهٔ اجرای این الگوریتم در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. روندنمای روش جستجوی میان‌یابی

درصورتی‌که جایگاه به‌دست‌آمده صحیح نباشد:

الف) اگر مؤلفه مورد جستجو از مؤلفه یافت شده کوچک‌تر باشد، آنگاه مؤلفه یافت‌شده به‌عنوان حد بالای جدید برای پایگاه داده تعریف می‌شود و مؤلفه‌های بزرگ‌تر از آن حذف می‌شود.

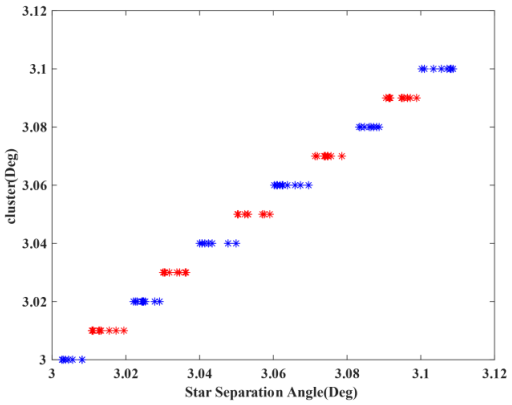
ب) اگر مؤلفه مورد جستجو از مؤلفه یافت

شده بزرگ‌تر باشد، آنگاه مؤلفه یافت‌شده به‌عنوان حد پایین جدید تعریف شده و سایر مؤلفه‌های کوچک‌تر از آن حذف می‌شود.

این روش هنگامی‌که داده‌ها توزیع یکنواخت داشته باشند، بهترین زمان پاسخ‌دهی را خواهد داشت. چنانچه در روش میان‌یابی داده‌ها توزیع یکنواختی نداشته باشند؛ ممکن است زمان دستیابی به پاسخ در روش میان‌یابی حتی از روش دودویی نیز طولانی‌تر باشد.

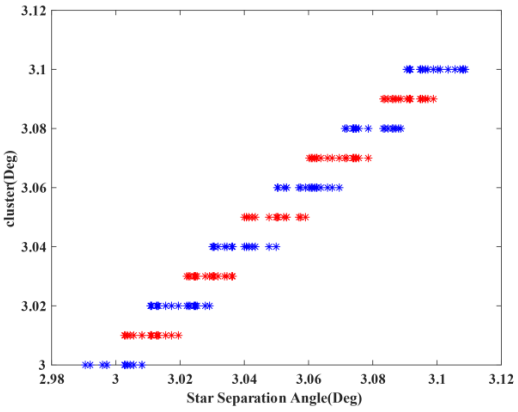
۵. خوشه‌بندی

به‌کارگیری روش‌های جستجوی سه‌بخشی، فیبوناچی و میان‌یابی در حسگر ستاره با ملاحظاتی همراه است. پایگاه داده از ویژگی‌های استخراج‌شده از مجموعه‌های ستارگان تشکیل می‌شود. با توجه به محدودیت دقت در دستگاه‌های اندازه‌گیری، احتمال وجود چندین مجموعه با ویژگی‌های یکسان وجود دارد. به‌طور مثال، در الگوریتم شناسایی مورداستفاده در این مقاله (الگوریتم هرمی) برای هر زوج ستاره در میدان دید، در پایگاه داده چندین زوج ستاره با زوایای یکسان می‌توان یافت که پاسخ صحیح یکی از آن‌هاست. در روش‌های جستجوی ذکرشده در این مقاله پس از دست‌یابی به یک پاسخ الگوریتم خاتمه می‌یابد، بنابراین امکان دست‌یابی به‌تمامی پاسخ‌های ممکن وجود ندارد. در این مقاله به‌منظور دست‌یابی به تمامی پاسخ‌های موجود روش خوشه‌بندی پیشنهاد شده است. در این مقاله دقت محاسبهٔ زوایای میان ستارگان میدان دید توسط حسگر ستاره ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به این موضوع برای خوشه‌بندی زوایای فهرست شده در پایگاه داده دو روش در نظرگرفته شد. در روش اول زوایای فهرست شده در پایگاه داده با گام‌های ۰/۰۱ خوشه‌بندی شدند. به‌طور مثال ستارگانی که زوایای میان آن‌ها در بازهٔ ۳ تا ۳/۰۱ درجه قرار داشتند، در یک خوشه قرار گرفتند (شکل ۸).



شکل ۸. خوشه‌بندی بر اساس بازه

در روش دوم پس از مشخص شدن هر بازه، با توجه به زوایای میان ستارگان قرار گرفته در هر بازه، نقطهٔ میانی در هر بازه محاسبه شد و خوشه‌بندی جدید بر اساس ستارگانی که زوایای میان آن‌ها در فاصلهٔ ۰/۰۱ از نقطهٔ میانی هر بازه قرار داشت، انجام گرفت (شکل ۹).



شکل ۹. خوشه‌بندی بر اساس نقطهٔ میانی بازه

با توجه به نتایج، در روش دوم میان بازه‌ها هم‌پوشانی وجود دارد و برخی زوج ستاره‌ها در بیش از یک بازه قرار می‌گیرند که به افزایش

تعداد ستاره‌ها در هر بازه و درنتیجه افزایش بار محاسباتی و زمان جستجو منجر می‌شود. بنابراین در شبیه‌سازی الگوریتم‌های جستجو، روش خوشه‌بندی اول مورداستفاده قرار گرفت. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب ترسیم این روش‌ها را برای زوج ستارگانی که زوایای میان آن‌ها بین ۳ تا ۳/۱ درجه قرار دارد را نشان می‌دهد.

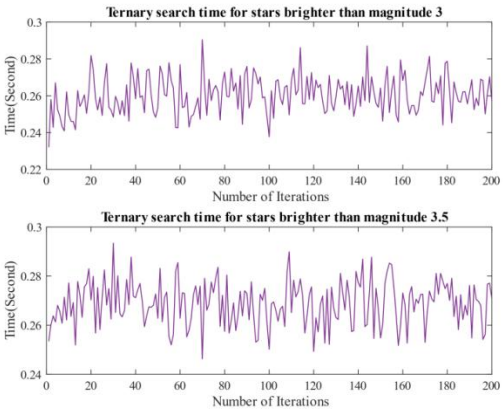
۶. شبیه‌سازی و نتایج

در الگوریتم هرمی، پایگاه داده متشکل از زوایای میان زوج ستاره‌هاست. در جدول ۱ تعداد ستاره‌ها و زوج ستاره‌ها با توجه به قدر ستارگان بیان شده است.

جدول ۱. تعداد ستارگان و زوج ستاره‌های قدرهای مختلف در کاتالوگ ستاره‌ای هیپارکوس

تعداد زوج ستاره‌ها (تعداد سطرهای پایگاه داده)	تعداد ستارگان	قدر (روشنایی)
۱۲۰	۱۶	$M_v \leq 1$
۲۷۶	۲۴	$M_v \leq 1.5$
۱۲۲۵	۵۰	$M_v \leq 2$
۴۳۷۱	۹۴	$M_v \leq 2.5$
۱۵۷۵۳	۱۷۸	$M_v \leq 3$
۴۱۶۱۶	۲۸۹	$M_v \leq 3.5$
۱۳۴۹۴۰	۵۲۰	$M_v \leq 4$
۴۲۴۵۸۱	۹۲۲	$M_v \leq 4.5$
۱۳۲۴۳۷۸	۱۶۲۸	$M_v \leq 5$
۴۰۶۵۵۲۶	۲۸۵۲	$M_v \leq 5.5$
۱۲۷۲۳۴۹۰	۵۰۴۵	$M_v \leq 6$

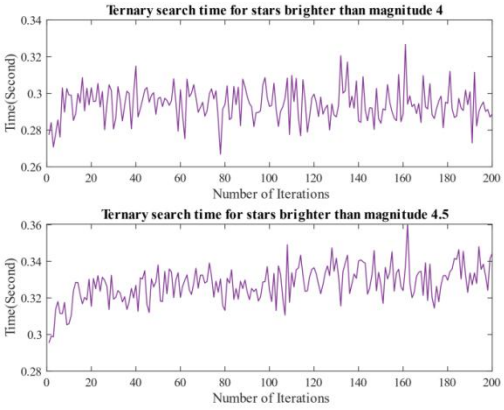
به‌منظور بررسی سرعت جستجو در روش‌های موردبررسی در حسگر ستاره نسبت به ابعاد مختلف پایگاه داده، الگوریتم هرمی برای یافتن ۵ ستاره در میدان دید برای ستاره‌های روشن‌تر از قدرهای ۳ تا ۶ با گام‌های ۰/۵ شبیه‌سازی و اجرا شد. با توجه به جدول ۱ کوچک‌ترین پایگاه‌دادهٔ موردبررسی شامل بیش از پانزده‌هزار و هفتصد زوج ستاره و بزرگ‌ترین پایگاه‌دادهٔ موردبررسی شامل بیش از دوازده میلیون و هفتصدهزار زوج ستاره است. در الگوریتم شناسایی شبیه‌سازی شده برای یافتن پنج ستاره در میدان دید، هر پایگاه داده باید ۱۰ بار مورد جستجو قرار گیرد؛ بنابراین زمان‌های گزارش‌شده برای هر یک از پایگاه‌های‌داده در هر یک از الگوریتم‌های جستجو زمان لازم برای ۱۰ بار جستجو در پایگاه داده و یافتن ستارگان مشترک است. به‌منظور بررسی نتایج، هریک از الگوریتم‌ها با استفاده از رایانه با مشخصات Intel (R) Core ™ i7-2670QM 2.20 GHz CPU and 6GB RAM با استفاده از نرم‌افزار متلب برای هر پایگاه داده ، ۲۰۰ بار اجرا شد. شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نتایج مربوط به روش سه‌بخشی را نشان می‌دهد.



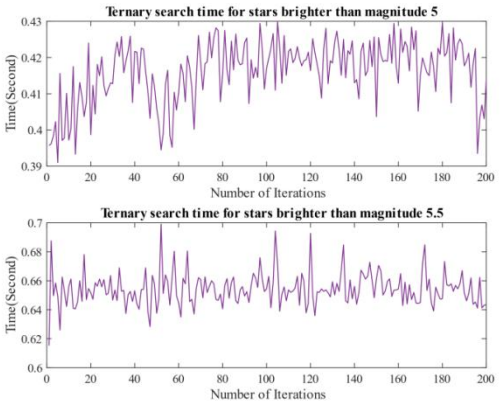
شکل ۱۰. نمودار زمان‌های شناسایی در روش سه‌بخشی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۳ و ۳/۵

جدول ۲ بازه‌های زمانی جستجو در پایگاه داده برای قدرهای ۳ تا ۶ در روش سه‌بخشی را نشان می‌دهد. در جدول ۳ نیز میانگین و انحراف معیار زمان‌های جستجو در پایگاه‌های داده برای

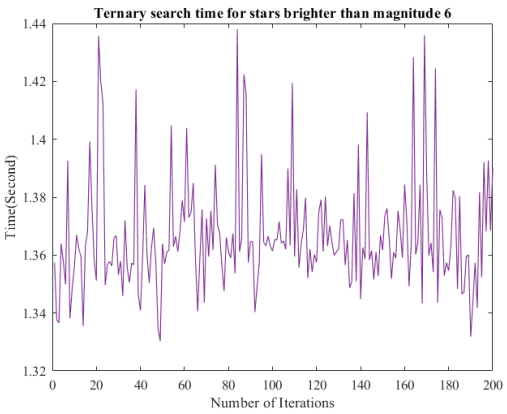
قدرهای ۳ تا ۶ در روش جستجوی سه‌بخشی نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار زمان‌های شناسایی در روش سه‌بخشی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ٤ و ٤/٥



شکل ۱۲. نمودار زمان‌های شناسایی در روش سه‌بخشی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۵ و ۵/۵



شکل ۱۳. نمودار زمان‌های شناسایی در روش سه‌بخشی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدر ۶

جدول ۲. بازهٔ زمانی جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی سه‌بخشی

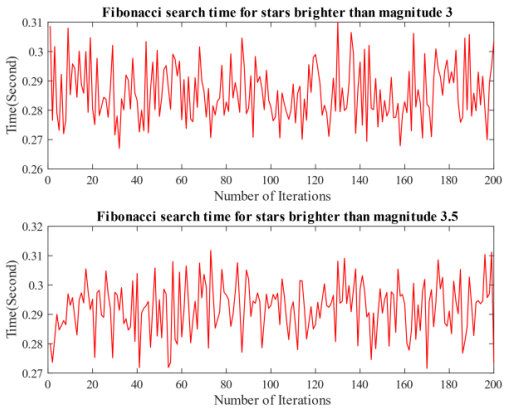
قدر	بازهٔ زمانی (ثانیه)
$M_v \leq 3$	$0.232 \leq time(s) \leq 0.290$
$M_v \leq 3.5$	$0.246 \leq time(s) \leq 0.293$
$M_v \leq 4$	$0.266 \leq time(s) \leq 0.236$
$M_v \leq 4.5$	$0.294 \leq time(s) \leq 0.360$
$M_v \leq 5$	$0.391 \leq time(s) \leq 0.429$
$M_v \leq 5.5$	$0.615 \leq time(s) \leq 0.699$
$M_v \leq 6$	$1.330 \leq time(s) \leq 1.438$

جدول ۳. میانگین و انحراف معیار زمان‌های جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی سه‌بخشی

قدر	میانگین	انحراف معیار
$M_v \leq 3$	0.2604	**0.0103**
$M_v \leq 3.5$	0.2689	**0.0091**
$M_v \leq 4$	0.2942	**0.0093**
$M_v \leq 4.5$	0.3277	**0.0097**
$M_v \leq 5$	0.4162	**0.0086**
$M_v \leq 5.5$	0.6455	**0.0115**
$M_v \leq 6$	1.3666	**0.0197**

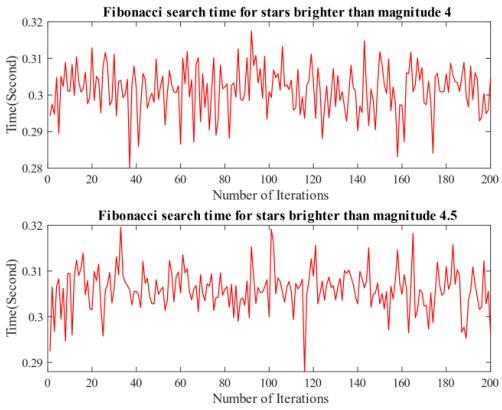
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در روش سه‌بخشی ابعاد پایگاه داده تأثیر زیادی بر زمان جستجو دارد. با توجه به جدول‌های ۲ و ۳، در پایگاه‌دادهٔ ساخته شده از ستاره‌های روشن‌تر از قدر ۳ شامل ۱۵۷۵۳ زوج ستاره، زمان جستجو بین ۰/۲۳ تا ۰/۲۹ ثانیه است و میانگین زمان جستجو ۰/۲۶ ثانیه می‌باشد، درحالی‌که زمان جستجو در پایگاه‌دادهٔ ساخته‌شده از ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ شامل ۱۲۷۲۳۴۹۰ زوج ستاره بین ۱/۳۳ تا ۱/۴۳ ثانیه قرار دارد و میانگین زمان

جستجو نیز ۱/۳۶ ثانیه است. با توجه به جدول ۲ زمان لازم برای شناسایی ستارگان با استفاده از الگوریتم هرمی درصورتی‌که ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ در نظر گرفته شوند، بین ۴/۹۵ تا ۵/۷۳ برابر زمانی است که در حسگر ستاره، شناسایی ستارگان میدان دید برای ستارگان روشن‌تر از قدر ۳ انجام گیرد. همچنین مقادیر انحراف معیار در جدول ۳ برای قدرهای مختلف نشان می‌دهد که انحراف معیار نتایج برای قدرهای ۳ تا ۵/۵ در حدود ۰/۰۱ و قدر ۶ در حدود ۰/۰۲ است که این موضوع نشان می‌دهد که زمان‌های به‌دست‌آمده پراکندگی اندکی دارند.

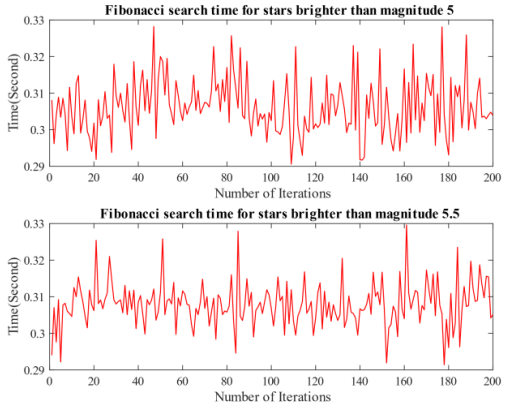


شکل ۱۴. نمودار زمان‌های شناسایی در روش فیبوناچی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۳ و ۳/۵

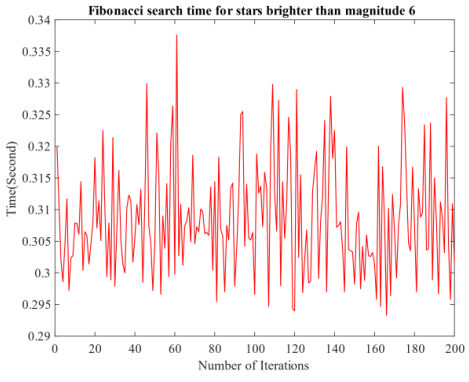
دومین روش بررسی‌شده، روش جستجوی فیبوناچی است که نتایج آن در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ نشان داده شده است. جدول ۴، بازه‌های زمانی شناسایی برای قدرهای ۳ تا ۶ در روش جستجوی فیبوناچی را نشان می‌دهد. در جدول ۵ نیز مقادیر میانگین و انحراف معیار زمان‌های جستجو در پایگاه‌های‌داده برای قدرهای مختلف در روش جستجوی فیبوناچی نشان داده شده است.



شکل ۱۵. نمودار زمان‌های شناسایی در روش فیبوناچی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ٤ و ٤/٥



شکل ۱۶. نمودار زمان‌های شناسایی در روش فیبوناچی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۵ و ۵/۵



شکل ۱۷. نمودار زمان‌های شناسایی در روش فیبوناچی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدر ۶

جدول٤. بازهٔ زمانی جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی فیبوناچی

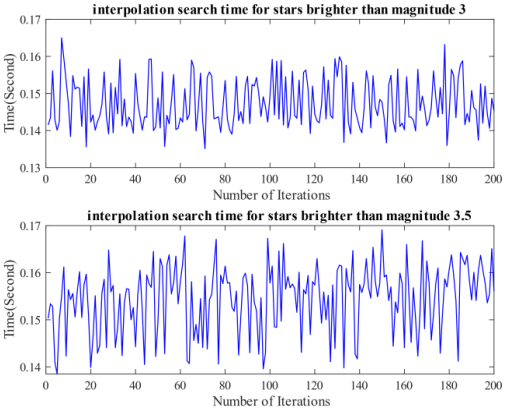
قدر	بازهٔ زمانی (ثانیه)
$M_v \leq 3$	$0.267 \leq \text{time(s)} \leq 0.310$
$M_v \leq 3.5$	$0.271 \leq \text{time(s)} \leq 0.311$
$M_v \leq 4$	$0.280 \leq \text{time(s)} \leq 0.317$
$M_v \leq 4.5$	$0.288 \leq \text{time(s)} \leq 0.319$
$M_v \leq 5$	$0.290 \leq \text{time(s)} \leq 0.328$
$M_v \leq 5.5$	$0.291 \leq \text{time(s)} \leq 0.329$
$M_v \leq 6$	$0.292 \leq \text{time(s)} \leq 0.337$

جدول ۵. میانگین و انحراف معیار زمان‌های جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی فیبوناچی

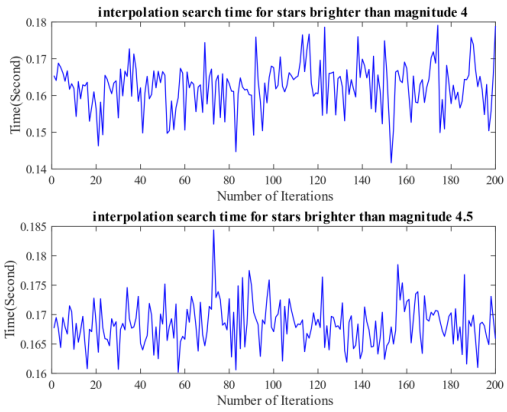
قدر	میانگین	انحراف معیار
$M_v \leq 3$	0.2859	0.0097
$M_v \leq 3.5$	0.2921	0.0088
$M_v \leq 4$	0.3014	0.0064
$M_v \leq 4.5$	0.3059	0.0047
$M_v \leq 5$	0.3062	0.0077
$M_v \leq 5.5$	0.3079	0.0060
$M_v \leq 6$	0.3085	0.0087

در روش جستجوی فیبوناچی، برای الگوریتم هرمی در صورتی که ستارگان روشن‌تر از قدر ۳ در نظرگرفته شود، زمان شناسایی در بازهٔ ۰/۲۶۷ تا ۰/۳۱۰ ثانیه قرار دارد و میانگین زمان جستجو نیز ۰/۲۸ ثانیه است. همچنین بازهٔ زمانی شناسایی در صورتی که شناسایی ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ مورد نظر باشد، بین ۰/۲۹۲ تا ۰/۳۳۷ قرار دارد و میانگین زمان جستجو نیز ۰/۳۰۸ ثانیه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد، در پایگاه‌های دادهٔ بزرگ روش فیبوناچی نسبت به روش سه بخشی عملکرد بهتری دارد. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بازهٔ زمان شناسایی در روش جستجوی فیبوناچی نسبت به روش جستجوی سه‌بخشی در تمامی پایگاه‌های دادهٔ مورد بررسی کمتر است.

با توجه به جدول ۴، زمان شناسایی در قدر ۶ بین ۱/۰۸ تا ۱/۰۹ برابر قدر ۳ است. این نسبت نشان‌دهندهٔ وابستگی ناچیز زمان شناسایی به ابعاد پایگاه داده است. جدول ۵ نیز نشان می‌دهد که مقادیر انحراف معیار برای تمامی روش‌ها از ۰/۰۱ کمتر است.

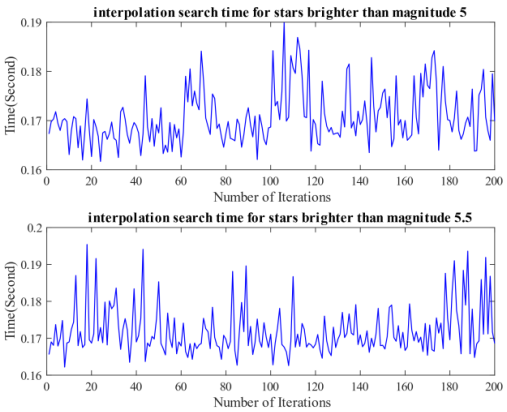


شکل ۱۸. نمودار زمان‌های شناسایی در روش میان‌یابی برای پایگاه‌های‌داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۳ و ۳/۵

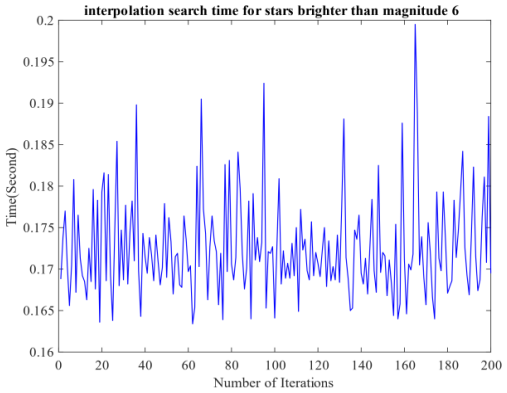


شکل ۱۹. نمودار زمان‌های شناسایی در روش میان‌یابی برای پایگاه‌های داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ٤ و ٤/٥

سومین روش بررسی‌شده روش جستجوی میان‌یابی است که نتایج آن در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ نشان داده‌شده است. بازه‌های زمانی جستجو در قدرهای مختلف در روش میان‌یابی در جدول ۶ آورده شده است. جدول ۷ نیز مقادیر میانگین و انحراف معیار برای زمان‌های به‌دست‌آمده در قدرهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰. نمودار زمان‌های شناسایی در روش میان‌یابی برای پایگاه‌های داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدرهای ۵ و ۵/۵



شکل ۲۱. نمودار زمان‌های شناسایی در روش میان‌یابی برای پایگاه‌های داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدر ۶

در روش جستجوی میان‌یابی بازهٔ زمانی شناسایی درصورتی‌که شناسایی ستارگان روشن‌تر از قدر ۳ موردنظر باشد، بین ۰/۱۳۵ تا ۰/۱۶۵ ثانیه و میانگین زمان جستجو ۰/۱۴ ثانیه می‌باشد. بازهٔ زمانی شناسایی درصورتی‌که ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ موردنظر باشد، بین ۰/۱۶۳ تا ۰/۱۹۹ ثانیه است و میانگین زمان جستجو نیز ۰/۱۷ ثانیه است. بنابراین زمان لازم برای شناسایی ستارگان قدر ۶ نسبت به ستارگان قدر ۳، در حدود ۱/۲ برابر است. همچنین انحراف معیار زمان‌های به‌دست‌آمده در روش جستجوی میان‌یابی کمتر ۰/۰۱ می‌باشد.

جدول۶. بازهٔ زمانی جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی میان‌یابی

قدر	بازهٔ زمانی (ثانیه)
$M_v \leq 3$	$0.135 \leq time(s) \leq 0.165$
$M_v \leq 3.5$	$0.138 \leq time(s) \leq 0.169$
$M_v \leq 4$	$0.141 \leq time(s) \leq 0.179$
$M_v \leq 4.5$	$0.160 \leq time(s) \leq 0.184$
$M_v \leq 5$	$0.162 \leq time(s) \leq 0.189$
$M_v \leq 5.5$	$0.162 \leq time(s) \leq 0.195$
$M_v \leq 6$	$0.163 \leq time(s) \leq 0.199$

جدول ۷. میانگین و انحراف معیار زمان‌های جستجو در پایگاه‌های داده برای قدرهای مختلف با استفاده از روش جستجوی میان‌یابی

قدر	میانگین	انحراف معیار
$M_v \leq 3$	0.1473	0.0067
$M_v \leq 3.5$	0.1545	0.0072
$M_v \leq 4$	0.1624	0.0065
$M_v \leq 4.5$	0.1683	0.0037
$M_v \leq 5$	0.1707	0.0055
$M_v \leq 5.5$	0.1719	0.0065
$M_v \leq 6$	0.1725	0.0060

همان‌طور که در پیش‌تر نیز مورداشاره قرار گرفت، در حالت کلی زمان دستیابی به پاسخ در

روش میان‌یابی به توزیع یکنواخت داده‌ها بستگی دارد و اگر توزیع داده‌ها یکنواخت نباشد، ممکن است زمان دستیابی به پاسخ در روش میان‌یابی حتی از روش دودویی نیز طولانی‌تر باشد. توزیع یکنواخت داده‌ها در این مقاله و در موضوع حسگر ستاره به‌طور خاص دو علت دارد: ۱) هرچه از ستاره‌های بیشتری در ساخت پایگاه داده استفاده شود، تعداد زوایای بیشتر و با فواصل کمتر وجود خواهد داشت. ۲) در این مقاله داده‌ها با فواصل یکسان و با توجه به دقت حسگر ستاره خوشه‌بندی شده‌اند.

۷. نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد، در میان سه روش جستجوی بررسی‌شده، کم‌ترین زمان شناسایی به روش جستجوی میان‌یابی تعلق دارد که ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ را در بازهٔ زمانی بین ۰/۱۶۳ تا ۰/۱۹۹ ثانیه شناسایی می‌کند. دومین روش به لحاظ سرعت شناسایی روش جستجوی فیبوناچی است که در این روش ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ بین ۰/۲۶۷ تا ۰/۳۱۰ ثانیه شناسایی می‌شوند. بیشترین زمان شناسایی نیز به روش سه‌بخشی تعلق دارد که ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ را در زمانی بین ۱/۳۳ تا ۱/۴۳۸ ثانیه شناسایی می‌کند. همچنین بررسی نسبت بازه‌های زمانی جستجو برای بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین پایگاه‌داده‌های دادهٔ موردبررسی نشان داد که زمان جستجو در روش سه‌بخشی بیش از سایر روش‌ها از ابعاد پایگاه داده تأثیر می‌پذیرد، به‌طوری‌که نسبت زمان جستجو در پایگاه داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدر ۶ تقریباً ۵ برابر زمان جستجو در پایگاه داده شامل ستارگان روشن‌تر از قدر ۳ است. این نسبت برای روش جستجوی فیبوناچی در حدود ۱/۰۹ و برای روش جستجوی میان‌یابی ۱/۲ است. با توجه به مجموع نتایج به‌دست‌آمده، روش جستجوی میان‌یابی برای جستجو در پایگاه‌دادهٔ حسگر ستاره عملکرد بهتری دارد.

۸. مراجع

[1] Bolandi, H., fanisaberi, F., EslamiMehrjerdi, A. Design of an Attitude Controller for Large-Angle Maneuvers of a Satellite considering of Reaction Wheels Constraints with High Fidelity Model. *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, 2012; 1(1): 20-30.(in Persian فارسی)

[2] Toloei AR, Arani MS, Abaszadeh M. A new composite algorithm for identifying the stars in the star tracker. International Journal of Computer Applications. 2014 Jan 1;102(2).

[3] Spratling BB, Mortari D. A survey on star identification algorithms. Algorithms. 2009 Mar;2(1):93-107.

[4] Roshanian J., Yazdani SH, Ebrahimi M. Consideration on Actualizing the Non-Dimensional Star Pattern Recognition Algorithm for a Typical Laboratory Star Tracker. *Journal of Space Science and Technology*, 2012; 5(2). (in Persian فارسی)

[5]Nikkhah, A., somayehee, F., Roshanian, J. Simulation of Night Sky Images with an Ideal Pinhole Model for a Star Sensor. *Journal of Space Science and Technology*, 2018; 11(3): 21-32.(in Persian فارسی)

[6] Markley FL, Mortari D. Quaternion attitude estimation using vector observations. The Journal of the Astronautical Sciences. 2000 Jun;48(2):359-80.

[7]Mortari D, Neta B. K-vector range searching techniques. Naval Postgraduate School, Monterey,

California. 2014.

[8] Toloei A, Zahednamazi M, Ghasemi R,implementation of the database searching methods to survey the speed of attitude determination in the star sensor, 19th international conference of Iranian aerospace society,2021.(in Persian فارسی)

[9] Roshanian J., Hasani S.M, Yazdani SH, Ebrahimi M. Star Catalog Criteria Selection and Mission Catalog Update for a Typical Star Tracker. *Journal of Space Science and Technology*, 2013; 5(4).(in Persian فارسی)

[10] Sedaghat H., Toloei A., Ghanbarpour H., Automatic Star Identification Using Triangle Base and Increase Search Speed.*Journal of Space Science and Technology*, 2012; 4(4). (in Persian فارسی)

[11] Toloei A, Zahednamazi M, Ghasemi R, Mohammadi F. A comparative analysis of star identification algorithms. Astrophysics and Space Science. 2020 Apr;365(4):1-9.

[12]Rijlaarsdam D, Yous H, Byrne J, Oddenino D, Furano G, Moloney D. A survey of lost-in-space star identification algorithms since 2009. Sensors. 2020 Jan;20(9):2579.

[13] Mortari D, Samaan MA, Bruccoleri C, Junkins JL. The pyramid star identification technique. Navigation. 2004 Sep;51(3):171-83.

[14]Zahednamazi M, Toloei A, Ghasemi R. Different types of star identification algorithms for satellite attitude determination using star sensor. Aerospace Systems. 2021 May 18:1-7.

[15]Bajwa MS, Agarwal AP, Manchanda S. Ternary search algorithm: Improvement of binary search. In2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom) 2015 Mar 11 (pp. 1723-1725). IEEE.

[16]Ferguson DE. Fibonaccian searching. Communications of the ACM. 1960 Dec 1;3(12):648.

[17] Nishihara S, Nishino H. Binary search revisited: Another advantage of Fibonacci search. IEEE transactions on computers. 1987 Sep;100(9):1132-5.

[18]Horla D, Sadalla T. Optimal tuning of fractional-order controllers based on Fibonacci-search method. ISA transactions. 2020 Sep 1;104:287-98.

[19]Etminaniesfahani A, Ghanbarzadeh A, Marashi Z. Fibonacci indicator algorithm: A novel tool for complex optimization problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018 Sep 1;74:1-9.

[20] Knuth DE. The art of computer programming. Vol. 3: Sorting and searching. Reading. 1973.

[21]Peterson, W. Wesley. "Addressing for random-access storage." *IBM journal of Research and Development* 1, no. 2 (1957): 130-146.

[22]Gonnet GH, Rogers LD. The interpolation-sequential search algorithm. Information Processing Letters. 1977 Aug 1;6(4):136-9.

[23]Kudryavtseva I, Efremov A, Panteleev A. Optimization of helicopter motion control based on the aggregated interpolation model. InAIP Conference Proceedings 2019 Nov 22 (Vol. 2181, No. 1, p. 020008). AIP Publishing LLC.

[24]Kaporis A, Makris C, Sioutas S, Tsakalidis A, Tsichlas K, Zaroliagis C. Dynamic interpolation search revisited. International Colloquium on Automata, Languages, and Programming 2006 Jul 10 (pp. 382-394). Springer, Berlin, Heidelberg.

[25]Rahim R, Nurarif S, Ramadhan M, Aisyah S, Purba W. Comparison Searching Process of Linear, Binary and Interpolation Algorithm. InJournal of Physics: Conference Series 2017 Dec 1 (Vol. 930, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.