



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.: 64-75
2023

DOI:
10.22034/jssta.2023.377577.1106

Article Info

Received: 2022-12-20
Accepted: 2023-05-31

Keywords

Star Sensor, Star
identification, Lost-in-Space
Star Identification, Hausdorff
Distance

How to Cite this article

Mona Zahednamazi, Alireza Toloei, Reza Ghasemi, "Lost-in-space star identification algorithm based on Hausdorff distance with two approaches: Pivot star and celestial sphere segmentation", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.:64-75, 2023.

Lost-in-space star identification algorithm based on Hausdorff distance with two approaches: Pivot star and celestial sphere segmentation

Mona Zahednamazi^{1*}, Alireza Toloei², Reza Ghasemi³

^{1*} Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, m_zahednamazi@sbu.ac.ir

² Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, toloei@sbu.ac.ir

³ Faculty of Electrical Engineering Department, University of Qom, Qom, Iran
r_ghasemi@qom.ac.ir

Abstract

One of the best attitude sensors for space applications is the star sensor. This sensor determines the attitude using stars in the field of view. One of the main advantages of this sensor is attitude initialization using lost-in-space star identification algorithms. This paper presents a new lost-in-space star identification algorithm based on Hausdorff distance. Using Hausdorff distance, two different identification algorithms have been proposed, and their results have been compared. The first approach is designed based on pivot star, and the second approach uses the segmentation of the celestial sphere. The performance of these two approaches has been investigated using the simulation of 200 random directions of the star sensor in different magnitudes. The results show the approach of the pivot star has a better performance, and its identification rate is 93.5% at the magnitude of 6. Also, the identification time of the Hausdorff algorithm has been compared with the pyramid algorithm and some geometric algorithms. The results show that the Hausdorff identification algorithm has the shortest identification time which makes it suitable for real-time applications



الگوریتم شناسایی ستاره گم شده در فضا مبتنی بر فاصله هاسدورف با دو رویکرد ستاره محور و بخش بندی کره سماوی

منا زاهدنمازی^{۱*}، علیرضا طلوعی^۲، رضا قاسمی^۳

*^۱- دکترا، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) m_zahednamazi@sbu.ac.ir

^۲- دانشیار، دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران toloeir@sbu.ac.ir

^۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران r.ghasemi@qom.ac.ir

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۶۴-۷۵
بهار و تابستان ۱۴۰۲

DOI:

10.22034/jsssta.2023.377577.1106

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

واژه‌های کلیدی

حسگر ستاره، الگوریتم شناسایی،
الگوریتم شناسایی گم شده در فضا،
فاصله هاسدورف

نحوه استناد به مقاله

منا زاهدنمازی، علیرضا طلوعی، رضا قاسمی. " الگوریتم شناسایی ستاره گم شده در فضا مبتنی بر فاصله هاسدورف با دو رویکرد ستاره محور و بخش بندی کره سماوی "، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد سوم، شماره اول، صفحات ۶۴-۷۵، ۱۴۰۲.

چکیده

یکی از بهترین حسگرهای وضعیت برای کاربردهای فضایی، حسگر ستاره است که تعیین وضعیت را با استفاده از ستارگان میدان دید انجام می‌دهد. از مزایای اصلی این حسگر می‌توان به تعیین وضعیت اولیه توسط خود حسگر اشاره نمود. این کار توسط الگوریتم‌های شناسایی ستاره گم شده در فضا انجام می‌شود. این مقاله به ارائه یک الگوریتم گم شده در فضای جدید مبتنی بر فاصله هاسدورف^۱ می‌پردازد. با استفاده از فاصله هاسدورف، دو الگوریتم شناسایی مختلف پیشنهاد شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. رویکرد اول بر اساس ستاره محور طراحی شده و رویکرد دوم، از بخش بندی کره سماوی بهره می‌برد. عملکرد شناسایی این دو رویکرد با استفاده از شبیه سازی ۲۰۰ جهت تصادفی حسگر ستاره در قدرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، رویکرد استفاده از ستاره محور، عملکرد بهتری دارد و نرخ شناسایی آن در قدر ۶، ۹۳/۵ درصد است. همچنین، زمان شناسایی در این الگوریتم با الگوریتم هرمی و تعدادی از الگوریتم‌های هندسی دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. بر طبق نتایج، کوتاه‌ترین زمان شناسایی، به الگوریتم هاسدورف تعلق دارد که آن را برای استفاده‌های به هنگام مناسب می‌سازد

^۱ Hausdorff

۱- مقدمه

یکی از نیازمندی‌های اساسی برای هر فضاپیما و ماهواره، تعیین وضعیت است [۱]. حسگر ستاره یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین حسگرهای وضعیت برای کاربردهای فضایی است که وضعیت را با استفاده از تصاویر ستارگان میدان دید حسگر تعیین می‌کند. این حسگر دارای دقت بالایی از مرتبهٔ ثانیهٔ قوسی است که می‌تواند وضعیت اولیه را برای خود مشخص کند و در نزدیکی زمین و در فضای عمیق قابل استفاده است [۲]. پیش نیاز یک حسگر ستاره، یک کاتالوگ ستاره‌ای است که از آن برای ساخت پایگاه داده استفاده می‌شود. یک کاتالوگ ستاره‌ای، فهرستی از ستارگان آسمان به همراه ویژگی‌های هر یک از ستارگان است. این فهرست می‌تواند ده‌ها ویژگی برای هر ستاره را شامل شود؛ اما معمولاً برای حسگر ستاره، قدر ستارگان و زوایای بُعد و میل ستارگان (موقعیت ستارگان در کرهٔ سماوی) کافی است. قدر ستارگان، معیاری برای تعیین میزان روشنایی ستارگان است که هرچه کوچک‌تر باشد، به معنای آن است که ستاره روشن‌تر است. از قدر به عنوان یک ویژگی کمکی برای شناسایی ستاره استفاده می‌شود. زاویهٔ بُعد، فاصلهٔ زاویه‌ای یک جسم سماوی است که از نقطهٔ اعتدال بهاری به سمت شرق اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر، با طول جغرافیایی مشابه است و معمولاً در واحد زمان اندازه‌گیری می‌شود (ساعت، دقیقه، ثانیه). زاویهٔ میل، مشابه با عرض جغرافیایی است و برحسب درجه، دقیقهٔ قوسی و ثانیهٔ قوسی بیان می‌شود. بازهٔ تغییرات زاویهٔ میل از -90° در قطب جنوب سماوی تا $+90^\circ$ در قطب شمال سماوی است. اندازهٔ زاویهٔ میل در استوای سماوی 0° است.

با استفاده از پیاده‌سازی الگوریتم شناسایی ستاره بر ستارگان کاتالوگ، پایگاه داده ساخته می‌شود. این پایگاه داده، پیش از آغاز مأموریت در حافظهٔ حسگر بارگذاری می‌شود. در زمان انجام مأموریت، همان الگوریتم شناسایی بر ستارگان میدان دید پیاده‌سازی شده و ویژگی‌های ستارگان میدان دید با پایگاه داده مقایسه می‌شود. در صورت یافتن تطابق یکتا، شناسایی ستارگان میدان دید موفقیت‌آمیز است. پس از شناسایی ستارگان، با توجه به موقعیت ستارگان شناسایی شده در کرهٔ سماوی و مختصات نقاط ستاره در تصویر، با استفاده از یکی از الگوریتم‌های موجود برای تعیین وضعیت، می‌توان وضعیت را تعیین نمود.

یک الگوریتم شناسایی، در واقع الگویی است که بر روی مجموعه‌ای از ستارگان پیاده‌سازی شده و ویژگی‌های آن استخراج می‌شود. این الگو می‌تواند زوایای داخلی یک مثلث متشکل از سه ستاره، و ویژگی‌های آماری ستارگان همسایگی یک ستارهٔ اصلی و ... باشد. اما تمامی ویژگی‌های مورد استفاده دارای یک خاصیت مشترک هستند: این ویژگی‌ها نسبت به چرخش دستگاه مختصات نامتغیر هستند. از ابتدای معرفی حسگر ستاره تاکنون، الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ای بسیاری برای حسگرهای ستاره‌ای پیشنهاد شده‌اند [۳، ۴].

حسگر ستاره قادر است وضعیت را در دو حالت تعیین کند: حالت استقرار وضعیت اولیه و حالت ردیابی وضعیت [۵]. حالت استقرار وضعیت اولیه برای مقداردهی اولیه به وضعیت است. این حالت یا در شروع مأموریت یا برای زمانی است که حسگر به دلایلی دانش از وضعیت پیشین خود را از دست داده باشد. الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ای که در این حالت مورد استفاده قرار می‌گیرند، الگوریتم‌های گم‌شده در فضا نامیده می‌شوند زیرا حسگر باید برای شناسایی ستارگان میدان دید، تمامی ستارگان آسمان را مورد جستجو قرار دهد. حالت دوم حسگر ستاره، حالت ردیابی وضعیت است. در این حالت، حسگر با توجه به دانش از وضعیت پیشین خود، فقط نواحی از آسمان که احتمال می‌رود ستارگان میدان دید در آنجا وجود داشته باشند را مورد جستجو قرار می‌دهد. الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ای که در این حالت مورد استفاده قرار می‌گیرند، الگوریتم‌های بازگشتی نامیده می‌شوند. در این نوع الگوریتم‌ها وجود اطلاعات صحیح از وضعیت پیشین حائز اهمیت است و محدودهٔ جستجو با توجه به وضعیت پیشین و میزان سرعت فضاپیما یا ماهواره پیش‌بینی می‌شود. پیش‌نیاز حالت ردیابی وضعیت، حالت استقرار وضعیت اولیه است زیرا تا زمانی که وضعیت اولیه یا وضعیت پیشین مشخص نباشد، نمی‌توان وارد حالت ردیابی وضعیت شد. فرایند تعیین وضعیت در این دو حالت در شکل (۱) نشان داده شده است.

الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ای گم‌شده در فضا و بازگشتی، با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند. معمولاً الگوریتم‌های گم‌شده در فضا پیچیده‌تر هستند زیرا باید بدون هیچ‌گونه اطلاعاتی و از میان تمامی ستارگان آسمان، ستارگان میدان دید را شناسایی کنند. علاوه بر این، از آن‌جا که پیش‌نیاز حالت ردیابی وضعیت، حالت

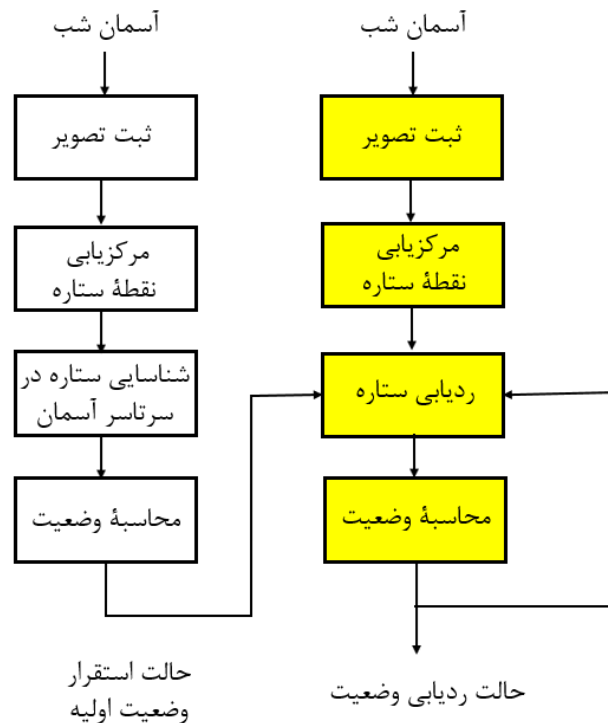
این الگوریتم‌ها را می‌توان الگوریتم‌های خاص نامید. در این مقاله، دو الگوریتم گم شده در فضا مبتنی بر فاصله هاسدورف ارائه شده است. از آنجاکه ویژگی فاصله هاسدورف در دو دسته بالا جای نمی‌گیرد، می‌توان این ویژگی را به عنوان یک ویژگی شناسایی خاص در نظر گرفت [۱]. در سال ۲۰۱۳، یک الگوریتم بازگشتی شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف توسط وی^۱ و همکاران ارائه شد [۱۳]. در مقاله وی، فاصله هاسدورف برای ستارگان میدان دید محاسبه می‌شود و با فاصله هاسدورف ستارگان بخشی از آسمان که پیش‌بینی می‌شود ستارگان میدان دید در آنجا حضور داشته باشند مقایسه می‌شود. بنابراین در الگوریتم فاصله هاسدورف وی، باید موقعیت قبلی فضاپیما یا ماهواره مشخص باشد. الگوریتم وی را می‌توان در حالت ردیابی وضعیت در حسگر ستاره مورد استفاده قرار داد.

این مقاله به ارائه یک الگوریتم نوآورانه شناسایی ستاره گم شده در فضا، مبتنی بر فاصله هاسدورف می‌پردازد. در این مقاله، دو رویکرد مختلف برای شناسایی گم شده در فضا مبتنی بر فاصله هاسدورف طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این رویکردها نیازی به دانش از وضعیت پیشین وجود ندارد و پایگاه‌های داده‌ای متشکل از ویژگی‌های ستارگان سراسر آسمان (تا یک قدر مشخص) مورد جستجو قرار می‌گیرد. این رویکردها را می‌توان در حالت استقرار وضعیت اولیه در حسگر ستاره مورد استفاده قرار داد. رویکرد اول بر اساس استفاده از ستاره محور است. در رویکرد دوم نیز از بخش بندی کره سماوی بر اساس زوایای بعد و میل استفاده می‌شود. در ادامه، بخش ۲ به توصیف فاصله هاسدورف می‌پردازد. الگوریتم‌های پیشنهادی شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف در بخش ۳ بیان شده‌اند. بخش ۴، به شبیه‌سازی‌ها و نتایج اختصاص دارد. نتیجه‌گیری و مراجع نیز به ترتیب در بخش‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

۲- فاصله هاسدورف

در حالت کلی منظور از فاصله میان دو دسته از نقاط، کوتاه‌ترین فاصله میان آن‌هاست که می‌توان آن را تابع حداقل نامید. اگر A

استقرار وضعیت اولیه است؛ الگوریتم‌های گم شده در فضا حائز اهمیت است زیرا بدون آن‌ها عملاً حسگر ستاره، غیرقابل استفاده است.



شکل ۱- فرایند تعیین وضعیت در حسگر ستاره در حالت‌های استقرار وضعیت اولیه و ردیابی وضعیت [۲].

از دیدگاه دیگر، الگوریتم‌های شناسایی ستاره را می‌توان با توجه به نوع الگوی مورد استفاده برای شناسایی تقسیم بندی نمود. از این دیدگاه، الگوریتم‌های شناسایی ستاره در سه دسته کلی جای می‌گیرند [۶،۲]. الگوریتم‌های هندسی که از ویژگی‌های هندسی مجموعه‌ای از ستارگان میدان دید در کنار یکدیگر استفاده می‌کنند مانند زوایای یک هرم متشکل از ۴ ستاره یا طول اضلاع یک مثلث متشکل از ۳ ستاره [۷-۹]. الگوریتم‌های تشخیص الگو که بر اساس ویژگی‌های الگوهای متشکل از مجموعه‌ای از ستارگان میدان دید هستند. مشهورترین الگوریتم این گروه، الگوریتم شبکه است [۱۰]. گروه سوم متعلق به الگوریتم‌هایی است که در هیچ یک از این دو دسته قرار نمی‌گیرند که از میان آن‌ها می‌توان به الگوریتم‌های شبکه عصبی، منطق فازی و ... اشاره نمود [۱۱،۱۲].

¹ Wei

۳- الگوریتم‌های شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف

هر الگوریتم شناسایی در حسگر ستاره دو بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک بار پیش از آغاز مأموریت و برای ساخت پایگاه داده و یک بار در زمان مأموریت و برای شناسایی ستارگان میدان دید. یکی از پارامترهای متداول در الگوریتم‌های شناسایی، بردار جهتی ستارگان میدان دید است که با استفاده از زوایای بعد و میل ستاره و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۱]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\delta \\ \sin\alpha \cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، α نشان دهنده زاویه بعد و δ نشان دهنده زاویه میل است. در الگوریتم شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف از بردار جهتی فقط به منظور مشخص نمودن ستارگان محدوده میدان دید استفاده می‌شود. فاصله هاسدورف یک فاصله دو بعدی بر مبنای (x, y) در صفحه است بنابراین، در این الگوریتم در زمان ساخت پایگاه داده باید مشخصات تصویر و ابعاد میدان دید را نیز لحاظ نمود. نگاشت ستارگان در صفحه تصویر حسگر با استفاده از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید:

$$X_i = \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan(FOV_x/2)} \times S_{x_i} \quad (5)$$

$$Y_i = \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan(FOV_y/2)} \times S_{y_i} \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، FOV_x و FOV_y به ترتیب نشان دهنده ابعاد میدان دید در راستاهای X و Y هستند. N_x و N_y نیز ابعاد تصویر در راستاهای X و Y را نشان می‌دهد. S_{x_i} و S_{y_i} نیز با استفاده از روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند [۱۳].

و B دو مجموعه از نقاط باشند، فاصله میان آن‌ها با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$D(A, B) = \min_{a \in A} \left\{ \min_{b \in B} \{d(a, b)\} \right\} \quad (1)$$

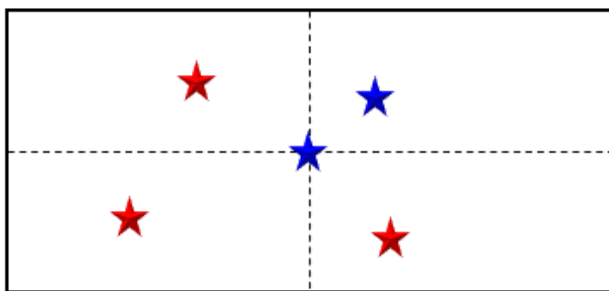
این تعریف را می‌توان به نحوی ناقص در نظر گرفت زیرا کوتاه‌ترین فاصله میان دو دسته از نقاط در حالت کلی نمی‌تواند نمایان‌گر میزان فاصله میان آن‌ها باشد و ممکن است تعدادی از نقاط در هر یک از مجموعه‌ها از یکدیگر فاصله زیادی داشته باشند. به منظور غلبه بر نواقص موجود در موضوع فاصله دو دسته از نقاط، مفهوم فاصله هاسدورف معرفی شد. این فاصله، به‌عنوان حداکثر فاصله یک مجموعه از نزدیک‌ترین نقطه از مجموعه دیگر تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، فاصله هاسدورف مجموعه A تا مجموعه B یک تابع حداکثر است. فاصله هاسدورف مجموعه A تا مجموعه B طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \left\{ \min_{b \in B} \{d(a, b)\} \right\} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، a و b به ترتیب نقاطی متعلق به مجموعه‌های A و B هستند و $d(a, b)$ نیز به فاصله اقلیدسی میان دو نقطه اشاره دارد. این فاصله، جهت‌دار یا به عبارت دیگر نامتقارن است. بدین معنا که در بیشتر موارد $h(A, B)$ با $h(B, A)$ برابر نیست؛ بنابراین، در حالت کلی‌تر می‌توان فاصله هاسدورف را به صورت رابطه (۳) تعریف نمود:

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (3)$$

این فاصله، میان مجموعه‌های نقاط در صفحه تعریف می‌شود و روشی سریع محسوب می‌شود.



شکل ۲- الگوریتم شناسایی فاصله هاسدورف با استفاده از ستاره محور

روندنمای الگوریتم شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف با استفاده از رویکرد ستاره محور در شکل (۳) نشان داده شده است.

۲-۳- شناسایی با استفاده از بخش بندی کره سماوی

در این رویکرد، برای ساخت پایگاه داده از بخش بندی کره سماوی با استفاده از زوایای بعد و میل استفاده می شود. به منظور پوشش کامل آسمان فواصل بخش بندی در هر دو راستای بعد و میل، 1° در نظر گرفته شده است. شکل (۴)، بخش بندی کره سماوی را نشان می دهد. با استفاده از بخش بندی، بر روی کره سماوی گره های فرضی ایجاد می شود. این گره ها به عنوان نقاط محور برای ساخت پایگاه داده مورد استفاده قرار می گیرند. با استفاده از بردار جهتی این گره ها و ابعاد میدان دید، ستارگان همسایه در محدوده میدان دید مشخص می شوند. از میان این ستارگان، ۴ ستاره روشن تر انتخاب می شوند. مختصات X و Y با توجه به روابط (۵) و (۶) برای گره و نیز ۴ ستاره روشن تر محاسبه می شود. مختصات روشن ترین ستاره و گره، مجموعه اول را برای محاسبه فاصله هاسدورف تشکیل می دهند. مجموعه دوم نیز با استفاده از سه ستاره دیگر تشکیل می شود و فاصله هاسدورف دو مجموعه محاسبه می شود. در هنگام مأموریت، مختصات گره در واقع مختصات مرکز میدان دید است.

$$S_{x_i} = \frac{\cos(\delta_i) \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin(\delta_i) \sin(\delta_0) - \cos(\delta_i) \cos(\delta_0) \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \quad (7)$$

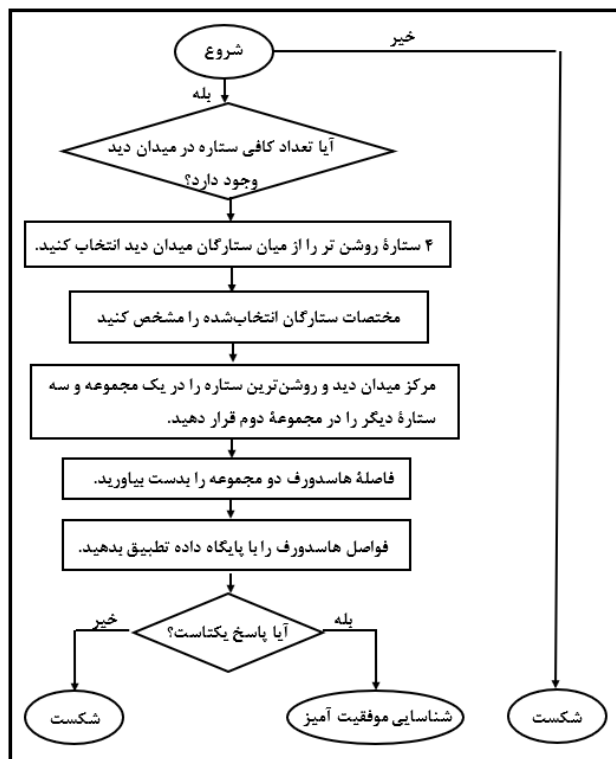
$$S_{y_i} = \frac{\sin(\delta_i) \cos(\delta_0) + \cos(\delta_i) \sin(\delta_0) \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin(\delta_i) \sin(\delta_0) + \cos(\delta_i) \cos(\delta_0) \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \quad (8)$$

در روابط بالا، α_i و δ_i نشان دهنده بعد و میل ستاره α_0 و δ_0 نشان دهنده بعد و میل مرکز میدان دید است. X_i و Y_i به دست آمده در روابط (۵) و (۶) برای هر ستاره، برای محاسبه فاصله هاسدورف مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه، در بخش های ۱-۳ و ۲-۳ دو رویکرد طراحی شده برای شناسایی ستاره بر مبنای فاصله هاسدورف توصیف می شوند.

۱-۳- شناسایی با استفاده از ستاره محور

همان طور که پیش از این اشاره شد، فاصله هاسدورف نمایان گر حداکثر فاصله یک مجموعه از مجموعه دیگر است؛ بنابراین، در اینجا به دو دسته ستاره نیاز است. شناسایی با استفاده از ستاره محور به وجود ۵ ستاره در میدان دید نیاز دارد. در این رویکرد، هر یک از ستارگان کاتالوگ (تا یک قدر مشخص) به عنوان یک ستاره محور برای ساخت پایگاه داده مورد استفاده قرار می گیرند. این ستاره محور در مرکز میدان دید قرار دارد. با استفاده از بردار جهتی ستاره محور و ابعاد میدان دید، ستارگان همسایه این ستاره محور مشخص می شوند. ستاره محور فارغ از قدر آن در مجموعه حفظ می شود. علاوه بر ستاره محور، از میان ستارگان همسایه در محدوده میدان دید، ۴ ستاره روشن تر انتخاب می شوند. روشن ترین ستاره از میان ۴ ستاره به همراه ستاره محور دسته اول را تشکیل می دهند. سه ستاره دیگر نیز دسته دوم را تشکیل می دهند. بدین ترتیب، دو دسته ستاره وجود خواهد داشت که دسته اول شامل ۲ ستاره و دسته دوم شامل ۳ ستاره است. فاصله هاسدورف این دو دسته ستاره، به عنوان معیاری برای شناسایی مورد استفاده قرار می گیرد. این رویکرد در شکل (۲) نشان داده شده است.

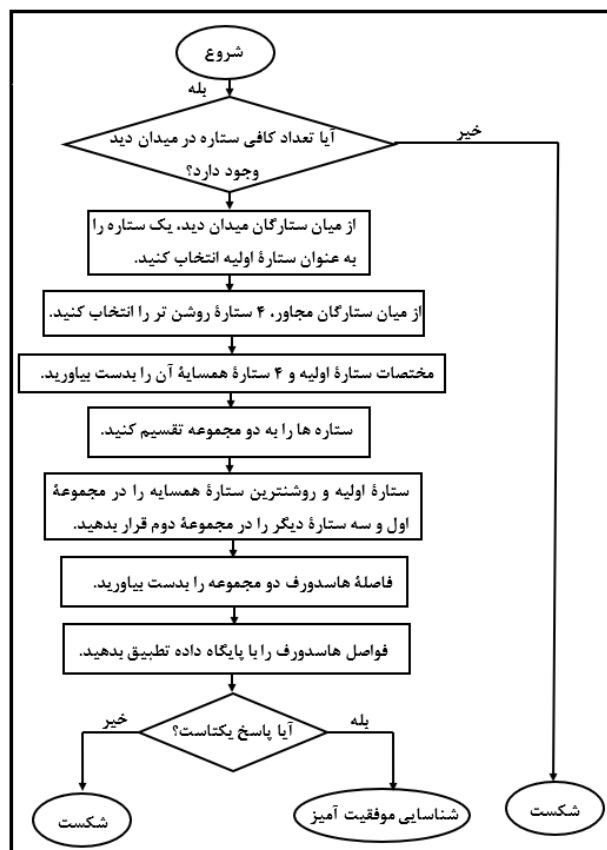
مزیت این رویکرد نسبت به رویکرد ستاره محور، کم تر بودن تعداد ستارگان مورد نیاز است. زیرا در این رویکرد، وجود ۴ ستاره در میدان دید برای شناسایی کافی است. روندنمای الگوریتم شناسایی ستاره هاسدورف با استفاده از بخش بندی کره سماوی در شکل (۵) نشان داده شده است.



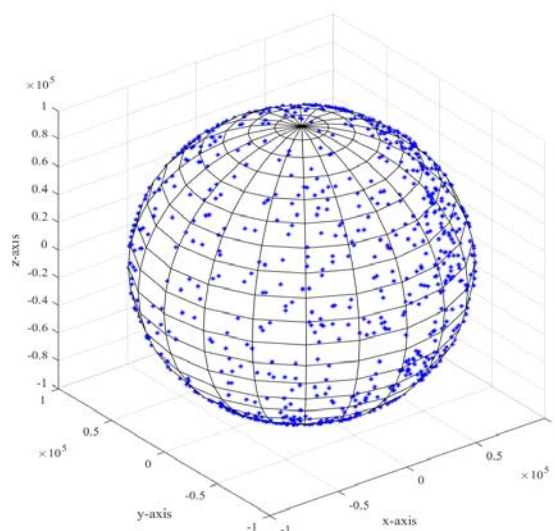
شکل ۵- روندنمای الگوریتم شناسایی هاسدورف با استفاده از بخش بندی کره سماوی

۴- شبیه سازی و نتایج

به منظور بررسی عملکرد دو رویکرد بیان شده، مجموعه ای از شبیه سازی ها برای بررسی عملکرد رویکردها در بخش های مختلف انجام شد. شبیه سازی ها برای ۲۰۰ جهت تصادفی حسگر برای هر یک از قدرهای عنوان شده، انجام شده است. پارامترهای حسگر ستاره ای شبیه سازی شده به شرح زیر است:

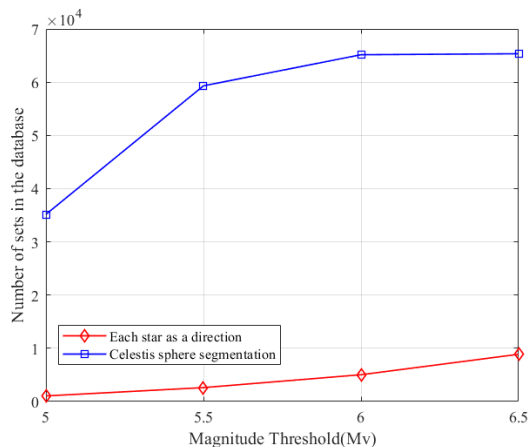


شکل ۳- روندنمای الگوریتم شناسایی فاصله هاسدورف با استفاده از ستاره محور



شکل ۴- بخش بندی کره سماوی با استفاده از زوایای بعد و میل

است سبب وجود مجموعه های تکراری از ستارگان شود اما به دلیل وجود نقاط محور متفاوت، فاصله هاسدورف حتی برای دو مجموعه با ستارگان یکسان، برابر نخواهد بود. تعداد مجموعه های ستاره ای در قدرهای مختلف برای دو رویکرد در جدول (۲) نشان داده شده است.



شکل ۶- تعداد مجموعه های ستاره ای در پایگاه داده در قدرهای مختلف برای دو رویکرد الگوریتم شناسایی ستاره هاسدورف

جدول ۲- تعداد مجموعه های ستاره ای در قدرهای مختلف

قدر ۶/۵	قدر ۶	قدر ۵/۵	قدر ۵	
				استفاده از ستاره محور
۸۸۷۴	۵۰۳۲	۲۶۱۲	۱۰۴۸	
				بخش بندی کره سماوی
۶۵۳۴۱	۶۵۱۵۴	۵۹۳۱۰	۳۵۱۵۶	

نتایج شبیه سازی شناسایی دو رویکرد در شکل های (۷) و (۸)، نشان داده شده است.

ابعاد میدان دید $۱۲^\circ \times ۱۲^\circ$ و ابعاد تصویر ۵۱۲×۵۱۲ پیکسل است. شبیه سازی ها برای چهار محدوده مختلف حساسیت قدر در کاتالوگ ستاره ای هیپارکوس انجام شده است: ستارگان روشن تر از قدر ۵ شامل ۱۶۲۷ ستاره، ستارگان روشن تر از قدر ۵/۵ شامل ۲۸۵۱ ستاره، ستارگان روشن تر از قدر ۶ شامل ۵۰۴۴ ستاره و ستارگان روشن تر از قدر ۶/۵ شامل ۸۸۷۴ ستاره. این فرضیات در جدول شماره (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱- فرضیات مسأله

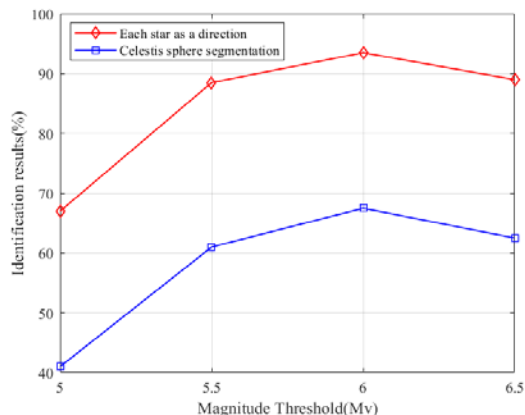
ابعاد میدان دید (درجه)	ابعاد تصویر (پیکسل)	قدرهای شبیه سازی شده
$۱۲^\circ \times ۱۲^\circ$	۵۱۲×۵۱۲	۶/۵، ۶، ۵/۵، ۵

شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار متلب^۱ و با استفاده از کامپیوتر با مشخصات Intel (R) Core™ i7-2670QM 2.20 GHz CPU and 6GB RAM انجام شده است.

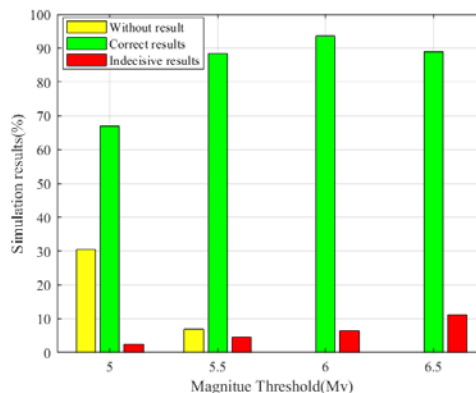
شکل (۶)، مقایسه پایگاه های داده دو رویکرد شناسایی ستاره مبتنی بر فاصله هاسدورف را در قدرهای مختلف نشان می دهد. مقایسه دو رویکرد نشان می دهد، در تمامی قدرها در رویکرد بخش بندی کره سماوی مجموعه های ستاره ای بیش تری وجود دارد.

این موضوع به دو دلیل است: دلیل اول، نیاز رویکرد بخش بندی به تعداد کمتری از ستارگان است، اما دلیل دوم به نحوه ساخت پایگاه داده برمی گردد. در رویکرد استفاده از ستاره محور، تعداد مجموعه های ستاره ای به تعداد ستارگان و کافی بودن ستارگان همسایه آن ها بستگی دارد. در این مقاله، اندازه در نظر گرفته شده برای میدان دید به نحوی است که تا جای ممکن، تعداد ستاره کافی در میدان دید وجود داشته باشد؛ اما در قدرهای کوچک تر ممکن است در برخی موارد این موضوع برآورده نشود. در رویکرد بخش بندی کره سماوی بدون توجه به وجود ستارگان، کره سماوی به بخش هایی با فاصله کوچک تقسیم می شود. این موضوع ممکن

^۱ MATLAB



شکل ۹- نرخ شناسایی در قدرهای مختلف برای دو رویکرد الگوریتم شناسایی ستاره هاسدورف



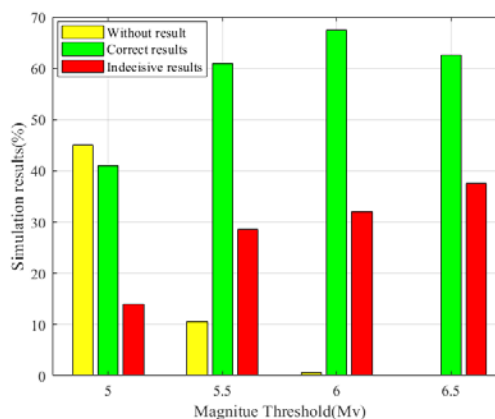
شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی در رویکرد استفاده از ستاره محور

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی رویکرد ستاره محور

قدر ۶/۵	قدر ۶	قدر ۵/۵	قدر ۵	
۰٪	۰٪	۷٪	۳۰/۱۵٪	بدون پاسخ
۸۹٪	۹۳/۱۵٪	۸۸/۱۵٪	۶۷٪	پاسخ‌های صحیح
۱۱٪	۶/۱۵٪	۴/۱۵٪	۲/۱۵٪	پاسخ‌های غیر قابل قبول

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی رویکرد بخش‌بندی کره سماوی

قدر ۶/۵	قدر ۶	قدر ۵/۵	قدر ۵	
۰٪	۱۵٪	۱۰/۱۵٪	۴۵٪	بدون پاسخ
۶۲/۱۵٪	۶۷/۱۵٪	۶۱٪	۴۱٪	پاسخ‌های صحیح
۳۷/۱۵٪	۳۲٪	۲۸/۱۵٪	۱۴٪	پاسخ‌های غیر قابل قبول



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی در رویکرد بخش‌بندی کره سماوی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، رویکرد استفاده از ستاره محور نسبت به رویکرد بخش‌بندی کره سماوی در تمامی قدرها عملکرد بهتری دارد. با افزایش قدر ستارگان، نرخ پاسخ‌های صحیح افزایش می‌یابد. این نرخ در قدر ۶ به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد، اما با افزایش قدر به ۶/۵ اندکی کاهش می‌یابد.

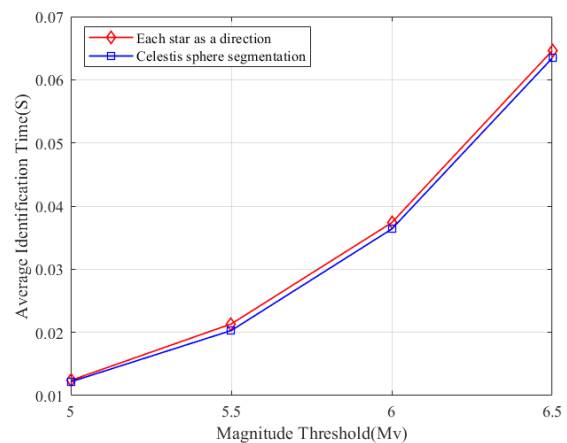
نمودار مربوط به نرخ شناسایی صحیح به طور جداگانه در شکل (۹) رسم شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های دو رویکرد در جدول‌های (۳) و (۴) خلاصه شده است.

یکی از مهم ترین مزایای الگوریتم شناسایی هاسدورف، سرعت شناسایی این الگوریتم است. برای بررسی این موضوع، سرعت شناسایی این الگوریتم با سرعت شناسایی الگوریتم های پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته در مقالات قبلی نگارندگان، مقایسه شده است. زاهدنمازی و همکاران در مطالعه ای به الگوریتم هرمی و سرعت شناسایی در این الگوریتم و روش های جستجو در پایگاه داده پرداخته اند [۱۵]. میانگین زمان جستجو در الگوریتم هرمی برای قدرهای ۴ تا ۶ در شکل (۱۱) نشان داده است. در الگوریتم هرمی، میانگین زمان جستجو برای ستارگان روشن تر از قدر ۶ بیش از ۱/۳ ثانیه بوده است.

در طلوعی و همکاران سه الگوریتم هندسی با استفاده از ۵ ستاره در میدان دید را پیشنهاد کرده اند [۶]. شکل (۱۲)، میانگین زمان شناسایی در این الگوریتم ها را نشان می دهد. همان گونه که از شکل (۱۲) مشخص است، میانگین زمان جستجو در دو ساختار از این سه ساختار در قدر ۴ بیش از ۱۵ ثانیه و در ساختار سوم بیش از ۲۵ ثانیه است. قدرها و تعداد ستارگان مورد بررسی قرار گرفته در این الگوریتم ها با یکدیگر متفاوت هستند. بیشترین قدر مورد بررسی قرار گرفته در این الگوریتم ها، مربوط به الگوریتم های پیشنهادی مبتنی بر فاصله هاسدورف است که در آن ستارگان تا قدر ۶/۵ مورد بررسی قرار گرفته اند. این موضوع یکی دیگر از مزایای این روش را آشکار می سازد و آن زمان مورد نیاز برای ساخت پایگاه داده است. در ساختارهای هندسی ۵ ستاره ای، زمان مورد نیاز برای ساخت پایگاه داده تا قدر ۴، چند هفته است. این زمان برای الگوریتم هرمی کم تر است. در الگوریتم هرمی برای ستارگان تا قدر ۶، با توجه به نوع روش جستجو در پایگاه داده، ممکن است تا یک هفته برای ساخت پایگاه داده زمان لازم باشد. اما برای الگوریتم های شناسایی مبتنی بر فاصله هاسدورف، ساخت پایگاه داده برای ستارگان تا قدر ۶/۵ در رویکرد بخش بندی کره سماوی فقط چند ساعت زمان می برد. این زمان در رویکرد ستاره محور، کم تر از یک ساعت است. بنابراین، عدم بررسی قدرهای بالاتر در الگوریتم های عنوان شده، به دلیل زمان بر بودن ساخت پایگاه داده در این الگوریتم هاست؛ در حالی که در الگوریتم شناسایی هاسدورف چنین مشکلی وجود ندارد.

در شناسایی با استفاده از قدرهای پایین، به خصوص قدر ۵، در بخشی از موارد، عدم دستیابی به پاسخ، ناشی از کمبود ستارگان میدان دید برای شناسایی است. این مشکل در قدرهای بالاتر از ۶ با توجه به اندازه در نظر گرفته شده برای میدان دید وجود ندارد. کاهش نرخ شناسایی در قدر ۶/۵ نسبت به قدر ۶، ناشی از افزایش تراکم ستارگان است که سبب می شود، اختلاف فواصل هاسدورف محاسبه شده برای مجموعه های ستاره ای، کوچک تر از محدوده خطای در نظر گرفته شده در الگوریتم باشد. بیشترین نرخ شناسایی در این رویکردها مربوط به رویکرد ستاره محور در قدر ۶ است که نرخ شناسایی در آن، ۹۳/۵٪ است. اگرچه این نرخ از نرخ شناسایی الگوریتم مشهور هرمی با ۹۵/۸٪ کم تر است [۹]؛ اما فاصله هاسدورف از برخی جنبه های دیگر از جمله زمان مورد نیاز برای ساخت پایگاه داده و زمان جستجو در پایگاه داده، بر الگوریتم هرمی برتری دارد که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند. شکل (۱۰)، میانگین زمان شناسایی در قدرهای مختلف برای دو رویکرد فاصله هاسدورف را نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد، میانگین زمان شناسایی برای هر دو رویکرد تقریباً برابر است. برای قدر ۶، میانگین زمان شناسایی در رویکرد ستاره محور ۰/۰۳۷۴ ثانیه و در رویکرد بخش بندی کره سماوی، ۰/۰۳۶۴ ثانیه است. این زمان در قدر ۶/۵ میانگین در رویکرد ستاره محور ۰/۰۶۴۶ ثانیه و در رویکرد بخش بندی کره سماوی ۰/۰۶۳۴ ثانیه است.



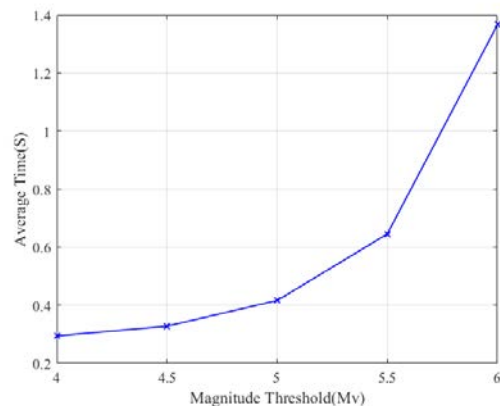
شکل ۱۰- میانگین زمان شناسایی در دو رویکرد الگوریتم شناسایی مبتنی بر فاصله هاسدورف در قدرهای ۵ تا ۶/۵

۵- نتیجه گیری

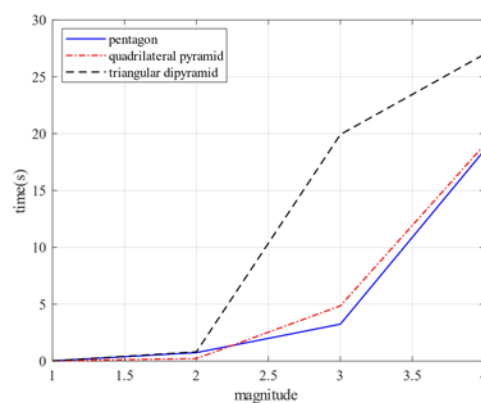
در این مقاله، دو الگوریتم شناسایی ستاره گم شده در فضای جدید با استفاده از فاصله هاسدورف ارائه شد. اولین الگوریتم به ۵ ستاره در میدان دید نیاز دارد و از یک ستاره محور و ستارگان همسایه آن برای شناسایی استفاده می کند و با تقسیم ستارگان میدان دید به دو مجموعه، فاصله هاسدورف میان آنها را محاسبه می کند. رویکرد دوم از بخش بندی کره سماوی بر اساس زوایای بعد و میل بهره می برد و به ۴ ستاره در میدان دید نیاز دارد. در این رویکرد، مرکز میدان دید نقطه محور محسوب می شود. شبیه سازی ها برای قدرهای مختلف ستارگان، هر یک برای ۲۰۰ جهت تصادفی حسگر ستاره انجام شد و دو رویکرد از نظر پایگاه داده، نرخ شناسایی و زمان شناسایی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج، برتری رویکرد استفاده از ستاره محور از نظر نرخ شناسایی را نشان می دهد. نرخ شناسایی این رویکرد در قدر ۶، ۹۳/۵٪ است. میانگین زمان جستجو در دو رویکرد در قدرهای مختلف تقریباً یکسان است و در قدر ۶ در حدود ۰/۰۳۷ ثانیه و در قدر ۶/۵ در حدود ۰/۰۶۴ ثانیه است. به منظور مقایسه سرعت شناسایی الگوریتم هاسدورف با سایر الگوریتم ها، سرعت این الگوریتم با الگوریتم هرمی و سه الگوریتم هندسی ۵ ستاره ای پیشنهادی در مقالات قبلی نگارندگان مورد مقایسه قرار گرفت. میانگین سرعت شناسایی الگوریتم هرمی در قدر ۶، بیش از ۱/۳ ثانیه است. در مورد ساختارهای هندسی ۵ ستاره ای، میانگین زمان شناسایی در قدر ۴ در دو ساختار بیش از ۱۵ ثانیه و در ساختار سوم بیش از ۲۵ ثانیه است. در این ساختارها، به دلیل زمان بر بودن ساخت پایگاه داده، قدرهای بالاتر مورد بررسی قرار نگرفته است. این موضوع، برتری روش هاسدورف را از دیدگاه سهولت ساخت پایگاه داده و به کارگیری در حسگر ستاره در کاربردهای به هنگام را نشان می دهد.

۶- مراجع

[1] H.Sedaghat, A. Toloei, H.Ghanbarpour, "Automatic Star Identification Using Triangle Base and Increase Search Speed", *Journal of Space Science and Technology*, vol.4, no.4, 2012;



شکل ۱۱- میانگین زمان شناسایی در الگوریتم هرمی برای قدرهای ۴ تا ۶



شکل ۱۲- میانگین زمان جستجو در سه الگوریتم هندسی ۵ ستاره ای

در کاربردهای عملی برای استفاده از الگوریتم شناسایی هاسدورف، باید ملاحظاتی در نظر گرفته شود. در رویکرد ستاره محور، از آنجا که در ساخت پایگاه داده ستاره محور به عنوان مرکز میدان دید در نظر گرفته شده است، باید در هنگام عکس برداری از آسمان، مرکز میدان دید روی یک ستاره قرار داشته باشد. در رویکرد بخش بندی کره سماوی در هنگام ساخت پایگاه داده فواصل گره ها یک درجه در نظر گرفته شده است. با کاهش این فاصله هنگام ساخت پایگاه داده می توان دقت روش را افزایش داد.

تعارض منافع

"هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

[13] Q.Wei, X.Liang, F. Jiancheng, "A new star identification algorithm based on improved Hausdorff distance for star sensors", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.49,no,3, pp.2101-2109,2013

[14] F.Jiancheng, F. Saffih, Q. Wei, January. "Automatic star pattern recognition in tracking mode", In *6th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology*, IEEE, pp. 249-252 ,2009

[15] M.Zahednamazi, A.Toloei, R.Ghasemi, "Simulation of database search algorithms towards star-identification speed enhancement", *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, vol.11,no.1, pp.117-130,2022

[2] G.Zhang, "Star Identification: Methods, Techniques and Algorithms", 1st ed, Beijing, Springer,2016

[3] A. Toloei, M.S.Arani, M. Abaszadeh, "A new composite algorithm for identifying the stars in the star tracker", *International Journal of Computer Applications*, vol.102,no.2, 2014

[4] M.S.Arani, A. Toloei, Z. Eghbaleh, June. "A geometric star identification algorithm based on triple triangle pattern", In *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, IEEE, pp. 81-85,2015

[5] B.B.Spratling IV, D.Mortari, "A survey on star identification algorithms", *Algorithms*, vol.2,no.1, pp.93-107,2009

[6] A.Toloei, M.Zahednamazi, R.Ghasemi, F.Mohammadi, "A comparative analysis of star identification algorithms", *Astrophysics and Space Science*", vol.365,no.4, pp.1-9,2020

[7] M.Zahednamazi, A. Toloei, R.Ghasemi, "Different types of star identification algorithms for satellite attitude determination using star sensor", *Aerospace Systems*, vol(4).no.4, pp.315-321,2021

[8] C.L.Cole, J.L Crassidis, "Fast star-pattern recognition using planar triangles", *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol.29,no.1, pp.64-71,2006

[9] D.Mortari, M.A.Samaan, C.Brucoleri,J.L Junkins, "The pyramid star identification technique", *Navigation*, vol.51,no.3, pp.171-183,2004

[10] C.Padgett, K. Kreutz-Delgado, "A grid algorithm for autonomous star identification", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.33,no.1, pp.202-213,1997

[11] J.Hong, J.A. Dickerson, "Neural-network-based autonomous star identification algorithm", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol.23,no.4, pp.728-735,2000

[12] L.Paladugu, M.P Schoen, B.G. Williams, January, "Intelligent techniques for star-pattern recognition", In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol.37130,pp.1243-1248 , 2003



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)