

Original Research Paper**Positioning Using Star Images and a Combined Image Processing and Optimization Algorithm**Amir Reza Kosari^{1*}  and Bahador Abolpour²

1. Faculty of Interdisciplinary Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Aerospace Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO**ABSTRACT****Article History:**

Receive 05 March 2025

Revise 09 June 2025

Accept 12 July 2025

Available Online 15 July 2025

Keywords:

Positioning

Image processing

Genetic algorithm

Star image

The celestial navigation is one of the oldest navigation methods for determining the position, which is done by observing different celestial bodies such as stars. With the advancement of technology and the emergence of accurate imaging sensors, this method has entered a new stage, so that by processing images of stars and analyzing their data, the exact position of an observer can be determined in space or on land. This paper presents a novel method for determining the geographic location of a mobile system using an image of visible stars in the local sky at a specific time. The proposed method does not require any prior knowledge about the observer's position or orientation. Initially, a grayscale image of the sky is either generated using the Sky Map function in MATLAB, based on the SAO star catalog, or acquired directly from a star sensor. Spatial and frequency-domain features are extracted from the image and compared with features from a set of synthetic sky images corresponding to various geographic locations. A genetic algorithm is employed to optimize the matching process through a tailored fitness function. The key innovation of this research lies in the development of an algorithm capable of accurate localization using only a sky image, without reliance on auxiliary sensors or initial position data. The proposed approach is robust to noise and image rotation and is applicable across the entire Earth's surface. Simulation results confirm the effectiveness and high accuracy of the method for vision-based autonomous navigation.

* Corresponding Author's E-mail: kosari_a@ut.ac.ir**How to Cite this Article:**A. R. Kosari and B. Abolpour, "Positioning using star images and a combined image processing and optimization algorithm," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 51-69, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1535>.**COPYRIGHTS**© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. 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/)

موقعیت‌یابی جغرافیایی با استفاده از تصاویر ستارگان و الگوریتم تلفیقی پردازش تصویر و بهینه‌سازی

امیررضا کوثری^{۱*} و بهادر ابولپور^۲

۱- دانشیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، پردیس بین‌الملل کیش، دانشگاه تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

ناوبری سماوی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تعیین موقعیت است که با استفاده از مشاهده اجرام سماوی مانند ستارگان انجام می‌شود. با پیشرفت فناوری و ظهور حسگرهای تصویری دقیق، این روش وارد مرحله‌ای نوین شده، به طوری که می‌توان با پردازش تصاویر ستارگان و تحلیل داده‌های آن‌ها، موقعیت دقیق ناظر را در فضا یا روی زمین تعیین نمود. در این مقاله، یک روش نوین جهت موقعیت‌یابی سامانه‌های متحرک با استفاده از تصاویر ستارگان ارائه شده است. هدف، تعیین مختصات جغرافیایی ناظر در زمانی مشخص و تنها از طریق تحلیل تصویر آسمان قابل رؤیت است؛ به گونه‌ای که نیازی به دریافت اطلاعات اولیه از موقعیت یا وضعیت فضایی سامانه نباشد. برای این منظور، ابتدا تصویر خاکستری از آسمان با استفاده از تابع Skymap در محیط MATLAB و با بهره‌گیری از داده‌های کاتالوگ ستاره‌ای SAO تولید شده یا تصویر واقعی ثبت‌شده به‌عنوان ورودی دریافت می‌شود. سپس مجموعه‌ای از ویژگی‌های مکانی و فرکانسی از تصویر استخراج شده و با ویژگی‌های تصاویر سنتز شده در نقاط مختلف جغرافیایی مقایسه می‌گردد. در این فرایند، یک الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برای جست‌وجوی موقعیت با تطبیق تصاویر بر اساس تابع برازش طراحی شده به کار گرفته می‌شود. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در توسعه الگوریتمی است که موقعیت‌یابی دقیق را تنها بر پایه یک تصویر آسمان و بدون نیاز به سنسورهای کمکی یا اطلاعات اولیه ممکن می‌سازد. روش ارائه‌شده نسبت به چرخش تصویر و نویز مقاوم بوده و قابلیت اجرا بر روی کل سطح زمین را دارد. نتایج شبیه‌سازی کارایی و دقت بالای الگوریتم را در موقعیت‌یابی خودکار مبتنی بر بینایی ماشین نشان می‌دهد.

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۵ اسفند ۱۴۰۳
بازنگری ۱۹ خرداد ۱۴۰۴
پذیرش ۲۱ تیر ۱۴۰۴
اولین انتشار ۲۴ تیر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

موقعیت‌یابی
پردازش تصویر
الگوریتم ژنتیک
تصویر ستارگان

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kosari_a@ut.ac.ir

How to Cite this Article:

A. R. Kosari and B. Abolpour, "Positioning using star images and a combined image processing and optimization algorithm," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 51-69, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2025.1535>.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. 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/)



اختصارات

Adaptive Square-Root Unscented Particle Filtering (ASUPF)	فیلتر ذرات ساده‌نشده با جذر تطبیقی
Global Positioning System (GPS)	سیستم موقعیت‌یابی جهانی
Particle Image Velocimetry (PIV)	سرعت‌سنجی تصویر ذرات
Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)	رصدخانه اخترفیزیک اسمیتسونیان
Spherical Simplex Unscented Particle Filter (SSUPF)	فیلتر ذره‌ای کروی بی‌اثر
Unscented Kalman Filter (UKF)	فیلتر کالمن بی‌اثر
Unscented Particle Filter (UPF)	فیلتر ذره‌ای بی‌اثر

مقدمه

تصویربرداری از ستارگان و استخراج مشخصه‌های مختلف از این تصاویر، به‌عنوان مکانیسمی شناخته‌شده و کاربردی جهت تعیین وضعیت ماهواره^۱ و یا ردیابی ستارگان^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱-۳]. اما پیچیدگی‌های موضوع باعث شده که تحقیقات بسیار محدودی در زمینه موقعیت‌یابی با تکیه بر سنسورهای ستاره‌ای برای ماهواره‌های مستقر در مدار زمین صورت پذیرد [۴-۸]. سنسورهای ستاره یا ردیاب‌های ستاره، دقیق‌ترین حسگرهایی هستند که در حال حاضر در بازار وجود دارند. حیاتی‌ترین جزء سنسور ستاره‌ای، الگوریتم شناسایی آن است. این الگوریتم به‌عنوان ورودی، مختصات و شدت منابع نوری موجود در تصویر را در نظر گرفته و ستارگان حاضر را بدون اطلاعات با استفاده از الگوریتم‌های پردازش تصویر و تطبیق الگوهای ستاره‌ای، ستاره‌ها را شناسایی می‌کنند [۹]. در میان تمام حسگرهای آسمانی، سنسورهای ستاره‌ای می‌توانند دقیق‌ترین اطلاعات وضعیتی را ارائه دهند [۱۰، ۱۱]. با این حال، در مراجع مختلف بارها ادعا شده است که، یک سنسور ستاره‌ای نمی‌تواند تعیین موقعیت را در حالی که به‌تنهایی استفاده می‌شود انجام دهد [۸، ۱۲].

روش ناوبری سماوی (Celestial Navigation Method) یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین روش‌های تعیین موقعیت جغرافیایی است که با استفاده از مشاهده موقعیت اجرام سماوی مانند ستارگان، خورشید، ماه و سیارات انجام می‌شود. این روش بر مبنای اندازه‌گیری زاویه بین جرم آسمانی مورد نظر و افق ناظر، و همچنین

دانستن زمان دقیق مشاهده، قادر است موقعیت ناظر (مانند کشتی یا هواپیما) را روی کره زمین مشخص کند. در دوران معاصر، با پیشرفت فناوری و ظهور حسگرهای تصویری دقیق، این روش سنتی وارد مرحله‌ای نوین شده است، به‌طوری‌که می‌توان با پردازش تصاویر ستارگان و تحلیل داده‌های آن‌ها، موقعیت دقیق ناظر را در فضا یا روی زمین تعیین نمود [۱۳]. روش ناوبری سماوی یکی از روش‌های خودمختار و غیر وابسته به زیرساخت‌های زمینی است که با استفاده از موقعیت اجرام آسمانی مانند ستارگان، خورشید، ماه و زمین، امکان تخمین موقعیت و جهت‌گیری فضاپیماها و وسایل نقلیه فضایی را فراهم می‌سازد. این روش به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر خودبستگی، عدم نیاز به تجهیزات رادیویی، و دقت بالا، در حوزه‌هایی مانند ماهواره‌ها، کاوشگرهای اعماق فضا، و وسایل نقلیه سطحی در مأموریت‌های ماه و سیارات مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۱۴].

کوان [۱۴] در مطالعه خود به معرفی روش‌های پیش‌پردازش و تصحیح اعوجاج نقشه‌های ستاره‌ای پرداخته و با استفاده از الگوریتم‌های تشخیص بردار نوری ستارگان، دقت و کیفیت داده‌های ورودی به سامانه ناوبری را افزایش داده است. ژیانچن [۱۵] نیز مروری جامع بر روش‌های ناوبری سماوی برای ماهواره‌های مدار پایین، مدار بالای زمین و کاوشگرهای سیاره‌ای ارائه کرده و روند توسعه و آینده این حوزه را تحلیل نموده است. در زمینه بهبود عملکرد الگوریتم‌های تخمین وضعیت، ژائو [۱۶] فیلتر جدیدی به‌نام SSUPF (فیلتر ذره‌ای کروی بی‌اثر) را معرفی کرده که با کاهش ۲۴ درصدی بار محاسباتی نسبت به فیلتر ذره‌ای بدون بردار (UPF)، کارایی بهتری در محیط‌های عمیق فضایی ارائه می‌دهد.

از سوی دیگر، نینگ [۱۷، ۱۸] در دو مقاله جداگانه، دو کاربرد مهم از ناوبری سماوی را بررسی کرده است: یکی در ناوبری خودمختار سطحی برای مریخ‌نورد یا ماه‌نورد، که با استفاده از الگوریتم ASUPF توانسته دقت موقعیت‌یابی را به کمتر از ۶۰ متر برساند؛ و دیگری در ماهواره‌های مدار نزدیک زمین، که در آن با ترکیب داده‌های سنسور زمین و انکسار نوری ستارگان، یک روش فیوژن مبتنی بر UKF ارائه شده که هم دقت بالایی دارد و هم قابلیت استفاده به‌عنوان سیستم پشتیبان را دارد. پیروس [۱۹] با هدف ساده‌سازی ناوبری مستقل بدون نیاز به GPS، روشی کاربردی مبتنی بر محاسبه مستقیم موقعیت جغرافیایی از طریق مشاهده دو جرم آسمانی را توسعه داده که قابل اجرا در دستگاه‌های قابل حمل مانند تلفن همراه بوده و دقت رضایت‌بخشی را در شرایط واقعی ارائه می‌دهد.

باوها و همکاران [۲۰] و وی و همکاران [۸] از ترکیب سنسور ستاره و

ستارگان در تصاویر و کاتالوگ مرجع، فرایند تعیین وضعیت را تسریع و بهبود بخشیده‌اند. در زمینه کالیبراسیون هندسی ردیاب‌های ستاره‌ای نیز روش‌هایی توسعه یافته که با استفاده از تصاویر ستارگان و انجام تخمین وضعیت، امکان کالیبراسیون کامل و دقیق حسگرها را فراهم آورده است [۳۲]. این مطالعات گرچه اغلب در محدوده تعیین وضعیت و کالیبراسیون قرار داشته‌اند، اما از منظر پردازش تصاویر ستارگان و استخراج ویژگی‌های مؤثر در تعیین مختصات فضایی، با رویکرد پژوهش حاضر در ارتباط هستند.

جعفریان و همکاران [۳۳] روشی نوین برای تخمین سرعت زاویه‌ای فضاپیما با استفاده از تکنیک PIV (تصویربرداری سرعت ذرات) و ترکیب آن با مثلث‌بندی دلونی (Delaunay Triangulation) و زاویه‌های فضایی بین ستارگان ارائه می‌دهد. این روش نیازمند شناسایی ستاره یا تعیین ماتریس وضعیت Attitude نیست و می‌تواند به صورت موازی با الگوریتم‌های معمول ردیاب ستاره اجرا شود. در این روش، با انتخاب پنجره‌ای حاوی دو یا چند ستاره در تصویر اول و تطبیق آن با پنجره‌ای متناظر در تصویر دوم (با استفاده از ماتریس همبستگی نرمال‌شده)، تغییر زاویه مرکز پنجره محاسبه و نرخ زاویه‌ای به دست می‌آید. برای اطمینان از تطبیق درست، ویژگی‌های محلی مثل زاویه‌های فضایی یا مثلثی دلونی بین ستارگان در دو تصویر مقایسه می‌شود.

جینگ^۱ و لیانگ^۲، یک الگوریتم بهبودیافته شناسایی ستاره‌ها مبتنی بر شبکه عصبی ارائه دادند. این روش ترکیبی از مزایای دو روش سنتی، یعنی الگوریتم مثلثی سنتی (که از فاصله زاویه‌ای برای تطبیق استفاده می‌کند) و روش شبکه‌ای (که نسبت به نویز مقاوم است) بود [۲۳]. در این روش، ویژگی‌هایی که برای شناسایی موقعیت ستاره‌ها استفاده می‌شوند، مشخصاتی از نوع زوایای افقی^۳ و نقطه اوج^۴ هستند. معروف‌ترین الگوریتم در این حوزه الگوریتم مثلث است [۳۴]. الگوریتم مثلث اصلی به نویز صفحه کانونی و ستاره‌های کاذب حساس است. نتیجه آن ممکن است ظاهر شدن نقاط نورانی یا تغییرات تصادفی در تصویر باشد که به اشتباه ممکن است ستاره تلقی شوند. الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ها تلاش می‌کنند تا این عوامل مزاحم را فیلتر کرده و تنها ستارگان واقعی را شناسایی کنند [۳۵].

برای بهبود مشخصه‌های الگوریتم و کاهش زمان شناسایی، الگوریتم هرمی معرفی شده است [۲۶]. این الگوریتم حداقل از چهار ستاره برای ایجاد الگو و بردار ویژگی‌ها استفاده می‌کند. در این راهکار، نویز صفحه کانونی همچنان بر عملکرد الگوریتم تأثیر گذار است. الگوریتم دیگری ستاره‌ها را با مثلث‌های مسطح به همراه مساحت و

سنسورهای دیگر (UV Earth Sensor و Inclinometer) برای ناوبری مستقل در مدار زمین استفاده کردند که دقت‌هایی در حدود ۳۰۰ متر و ۱۳۲ متر در مدار ارائه دادند. در مقالات دیگری نظیر [۲۰] و [۲۱] نیز الگوریتم‌های شناسایی ستاره‌ها مبتنی بر مثلث‌بندی و ایزومورفیسم زیرگراف مطرح شده که صرفاً در تعیین وضعیت کاربرد دارند. در سال‌های اخیر تلاش‌هایی در جهت استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی در شناسایی ستارگان انجام شده است [۲۲-۲۵]. اما این مطالعات عمدتاً به مسأله شناسایی ستاره‌ها در تصاویر و نه موقعیت‌یابی مستقل پرداخته‌اند.

در زمینه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک نیز مطالعات پراکنده‌ای وجود دارد. برای مثال موریتاری و همکاران [۲۶] الگوریتم هرمی را برای بهبود سرعت شناسایی ستارگان در ردیاب‌های ستاره ارائه کردند. با این حال، تلفیق این الگوریتم‌ها با پردازش تصاویر برای تعیین موقعیت دقیق جغرافیایی در سطح زمین و حذف تأثیر چرخش تصاویر، در هیچ یک از کارهای پیشین به شکل یکپارچه انجام نشده است. از سویی در مرجع [۲۷] روش مقاومی در برابر نویز و اشبای کاذب معرفی شده که در حوزه Attitude Determination بوده و روش پیشنهادی ما در این پژوهش از لحاظ مقاومت در برابر تغییر زاویه دید و چرخش تصویر و همچنین تعیین مختصات جغرافیایی در سطح زمین با دقت در حد هزارم درجه، دارای نوآوری است.

در این میان، روش‌هایی مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای شناسایی و تعیین مرکز ستارگان در تصاویر نویزی توسعه یافته است که کاربرد آن‌ها در ردیاب‌های ستاره‌ای CubeSat به اثبات رسیده است [۲۸]. این رویکردها به دلیل قابلیت نویززدایی و شناسایی دقیق در تصاویر با کیفیت پایین، جایگاه ویژه‌ای در بهبود عملکرد ردیاب‌های ستاره‌ای یافته‌اند. از سوی دیگر، الگوریتم‌هایی مبتنی بر تطبیق الگوهای فازی در حوزه فوریه و جبران چرخش تصویر معرفی شده که توانسته‌اند مقاومت مناسبی در برابر نویز و چرخش تصاویر ایجاد کنند [۲۹]. این دسته از روش‌ها عمدتاً در ردیابی و تعیین وضعیت ماهواره‌ها به کار رفته و در کاهش خطای ناشی از دوران تصویر مؤثر واقع شده‌اند. در حوزه بهینه‌سازی فرآیند ردیابی و شناسایی، الگوریتم‌های ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و منطق فازی نیز معرفی گردیده که در کنترل حرکت سامانه‌های ردیاب نجومی به کار رفته و بهبود پایداری و دقت ردیابی را فراهم نموده است [۳۰]. افزون بر این، الگوریتم‌هایی مبتنی بر تطبیق بهینه تصاویر ستارگان برای تعیین وضعیت ماهواره‌ها پیشنهاد شده که دقت و کارایی بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک از خود نشان داده‌اند [۳۱]. این روش‌ها با بهینه‌سازی مقادیر اختلاف مختصات

3. Azimuth
4. Zenith

1. Jing
2. Liang

دقت موقعیت‌یابی INS بررسی کرده است. همچنین نشان داده شده که جایگزینی داده‌های ژيروسکوپ با خروجی حسگر ستاره‌ای بدون فیلتر کالمن نیز به کاهش خطاها منجر می‌شود. مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، ادغام حسگر ستاره‌ای با INS به کمک فیلتر کالمن است که موجب کاهش چشمگیر خطاها در تمام پارامترهای ناوبری شده، از جمله کاهش خطای ارتفاع از ۳۳ کیلومتر به ۲۷۰ متر.

حمیدی و صمدزادگان [۴۱] الگوریتمی جهت تناظریابی ستاره‌های مشاهده شده توسط ردیاب ستاره‌ای با ستاره‌های موجود در کاتالوگ ستاره‌ای ارائه دادند. هاشمی و همکاران [۴۲] ابتدا الگوریتم‌های یک ردیاب ستاره برای تعیین وضعیت ماهواره را پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار دادند. تصاویری با کیفیت بالا از ستارگان که توسط دوربین ردیاب ستاره تهیه شده است را برای اجرای الگوریتم مورد استفاده قرار دادند. امین‌الرعا و همکاران [۴۳] مدل دقیقی از بخش الکترواپتیکی سامانه ردیاب ستاره و نحوه تشکیل تصویر ستاره را در کار خود ارائه دادند. آن‌ها از این مدل برای تشخیص ستاره‌ها با معرفی شیوه خاص در تعیین مقدار آستانه در تصویر گرفته شده توسط ردیاب ستاره استفاده کردند. کوثری و مکارم [۴۴] روشی مؤثر برای محاسبه عدم هم‌ترازی بین ردیاب ستاره و ژيروسکوپ نوری ارائه دادند و مطالعات آن‌ها به بهبود دقت در تشخیص موقعیت و مسیر حرکت ماهواره‌ها و ارائه راه‌حل‌های مؤثر برای مشکلات مرتبط با سیستم‌های ردیاب ستاره‌ای کمک کرده‌اند.

در این پژوهش، جهت تولید تصاویر سماوی و شبیه‌سازی موقعیت ستارگان، از نرم‌افزار متلب و تابع اسکای‌مپ (Skymap) بهره گرفته شده است. این تابع با دریافت مقادیر ورودی شامل طول و عرض جغرافیایی، زمان و تاریخ، تصویر آسمان در آن مختصات را بر اساس داده‌های بانک اطلاعاتی ستارگان تولید می‌کند. در کد اسکای‌مپ مورد استفاده، داده‌های مختصات و قدر ظاهری ستارگان از کاتالوگ SAO استخراج می‌گردد [۴۵]. با این حال، در هیچ‌یک از پژوهش‌های گذشته، یکپارچه‌سازی الگوریتم‌های پردازش تصویر با رویکردهای جست‌وجوی بهینه برای تعیین مستقیم موقعیت جغرافیایی با استفاده از تصاویر ستارگان بررسی نشده است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در آن است که الگوریتمی توسعه یافته که با بهره‌گیری از ویژگی‌های تصویری و الگوریتم ژنتیک، موقعیت جغرافیایی سامانه را صرفاً بر اساس تصویر آسمان شناسایی می‌کند، بدون نیاز به اطلاعات اولیه از وضعیت یا موقعیت ناظر. این موضوع می‌تواند دقت، خودمختاری و سادگی سیستم‌های ناوبری فضایی و زمینی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

گشتاور قطبی آنها برای مطابقت با فهرست مثلث‌ها شناسایی می‌کند [۲۶]. گروهی از محققان در مرجع [۲۷] یک الگوریتم با عملکرد در حوزه فرکانس و با تمرکز بر روی قطب‌ها^۱ برای مقابله با وجود اشیاء کاذب طراحی کرده‌اند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داده است که دقت شناسایی در این روش و با در نظر گرفتن تعداد زیادی از اشیاء کاذب می‌تواند به حدود ۱۰۰ درصد نیز برسد.

سالاریه و خالصی [۳۷] امکان تعیین همزمان موقعیت و وضعیت ماهواره به کمک حسگر ردیاب ستاره را با استفاده از کاتالوگ ستارگان در پژوهش خود جهت تعیین مسیر حرکت مورد بررسی قرار دادند. کاتالوگ‌های ستاره‌ای مجموعه‌هایی ساختارمند از اطلاعات مربوط به اجرام سماوی هستند که به منظور اهداف مختلفی از جمله اخترشناسی، ناوبری سماوی، موقعیت‌یابی نجومی، تحلیل تصاویر آسمانی و طراحی مأموریت‌های فضایی تهیه می‌شوند. این کاتالوگ‌ها معمولاً شامل داده‌هایی نظیر مختصات سماوی ستارگان در چارچوب‌های مختلف مانند، قدر نوری، نوع طیفی، پارالاکس، حرکت خاص، سرعت شعاعی، و اطلاعات فیزیکی مانند جرم، دما و فلزینگی هستند [۳۸]. سمیه‌ئی و همکاران [۳۹] با هدف بهبود عملکرد حسگرهای ستاره‌ای و کاهش محدودیت‌های سخت‌افزاری، اقدام به طراحی یک کاتالوگ راهنمای یکنواخت و بهینه از ستارگان کرده‌اند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و یک روش جدید تعیین چگالی کروی ستارگان، ساختاری بهینه ارائه شده که در بیش از ۹۸ درصد میدان‌های دید، حداقل ستارگان موردنیاز برای شناسایی موفق را تضمین می‌کند.

همچنین آن‌ها [۴۰]، الگوریتمی نوین بر پایه خوشه‌بندی k-means وزن‌دار با معیار ژئودزیک برای تولید پایگاه داده‌ای یکنواخت جهت حسگر ستاره‌ای را ارائه دادند. در فرآیند یکنواخت‌سازی، انتخاب کاتالوگ مناسب، تعیین قدر نوری حداقل مطلوب و حذف ستارگان دوتایی از جمله مراحل کلیدی هستند. برای رفع چالش‌های خوشه‌بندی، از مثلث‌بندی دلونی و تعیین چگالی داده‌های پراکنده با استفاده از نمودار ورنونوی بهره گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان می‌دهد که این روش، احتمال مشاهده تعداد زیادی ستاره در میدان‌های دید مختلف را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد، در حالی که تنها به‌طور جزئی میدان دید لازم برای مشاهده حداقل تعداد ستاره موردنیاز برای شناسایی را افزایش می‌دهد.

مقتدایی‌راد و همکاران [۱۲] در پژوهش خود ترکیب حسگر ستاره‌ای و حسگر افق را به‌منظور بهبود تعیین وضعیت در چارچوب n و افزایش

شرح مسئله

ستاره متحرک باشد. همچنین مقادیر روشنایی به یک محدوده استاندارد (مثلاً از ۰ تا ۱) تبدیل می‌شود تا امکان مقایسه فراهم شود. برای شناسایی نواحی تاریک، می‌توان یک مقدار آستانه تعیین کرد. پیکسل‌هایی که مقدار روشنایی آن‌ها پایین‌تر از این آستانه باشد، به‌عنوان نقاط تاریک در نظر گرفته می‌شوند. در پژوهش حاضر این آستانه برابر با $0/2$ به‌طور علمی به‌عنوان نتیجه تجربی از آزمایش‌های مختلف بر روی تصاویر و شرایط مختلف داده‌ها تنظیم شده است در نظر گرفته شده است. نقاط نورانی تصویر که بیانگر وجود ستاره‌ها هستند، به‌صورت یک به یک رسم می‌شوند و جهت ترسیم ستارگان، تمامی نقاط روشن در یک ماتریس ذخیره می‌گردد. این امر می‌تواند منجر به کاهش چشمگیری در حجم محاسبات الگوریتم موقعیت‌یابی شود.

در این پژوهش از الگوی الگوریتم ژنتیک در فرایند بهینه‌سازی بهره گرفته شود که یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در حوزه محاسبات تکاملی است [۴۶]. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده در شکل ۱ آورده شده است. طبق این فلوجارت، ابزارها در دو دسته سریع و کند به‌ترتیب با نام‌های F1 تا F8 بر اساس تابع برازش موجود در الگوریتم ژنتیک بر پیکسل‌های عکس ورودی اعمال می‌گردد. در تشخیص ستاره در عکس ورودی، نقاط پر نور (شدت نور بالاتر) به‌عنوان ستارگان شاخص در نظر گرفته می‌شود که به شکل دوایر یا نقاط قرمز رنگ در شکل ترسیم می‌گردند که در ادامه با تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی ابزارها به شرح زیر می‌باشد:

- F1: بررسی تعیین ستارگان شاخص در عکس بر اساس پیوستگی و شدت روشنایی بالای پیکسل‌های آن‌ها.
- F2: بررسی متوسط روشنایی (میزان سفید بودن رنگ پیکسل‌ها که در بازه صفر تا ۲۵۵ تعریف می‌گردد) عکس اولیه گرفته شده (عکسی که باید موقعیت آن مشخص گردد) با عکس موجود (عکس تولید شده بر اساس کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک)

$$F2 = \frac{1}{m \cdot n} \left| \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{ij}^i - P_{ij}^0) \right| \quad (1)$$

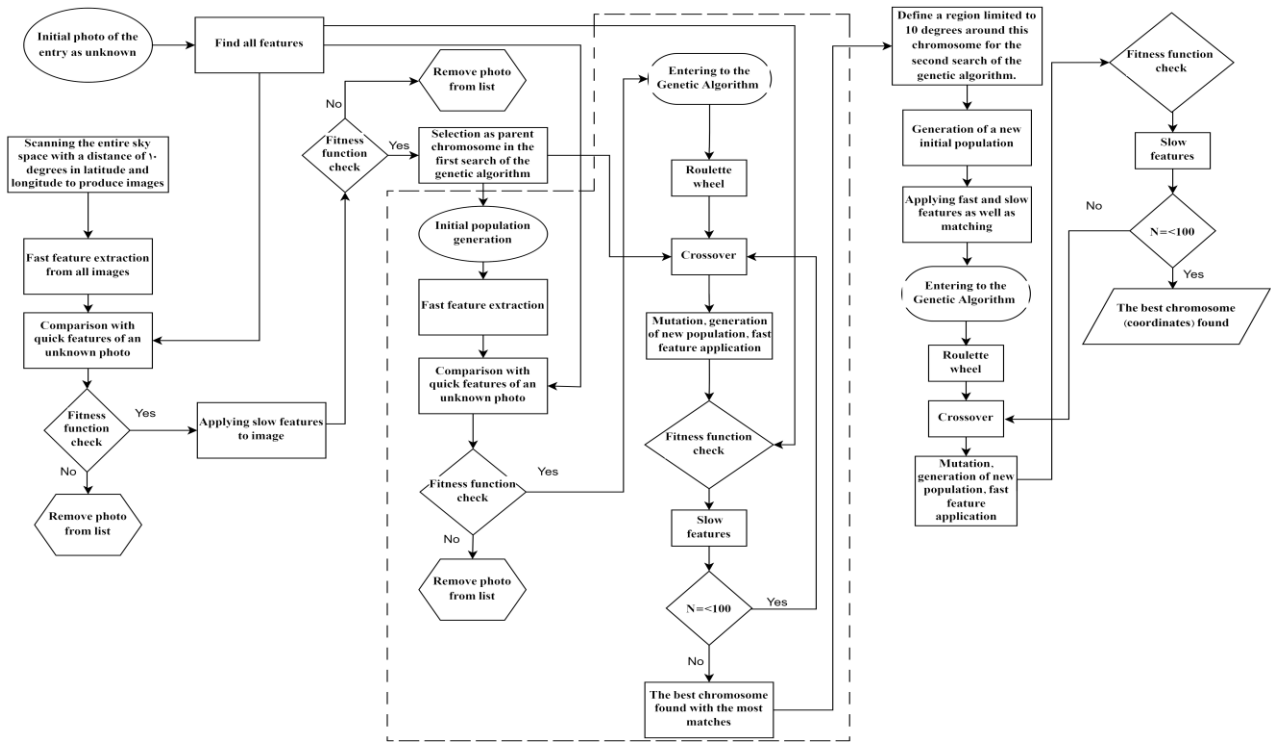
که در آن یک P_{ij}^i و P_{ij}^0 ماتریس‌های $m \times n$ از مقدار عددی روشنایی پیکسل‌های تصویر هستند، که برای عکس اولیه P_{ij}^0 و عکس موجود P_{ij}^i تعریف شده است.

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از راه‌کار تلفیقی مبتنی بر هوش مصنوعی و پردازش تصویر، الگوریتمی توسعه داده شود که با وارد کردن زمان، موقعیت (طول و عرض جغرافیایی) هر تصویر سماوی رصد شده توسط حسگر ستاره‌ای سامانه متحرک که به آن داده می‌شود را مشخص نماید. روش پیشنهادی قادر خواهد بود کل سطح زمین را پوشش دهد اما با توجه به این واقعیت که هر درجه از عرض یا طول جغرافیایی حدود ۱۱۱ کیلومتر طول بر روی سطح زمین دارند، می‌توان با درون‌یابی در میان این درجات به دقت مناسبی دست یافت. در اولین قدم، به تعریف ویژگی‌های^۱ مناسبی از تصاویر ستارگان که شامل متغیرهای اصلی جهت پردازش تصویر در راستای به‌کارگیری در مفاهیم بینایی ماشین است، پرداخته می‌شود. باید توجه داشت این ویژگی‌ها نسبت به تغییر زاویه تصویر مقاوم باشند و جزء الزامات این کار بوده تا بتوان با استفاده از آن‌ها، اثر چرخش 360 درجه‌ای زاویه دید (چرخش ناظر ساکن بر زمین که به آسمان با زاویه دید 90 درجه (خط ندیر) حول محور جسمی خود نگاه می‌کند)، به‌عنوان یکی از متغیرهای اساسی مسئله، حذف گردد. بنابراین، تنها شرط و الزام در استفاده از روش پیشنهادی، در اختیار داشتن تصاویر ستارگان در امتداد خط ندیر است.

روش حل مسئله

در این تحقیق از یک کد متلب با عنوان اسکای‌مپ و به‌صورت یک تابع^۲ جهت شبیه‌سازی آسمان به‌کارگرفته، استفاده شده است که با گرفتن مقادیر ورودی از موقعیت جغرافیایی، تاریخ و ساعت محلی و همچنین اختلاف ساعت محلی با ساعت جهانی، یک تصویر سماوی بر پایه پایگاه داده خود، ترسیم می‌کند. کد اسکای‌مپ مجموعه‌ای تخصصی از توابع و اسکریپت‌های متلب است که برای تجزیه و تحلیل نقشه‌های آسمان نجومی طراحی شده است. این نقشه‌ها به‌صورت بصری توزیع اجرام یا پدیده‌های آسمانی را در سراسر کره آسمانی نشان می‌دهند. نقشه آسمان، مختصات آسمانی را با استفاده از مختصات کروی تجسم می‌کند [۴۵].

در هنگام تشخیص نقاط نورانی به‌عنوان ستاره در عکس، بعضی از نقاط کم نور که نشانه‌ای از فاصله دورتر آن ستارگان هستند، به‌عنوان ناحیه سیاه رنگ در عکس لحاظ می‌شود. ابتدا، تصویر سماوی منطقه بالای سر متحرک تهیه و بارگذاری می‌کنیم. این تصویر باید نمایانگر تغییرات روشنایی در منطقه میدان دید حسگر



شکل ۱- فلوجارت الگوریتم بهینه سازی استفاده شده در پژوهش حاضر.

Fig. 1. Flowchart of the optimization algorithm used in the present study.

خاص داده ها و اهداف پردازش تصویر انتخاب می شوند. این طبقه بندی به طور خاص می تواند برای تقسیم بندی روشنایی پیکسل ها در یک تصویر به دسته های مختلف کاربرد داشته باشد. در بسیاری از تصاویر دیجیتال، شدت روشنایی پیکسل ها از ۰ تا ۲۵۵ در مقیاس ۸ بیتی خاکستری است. در این مقیاس، عدد صفر نشان دهنده سیاه ترین مقدار و عدد ۲۵۵ نشان دهنده سفیدترین مقدار است. بنابراین، دسته بندی هایی که در بازه های مختلف قرار می گیرند معمولاً به این دلیل است که دسته های خاصی از روشنایی که حائز اهمیت هستند، شناسایی شوند.

• F6: مقایسه شدت فرکانس تصاویر بعد از تبدیل فوریه جهت تبدیل عکس از حوزه فضایی به حوزه فرکانس از رابطه فوریه زیر استفاده می شود:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j 2\pi (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (۴)$$

که در آن، $F(u, v)$ عکس تبدیل شده به فضای u و v ، $f(x, y)$ عکس اصلی در فضای x و y و با ابعاد M و N می باشند.

• F3: اختلاف متوسط شعاع ستارگان شاخص تشخیص داده شده بر حسب مقدار پیکسل. اگر تعداد ستارگان شاخص یافته شده برابر با n و شعاع هر کدام r_i باشد، برای اندازه گیری شعاع متوسط این ستارگان داریم:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (۲)$$

• F4: متوسط فاصله ستارگان شاخص یافته شده (با مرکزیت x_i و y_i در واحد پیکسل) تا مرکز عکس (x_c و y_c در واحد پیکسل) است که از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$F4 = d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (۳)$$

• F5: مقایسه روشنایی طبقه بندی شده پیکسل های متفاوت. بازه پیکسل ها به صورت شش دسته، به صورت $(Pix > 225)$ ، $(150 < Pix < 200)$ ، $(200 < Pix < 225)$ ، $(100 < Pix < 175)$ ، $(125 < Pix < 150)$ و $(Pix < 175)$ دسته بندی می شوند. اعدادی که در این طبقه بندی برای میزان روشنایی پیکسل ها (Pix) انتخاب شده اند، به طور عمدتاً تصمیم گیری های تجربی و یا بسته به ویژگی های

ساعت ۳:۳۰+، در تاریخ ۳ ژوئن ۲۰۲۴، در ساعت 00:00:00، تابع اسکای مپ اصلاح شده فراخوانی می‌گردد. در پژوهش حاضر از سیستمی با مشخصات سخت افزاری Corei7 با سرعت هسته ۲/۲ گیگاهرتز و ۶۴ بیت استفاده شده است. زاویه میدان دید در نقشه آسمان به وسعت زاویه‌ای خاصی از رصد منطقه سماوی اشاره دارد که در آن زمان خاص در بالای سر متحرک بوده است. در پژوهش حاضر این زاویه طبق مقدار پیش فرض خود تابع برابر با ۱۰ درجه در نظر گرفته شده است.

در این پژوهش، فرض بر آن است که جهت‌گیری دوربین در راستای عمودی و در امتداد خط نذیر است. در این حالت تصویر آسمان مستقیماً بالای مکان تصویربرداری ثبت شده و تطبیق با پایگاه داده ستارگان بهینه خواهد بود. در صورت انحراف زاویه دوربین از حالت قائم، مرکز تصویر با موقعیت مکانی ناظر فاصله پیدا کرده و دقت الگوریتم کاهش می‌یابد، مگر آنکه وضعیت فضایی دوربین به صورت دقیق اندازه‌گیری و در فرآیند اصلاح تصویر لحاظ گردد. جدول ۱ شامل کلیه پارامترهای مرتبط با زمان، مکان، ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی، مشخصات تصاویر، و محدودیت‌های عملیاتی است که در طراحی و اجرای الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- پیش‌فرض‌های عددی مورد استفاده در شبیه‌سازی.

Table 1. Assumptions used in the simulation.

Parameter	Value	Description
Initial Longitude	51.5320	Approximate location of Milad Tower, Tehran
Initial Latitude	35.7448	Approximate location of Milad Tower, Tehran
UTC Time Offset	+3:30	Iran Time Zone
Imaging Date & Time	3 June 2024, 00:00:00	Imaging moment for position determination
Field of View Angle	10 degrees	Default angle of MATLAB's skymap function
Circular Image Region Radius	350 pixels	Visible region for feature extraction
Normalized Brightness Threshold	0.2	For noise removal and dark region elimination
Apparent Magnitude Limit	$m \leq 6$	To reduce star identification error
Number of Chromosomes	1000	For initial position search
Number of Generations	100	For convergence to optimal position
Initial Search Range	10 degrees	Longitude and latitude scanned in 10° steps
scanned in 10° steps Constraint	± 5 degrees	Around the final candidate point

F7: جهت تسهیل در بررسی عکس گرفته شده از فضای آسمان، کل فضای عکس به پنج ناحیه حلقوی تقسیم می‌گردد که در بخش آتی شرایط آن مفصل بیان شده است. جهت مقایسه تعداد پیکسل‌های روشن و بهم پیوسته موجود در این پنج حلقه از تصویر مجهول با پنج حلقه معادل در تصویر موجود از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$F7 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Pix_i - Pix_0| \quad (5)$$

F8: برای مقایسه متوسط روشنایی غیر صفر ستارگان (یعنی روشنایی تصویر بدون در نظر گرفتن پیکسل‌های کاملاً سیاه که دارای مقدار عددی صفر می‌باشند) موجود در پنج حلقه تصویر مجهول با حلقه‌های معادل در تصویر معلوم، رابطه زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

$$F8 = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 |B_j^i - B_j^0| \quad (6)$$

که در آن B بیانگر شدت روشنایی پیکسل، بالانویس i مربوط به عکس اولیه (مجهول‌المکان) و بالانویس صفر مربوط به عکس موجود (با مشخصات معلوم) است.

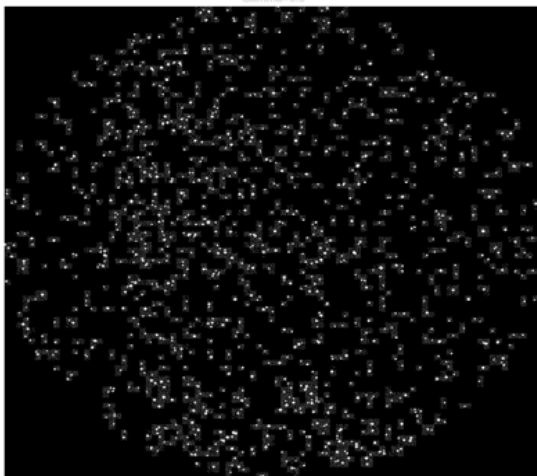
با توجه به ماهیت تصاویر ستارگان، لازم است آستانه‌ای برای تمایز میان پیکسل‌های روشن واقعی (نماینده ستاره‌ها) و نویز یا پیکسل‌های کم‌نور تعریف شود. در این پژوهش، آستانه‌ی روشنایی پیکسل‌ها به صورت نرمال شده برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است. این مقدار معادل با حدود ۲۳۰ از ۲۵۵ در مقیاس ۸ بیتی تصویر خاکستری بوده و به صورت تجربی از تحلیل تصاویر واقعی استخراج شده است. برای تطابق بهتر با استانداردهای نجومی، این آستانه روشنایی متناظر با ستارگانی با قدر ظاهری کمتر از یا برابر با ۶ ($m \leq 6$) در نظر گرفته شده است. این محدوده شامل ستارگانی است که در شرایط معمول آسمان شب با چشم غیرمسلح قابل مشاهده هستند و در اغلب کاتالوگ‌های ستاره‌ای (مانند Gaia یا Hipparcos) به طور دقیق ثبت شده‌اند. لذا در این پژوهش تنها ستارگان روشن‌تر از این آستانه جهت استخراج ویژگی و تخمین موقعیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که موجب کاهش خطا در پردازش تصویر و افزایش پایداری الگوریتم شناسایی می‌گردد.

اعتبارسنجی

یک تصویر پیش‌پردازش شده از ستارگان جهت فراخوانی در تابع اسکای مپ در شکل ۲ نشان داده شده است. برای موقعیت جغرافیایی برج میلاد تهران (با طول جغرافیایی $51^\circ 37' 53.30''$ و عرض جغرافیایی $35^\circ 44' 43.2''$ اختلاف

همچنین دیده می‌شود که در سایر سطوح روشنایی (به جز سطوح بالای ۲۳۰ که به معنی روشنایی زیاد پیکسل است) نیز دارای تعدادی پیکسل است که می‌توان جهت بررسی سریع‌تر، دقیق‌تر و ساده‌تر تصویر جهت استخراج ویژگی‌ها، از آن‌ها صرف‌نظر نمود. با استفاده از فیلتر گاما (با گامای برابر با ۳) می‌توان این نواحی با سطوح روشنایی آلوده کننده تصویر ستارگان را طبق شکل ۴ بهتر مشاهده نمود.

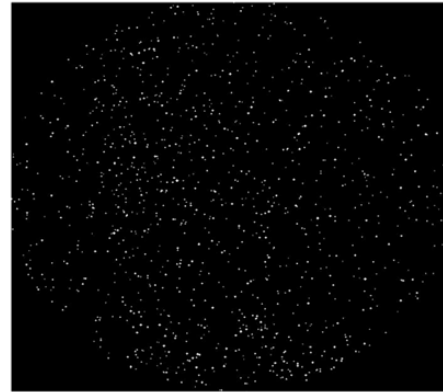
در این پژوهش، منظور از "نویز" نه نویزهای مرسوم ناشی از سنسور دوربین، شرایط نوری محیط، یا عوامل جوی است، بلکه به نقاط نوری ناخواسته یا ستارگان بسیار کم‌نور و دور اشاره دارد که ممکن است در فرآیند شناسایی ستارگان دچار تداخل شوند. این فیلترسازی، با هدف افزایش دقت در استخراج ویژگی‌های ستارگان اصلی انجام شده و به‌گونه‌ای طراحی شده که ستارگان با قدر ظاهری معقول حفظ و منابع نوری مزاحم حذف شوند. در این تحقیق، بررسی و مدل‌سازی نویزهای فیزیکی مربوط به فرآیند تصویربرداری (نظیر نویز سنسور یا نویز جو) در دامنه‌ی پژوهش قرار نداشته است.



شکل ۴- استفاده از فیلتر گاما (گاما ۳) جهت مشاهده بهتر پیکسل‌های روشن (مدت زمان سپری شده برابر با ۲/۰۶۵۹۱۵ ثانیه می‌باشد).

Fig. 4. Using a gamma filter (gamma 3) to enhance the visibility of bright pixels (the elapsed time is equal to 2.065915 seconds).

یک راه حل برای حذف این نوع نویز، استفاده از فیلترهایی است که در حوزه فرکانس بر روی تصویر اعمال می‌شوند. در این حوزه، فرکانس‌های پایین مربوط به مناطق صاف و فرکانس‌های بالا نشان دهنده لبه‌ها و نویز هستند. برای تجزیه و تحلیل یک تصویر در حوزه فرکانس، از تبدیل فوریه، به ویژه تبدیل فوریه سریع استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا از ماتریس تصویر تبدیل فوریه گرفته می‌شود تا فرکانس‌های موجود درون تصویر استخراج گردد (رابطه ۴)، شکل ۵ نمایشی از آن است.

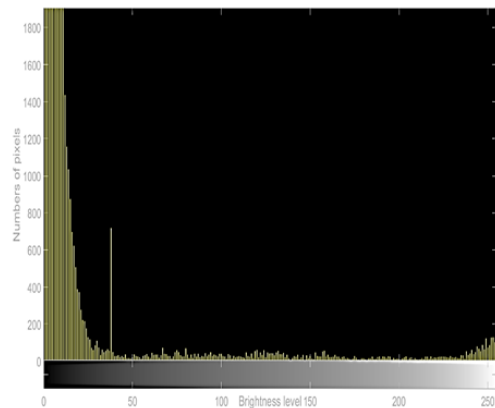


شکل ۲- تصویر پیش‌پردازش شده از ستارگان (به صورت دایره‌ای با شعاع ۳۵۰ پیکسل) در امتداد خط ندیر در موقعیت برج میلاد (مدت زمان سپری شده برابر با ۱۴/۱۵۲۳۰۳ ثانیه می‌باشد).

Fig. 2. The preprocessed image of stars (circular with a radius of 350 pixels) along the nadir line at the Milad Tower location (the elapsed time is equal to 152303.14 seconds).

در روش پیشنهادی این پژوهش، موقعیت جغرافیایی با دقتی در حدود ۰/۰۱ درجه در طول و عرض جغرافیایی تخمین زده می‌شود. با توجه به اینکه هر درجه جغرافیایی معادل حدود ۱۱۱ کیلومتر بر سطح زمین است، این مقدار معادل تقریباً ۱۱۱۰ متر دقت مکانی می‌باشد. این دقت از طریق مقایسه دقیق ویژگی‌های استخراج شده از تصاویر ستارگان و تصاویر سنتز شده در پایگاه داده و بهینه‌سازی براساس الگوریتم ژنتیک حاصل شده است. بنابراین، موقعیت نهایی با دقتی در حد ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ متر قابل تعیین می‌باشد، که برای بسیاری از کاربردهای ناوبری مبتنی بر بینایی ماشین مناسب و قابل قبول است.

تحلیل هیستوگرام تصویر مذکور (شکل ۲) در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به هیستوگرام گرفته شده از تصویر، دیده می‌شود که تعداد بسیار زیادی از پیکسل‌های آن دارای سطح روشنایی کمتر از ۱۰ هستند که به معنی وجود ۴۷۱۹۱۸ پیکسل (حدود ۹۶ درصد از تصویر) بسیار تیره هستند.

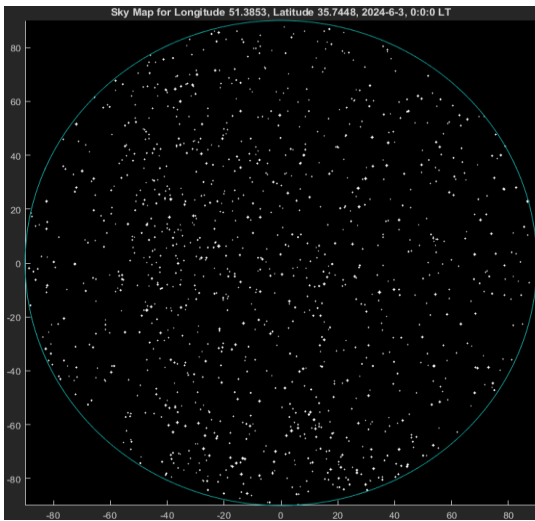


شکل ۳- تحلیل هیستوگرام اولین تصویر به دست آمده از عکس مجهول مکان.

Fig. 3. Histogram analysis of the first obtained image from the unknown location photograph.

در جایگاه برخی ستارگان شد. چنانچه از نقطه‌ای با فاصله ۰/۰۱ درجه طول جغرافیایی از برج میلاد در همان تاریخ و ساعت به آسمان نگاه شود. با این حساب با این بررسی اولیه بر پایه مشاهدات چشم غیر مسلح می‌توان اظهار نمود که در این نقطه، دقت سنتز تصاویر ستارگان معادل با ۰/۰۱ درجه مختصات جغرافیایی (تقریباً معادل با ۱۱۱۰ متر) خواهد بود.

به‌منظور پیاده‌سازی فرآیند پردازش تصاویر، در ابتدا لازم است که تصویر خاکستری^۱ مناسبی (که تنها شامل نمایشی از ستارگان باشد) تولید شود. شکل ۸، نمایشی از چنین تصویری است که بر روی شکل ۷ پیاده‌سازی شده است.



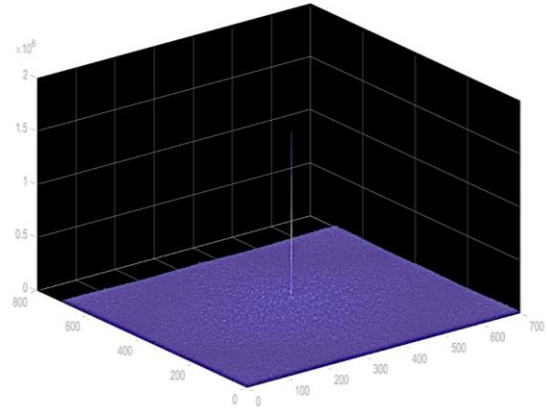
شکل ۷- تصویر سنتز شده از موقعیت ستارگان برای 00:00:00 تاریخ ۳ ژوئن ۲۰۲۴ در فاصله یک صدم درجه طول جغرافیایی از برج میلاد.

Fig. 7. Synthesized image of the position of the stars for 00:00:00 on June 3, 2024, at a distance of one-hundredth of a degree of longitude from Milad Tower.



شکل ۸- تصویر خاکستری و پاک‌سازی شده شکل ۷.

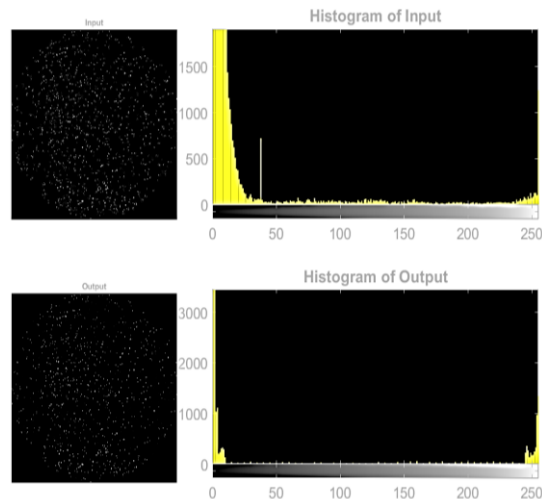
Fig. 8. Grayscale and cleaned image of Figure 7.



شکل ۵- نمایش حوزه فرکانس از عکس اصلی با استفاده از تبدیل فوری (مدت زمان اجرای کد برابر است با ۰/۱۳۲۰۳۲ ثانیه).

Fig. 5. Frequency domain representation of the original image using the Fourier transform (code execution time is 0.132032 seconds).

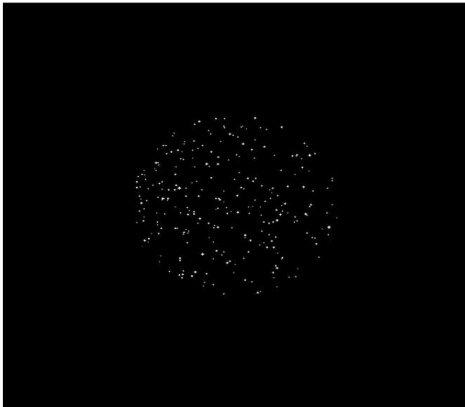
همان‌طور که دیده می‌شود، تغییرات فرکانس این تصویر بسیار قوی بوده و تنها در بازه‌ای محدود اتفاق می‌افتد. این امر، امکان اعمال فیلترهای مختلف موجود (بالاگذر، پایین‌گذر و ...) را بر روی این تصویر جهت ارتقا کیفیت آن به‌منظور پردازش تصویر مطلوب مورد نظر بلااستفاده می‌سازد. بنابراین، برای حذف این پیکسل‌ها از تصویر، از یک فیلتر در حوزه زمان استفاده شده است که نتیجه آن در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶- استفاده از فیلتر حوزه زمان (مدت زمان سپری شده برابر با ۰/۵۳۹۷۲۱ ثانیه می‌باشد).

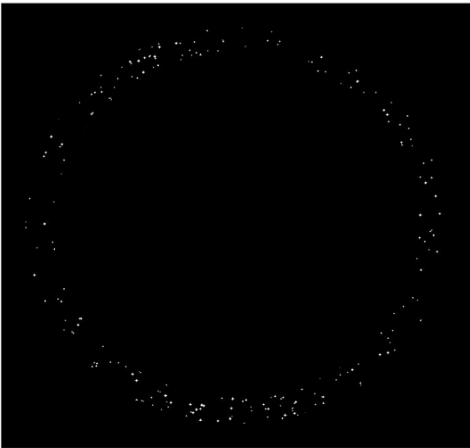
Fig. 6. Using the time domain filter (the elapsed time is 0.539721 seconds).

بر اساس بررسی اولیه مشخص می‌شود که با اعمال تغییراتی به اندازه ۰/۰۱ درجه در طول یا عرض جغرافیایی، می‌توان شاهد تغییرات بسیار جزئی



شکل ۱۱- ناحیه دایره مرکزی از شکل مجهول‌المکان با شعاع خارجی ۱۵۷ پیکسل.

Fig. 11. The central circular region of the spatially unknown shape with an outer radius of 157 pixels.



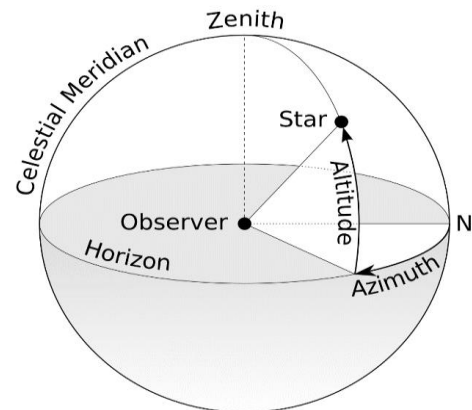
شکل ۱۲- ناحیه دایره مرکزی از شکل مجهول‌المکان با شعاع خارجی ۳۱۴ پیکسل.

Fig. 12. The central circular region of the spatially unknown shape with an outer radius of 314 pixels.



شکل ۱۳- ناحیه دایره مرکزی از شکل مجهول‌المکان با شعاع خارجی ۲۷۲ پیکسل.

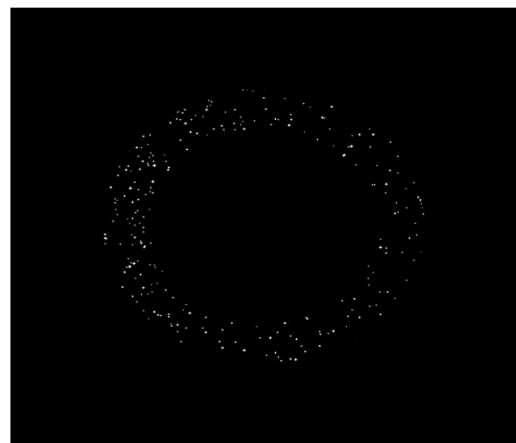
Fig. 13. The central circular region of the spatially unknown shape with an outer radius of 272 pixels.



شکل ۹- تعریف زوایای زینت و آزیموت [۴۷].

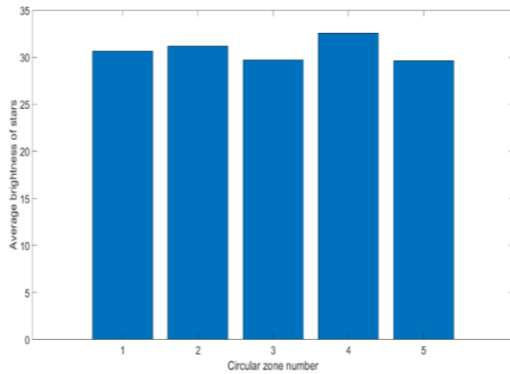
Fig. 9. Definition of zenith and azimuth angles [47].

با توجه به تاثیر زاویه آزیموت به روش اشاره شده در مرجع [۹]، تصویر ورودی شکل ۸ به نواحی دایره‌ای شکل مختلف با مساحت یکسان تفکیک می‌گردد که این نواحی تفکیک شده به ترتیب در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۵، نمونه‌ای از ویژگی‌های مناسب قابل استخراج از این نواحی است. تقسیم تصویر اصلی شکل ۸ به پنج ناحیه دایره‌ای که با مساحت‌های برابر و شعاع‌های خارجی به ترتیب ۱۵۷، ۲۲۲، ۲۷۲، ۳۱۴ و ۳۵۰ پیکسل می‌باشد و کل زمان سپری شده برابر است با ۱۲/۷۱۹۱۳ ثانیه. در این شکل میانگین شدت روشنایی پیکسل‌ها در نواحی دایره‌ای ارائه شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ نشان داده شده است.



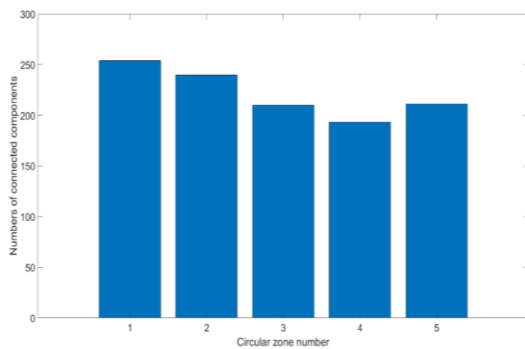
شکل ۱۰- ناحیه دایره مرکزی از شکل مجهول‌المکان با شعاع خارجی ۲۲۲ پیکسل.

Fig. 10. The central circular region of the spatially unknown shape with an outer radius of 222 pixels.



شکل ۱۵ - میانگین حسابی شدت روشنایی پیکسل‌ها در نواحی دایره‌ای ارایه شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ (مدت زمان سپری شده برابر است با ۰/۱۵۸۰۰۸ ثانیه).

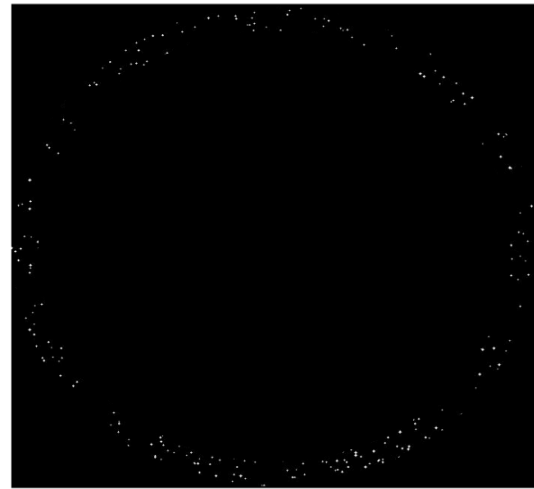
Fig. 15. Arithmetic mean of pixel brightness in the circular areas presented in Figures 10 to 14 (elapsed time is 0.158008 seconds).



شکل ۱۶ - تعداد ستارگان (نواحی روشن یکپارچه) شمرده شده در هر ناحیه از نواحی پنج گانه تصویر (مدت زمان سپری شده برابر است با ۰/۸۳۷۱۷۸ ثانیه).

Fig. 16. Number of stars (solid bright areas) counted in each of the five image regions (elapsed time is 0.837178 seconds).

یکی دیگر از موارد قابل بررسی پیدا کردن ستاره‌های درخشان جهت تشخیص الگوهای ستاره‌ای می‌باشد. جهت یافتن اندازه و محل قرارگرفتن ستاره‌های درخشان (و یا الگوهایی شاخص) در میان پیکسل‌های تصویر طبق شکل ۱۷ نقاط قرمز رنگ مشخص می‌گردد. نقاط قرمز یافته شده در این تصویر (محل و اندازه آن‌ها)، بسیار حساس به تغییر طول و عرض جغرافیایی هستند به طوری که عموماً با تغییر حدوداً ۰/۰۰۱ در طول یا عرض جغرافیایی دچار تغییر می‌شوند. بنابراین از این ویژگی‌ها می‌توان جهت یافتن دقیق موقعیت تصویر استفاده کرد. طبق جدول ۲، موقعیت نقاط قرمز رنگ موجود در شکل ۱۷ همراه با شعاع آن‌ها نسبت به مرکز تصویر محاسبه شده است. در این حالت می‌توان الگوهای شاخص و موجود را طبق ستارگان پر نور استخراج و با کاتالوگ‌های موجود معتبر نظیر Gaia و Hipercos مقایسه نمود.



شکل ۱۴ - ناحیه دایره مرکزی از شکل مجهول‌المکان با شعاع خارجی ۳۵۰ پیکسل.

Fig. 14. The central circular region of the spatially unknown shape with an outer radius of 350 pixels.

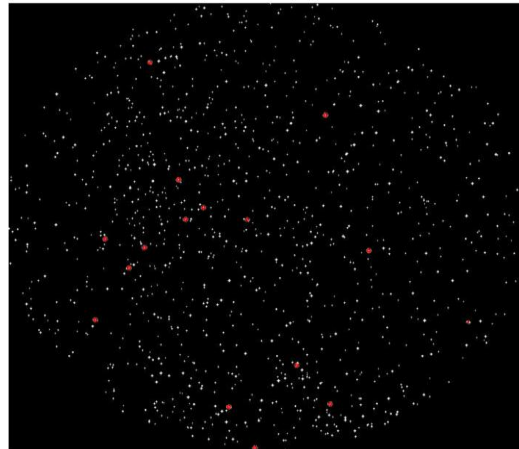
از آنجا که هر تصویر خاکستری عملاً ماتریسی دو بعدی از اعداد حقیقی میان صفر (برای یک پیکسل سیاه رنگ) تا ۲۵۵ (برای یک پیکسل سفید رنگ) می‌باشد، برای تعریف هر ویژگی از تابعی که بر پایه محاسبات عددی بر روی این مجموعه اعداد تعریف شده‌اند، استفاده می‌گردد. چنانچه یک ویژگی از نواحی نشان داده شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ را به صورت میانگین حسابی روشنایی این پیکسل‌ها به ازاء تعداد پیکسل‌های هر ناحیه تعریف شود، شکل ۱۵ برای این کمیت در پنج ناحیه دایره‌ای تعریف شده به دست می‌آید. این استخراج ویژگی، هم در حوزه مکانی (یعنی کار کردن بر روی مقادیر عددی پیکسل‌های تصویر خاکستری، مشابه نمونه مثال زده شده در بالا) و هم در حوزه فرکانس (نگاشت مقادیر پیکسل‌ها از حوزه مکان به حوزه فرکانس با استفاده از روش تبدیل فوریه) قابل تعریف خواهد بود. این میانگین برای کل تصویر نمونه مورد بررسی ۳۳/۸۱ محاسبه شده است. تعداد ستارگان (نواحی روشن یکپارچه) شمرده شده در هر ناحیه از نواحی پنج‌گانه تصویر نمونه، در شکل ۱۶ آورده شده است. این تعداد برای کل تصویر ۱۱۱۹ عدد محاسبه شده است.

طبق بررسی انجام شده، دو فیچر اخیر، با تغییر حدوداً ۱ درجه در طول و عرض جغرافیایی، به واسطه آن که میزان تغییراتی که در تصویر سنتز شده ایجاد می‌شود زیاد نیست، تغییر زیادی نمی‌کنند. بنابراین، با استفاده از این دو فیچر می‌توان با دقت ۱ درجه به جست‌وجوی موقعیت جغرافیایی یا محل اخذ تصویر پرداخت.

برای این مرحله از مطالعه حاضر، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌هایی از پایگاه داده تولید می‌شوند و سپس با تعریف یک تابع برازش مناسب (جهت مقایسه میزان اختلاف در مقادیر ویژگی‌های تعریف شده و محاسبه شده برای تصویری که قصد موقعیت یابی آن را داریم و تصویر سنتز شده از کروموزوم‌های مختلف یک نسل در الگوریتم ژنتیک) مورد ارزیابی قرار گیرند تا بر پایه همین نظریه به مرور با طی مسیر در نسل‌های جدیدتر کروموزوم‌های تولید شده الگوریتم ژنتیک، به موقعیتی که بیشترین تطابق با تصویر مورد بررسی را دارد، رسید.

با انتخاب مقدار تابع برازش، برای ۷۰۳ نقطه موجود به ازای هر ۱۰ درجه این مقدار تابع اعمال می‌گردد و نقاط مشکلی رنگ که با ضربدر در شکل ۱۹ نشان داده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. نقاطی که دارای تابع برازش بهتری است به‌عنوان والد‌هایی ثابت در جست‌وجوی اول انتخاب می‌شوند. در الگوریتم حاضر x_1 و x_2 به ترتیب بیانگر طول و عرض جغرافیایی هستند. در مرحله بعد مقادیر x_1 و x_2 حول طول و عرض جغرافیایی در بازه مثبت و منفی ۵ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرند و فرآیند حل وارد مرحله دوم جست‌وجو می‌گردد. این روند در مطالعه موردی حاضر تا ۱۰۰ تکرار ادامه داشته که منجر به پیدا شدن بهترین کروموزوم که همان طول و عرض جغرافیایی به‌عنوان پارامتر مجهول می‌شود. بهترین کروموزوم‌ها در شکل ۱۸ به رنگ سبز و کروموزوم نهایی به رنگ قرمز نشان داده شده است. در الگوریتم بهینه‌سازی این پژوهش کروموزوم‌ها برابر با ۱۰۰۰، احتمال تقاطع و جهش به ترتیب $0/3$ و $0/5$ برای ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است. مقدار حداقل و حداکثر برای هر متغیر مثبت و منفی طول و عرض جغرافیایی یعنی ± 90 و ± 180 درجه می‌باشد. پس از استخراج ویژگی‌های اشاره شده برای تصویر ستارگان با موقعیت مجهول در قسمت قبل، ابتدا از کل فضای آسمان با فواصل ۱۰ درجه تصاویری توسط برنامه کامپیوتری توسعه داده شده سنتز شده و فیچرهای اشاره شده برای این تصاویر نیز استخراج و با فیچرهای تصویر مجهول مقایسه شده‌اند (نقاط مشکلی رنگ). به‌منظور افزایش سرعت جست‌وجو، برای این مقایسه و همچنین سایر مقایسه‌های مربوط به این جست‌وجو، ابتدا ۶ فیچر که سرعت محاسبه بالایی دارند محاسبه شده و در صورت نزدیک بودن مقادیر این ۶ فیچر با مقادیر معادل در تصویر مجهول، سایر فیچرها با سرعت محاسبه پایین‌تری محاسبه می‌شوند. فیچرهای F1 تا F6 به‌عنوان فیچرهای سریع و فیچرهای F7 و F8 به‌عنوان فیچرهای کند در کد نامگذاری شده‌اند.

پس از اسکن کل فضا با فواصل ۱۰ درجه عرضی و طولی، مقادیر تابع برازش محاسبه شده در این نقاط (که نمایانگر میزان انحراف



شکل ۱۷- یافتن اندازه و محل قرارگرفتن ستاره‌های درخشان (مدت زمان سپری شده برابر است با ۱/۶۸۵۳۸۶ ثانیه).

Fig. 17. Finding the size and location of bright stars (the elapsed time is 1.685386 seconds).

همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، متوسط میزان روشنایی پیکسل‌های نواحی دایره‌ای مختلف این تصویر متفاوت بوده و این مقادیر می‌توانند به‌عنوان مقدار ویژگی و یا بردار ویژگی جهت به‌کارگیری در روش جست‌وجوی الگو در حوزه هوش مصنوعی، به منظور یافتن موقعیت مکانی این تصویر با تطبیق این ویژگی‌ها با مقادیر از پیش ذخیره شده در یک پایگاه داده، مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، پس از تعریف و استخراج ویژگی‌های مناسب در حوزه‌های مکان و فرکانس از تصویر ستارگان در نقطه‌ای که قصد موقعیت‌یابی آن را داریم، می‌توان با به‌کارگیری الگوریتم‌های جست‌وجوگر (مانند الگوریتم ژنتیک) موقعیت این مکان را از پایگاه داده‌ای از مقادیر یا بردارهای ویژگی از پیش تعریف شده برای کل آسمان، به‌دست آورد.

جدول ۲- موقعیت و اندازه نقاط قرمز رنگ.

Table 2. Locations and sizes of the red points.

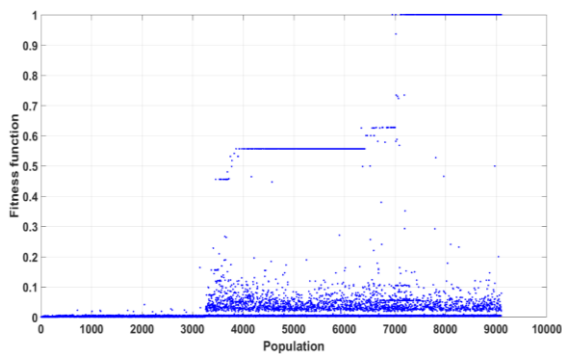
Radius	x-coordinate	y-coordinate
1.9390	118.5671	500.0000
1.9491	300.4447	637.3341
1.8885	132.0000	372.4905
1.8570	164.4444	418.0450
1.9696	185.4460	386.0000
1.7321	192.9168	94.1785
2.0000	232.0000	279.0000
1.9428	241.3427	341.5227
1.9240	265.8554	322.9447
1.6425	325.6780	341.7364
2.0000	336.0000	702.0000
1.9240	392.9438	571.6059
2.0000	432.0000	177.0000
1.8570	438.3676	632.6324
1.9094	490.9718	390.8256
1.0000	626.0000	503.5668

جدول ۳- نتایج اجرای مجزا از الگوریتم ژنتیک برای تصویر آسمان برج میلاد.

Table 3. Results of different runs of the genetic algorithm for sky image above the Milad Tower.

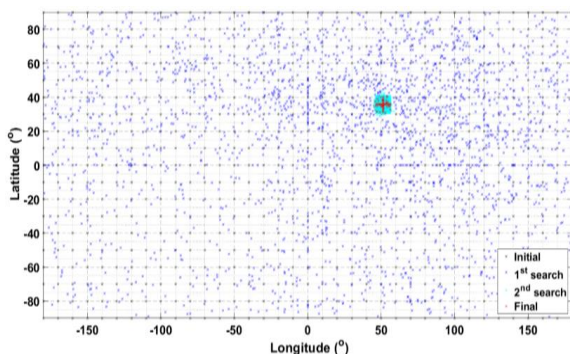
Iteration	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)
First	51.3671	35.7430
Second	51.3665	35.7426
Third	51.3679	35.7434
Average	51.3672	35.7430
Standard Deviation	0.0007	0.0004

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین اختلاف میان سه مقدار خروجی الگوریتم کمتر از ۰.۰۰۱ درجه در هر دو بعد جغرافیایی است. این مقدار تقریباً معادل با ۷۰ تا ۱۱۰ متر خطا بر روی سطح زمین بوده و نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم با وجود ماهیت تصادفی آن می‌باشد. همچنین انحراف معیار ناچیز این سه مقدار، بیانگر پایداری الگوریتم در تخمین موقعیت است.



شکل ۱۸- مقادیر تابع برازش به ازای تولید جمعیت برای عکس مجهول‌المکان اولیه با طول و عرض به ترتیب ۵۱/۳۷۵۳۲۰ و ۳۱/۷۴۴۸۴۳

Fig. 18. The values of the fitting function for population generation for the initial location-independent image with length and width of 375320.51 and 744843.31, respectively.



شکل ۱۹- یافتن کروموزوم‌های بهینه به معنای پیدا کردن طول و عرض جغرافیایی برای عکس اولیه مجهول‌المکان.

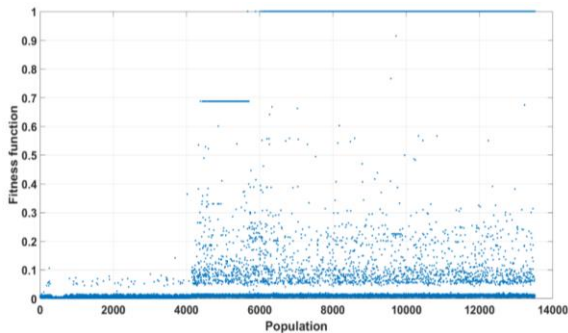
Fig. 19. Finding optimal chromosomes means finding the longitude and latitude for the initial image of an unknown location.

فیچرهای تصاویر سنتز شده در این نقاط با تصویر مجهول است) مورد بررسی قرار گرفته و از میان آنها نقاطی که تطابق مناسب‌تری با تصویر مجهول‌المکان داشته‌اند انتخاب شده‌اند. از این نقاط به صورت کروموزوم‌های والد در هر مرحله از تولید نسل در مراجعه اول از جست‌وجو بوسیله الگوریتم (نقاط آبی در شکل ۱۸) استفاده شده است و بدین‌صورت این مرحله از جست‌وجو بیشتر در اطراف این نقاط انتخابی اتفاق می‌افتد. پس از نزدیک شدن بهترین جست‌وجوی الگوریتم ژنتیک به ناحیه‌ای که بیشترین تطابق را با تصویر مجهول دارد (بر اساس مقادیر فیتنس فانکشن یا همان تابع برازش) مرحله اول جست‌وجو پایان یافته و بهترین نقطه به‌عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک در جست‌وجوی دوم انتخاب می‌شود. در مرحله دوم جست‌وجو، بازه جست‌وجو به صورت ۱۰ درجه حول طول و عرض جغرافیایی محدود می‌گردد.

در نتیجه، مثبت و منفی ۵ درجه طولی و عرضی حول این نقطه محدود شده و بدین‌صورت جست‌وجوی دقیق‌تری در این ناحیه انجام می‌شود که به‌صورت نقاط فسفری رنگ در شکل ۱۹ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آخرین نسل این روش جست‌وجو (نقاط قرمز) کاملاً اطراف نقطه مجهول متمرکز شده‌اند. بدین‌صورت با دقتی در حد ۱ هزارم درجه می‌توان به موقعیت‌یابی با استفاده از تصاویر ستارگان پرداخت. جست‌وجو برای عکس آسمان بالای برج میلاد تهران که در شکل ۲ بیان شده بود، ارائه شده است. طبق شکل ۱۹، مختصات به‌دست آمده برابر است با ۳۵/۷۴۳۰ و ۵۱/۳۶۷۱.

در این پژوهش، الگوریتم ژنتیک به‌صورت کاملاً سری (sequential) پیاده‌سازی شده و در پیاده‌سازی آن از ساختارهای موازی‌سازی استفاده نشده است. همچنین سیستم پردازشی به‌کاررفته دارای پردازنده Intel Core i7 با فرکانس 2.2 GHz و حافظه 16 GB بوده که توان محاسباتی محدودی نسبت به پردازش‌های سنگین تصویری دارد. به‌ازاء پردازش یک هسته CPU با توان محاسباتی ۲.۲ گیگاهرتز، میانگین زمان محاسبه برای هر کروموزوم بین ۱ تا ۲ ساعت به‌ازای هر هسته می‌باشد. با در نظر گرفتن جمعیت ۱۰۰۰ کروموزومی و ۱۰۰ نسل تکرار جمعیت‌ها، با استفاده از پردازش موازی بر روی هسته‌های زیاد کارت‌های گرافیکی، بسته به تعداد هسته‌ها، می‌توان به موقعیت‌یابی در زمانی مناسب دست یافت.

به‌منظور بررسی میزان پایداری الگوریتم ژنتیک در موقعیت‌یابی تصویر آسمان، سه مرتبه اجرای مجزا از الگوریتم برای همان تصویر انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از این سه اجرا در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۲۱- تولید نسل‌های متوالی بر اساس تابع برازش برای تصویر نامتقارن.

Fig. 21. Generation of successive generations based on the fitting function for a asymmetrical image.

تاثیر چرخش تصویر حول محور مرکزی خود

یکی از نکات حائز اهمیت در پیدا کردن مختصات در پژوهش حاضر، حساسیت الگوریتم پیشنهادی نسبت به چرخش تصویر است. این اثر با ایجاد تغییرات قابل توجه در موقعیت ستارگان، می‌تواند نمایانگر اثراتی همچون نویز و خطاهای سیستم اپتیکی نیز باشد. فرض کنید حسگر متحرک رو به آسمان عکسی می‌گیرد که مجهول‌المان است. یعنی ناظر متحرک مختصات مکانی خود را نمی‌داند. در همان موقعیت مجهول، ناظری دیگر رو به آسمان عکسی دیگر اما با زاویه دید چرخیده نسبت به ناظر اول را می‌گیرد. لذا دو عکس متفاوت اما با مختصات یکسان داریم موجود است. در شکل ۲۳ عکسی با مختصات جغرافیایی ۱ و ۱ به‌عنوان نمونه اولیه گرفته شده است. این شکل حول مرکز به اندازه ۱۸۰ درجه دوران داده شده و مطابق با شکل ۲۵ به تصویری جدید از آسمان رسیده شده است. در این جست‌وجو هدف یافتن دقت موقعیت‌یابی روش پیشنهادی برای تصاویر چرخش یافته است.

جمعیت‌های تولید شده متوالی و تابع برازش مربوط به آنها در شکل ۲۵ آورده شده‌اند. با تولید جمعیت‌های متوالی مقدار تابع برازش به مقدار یک که نشان‌دهنده مقدار ماکزیمم است نزدیک می‌شود. کروموزوم‌های قرمز رنگ در شکل ۲۶ نشان‌دهنده آخرین جمعیت از کروموزوم‌های تولید شده است که حول مختصات بهینه $1/0.208$ و $1/1748$ ، پراکنده شده‌اند. مختصات یافت شده دارای دقت $0/1$ درجه (حدوداً معادل با ۱۰ کیلومتر) از مقدار مختصات صحیح این تصویر (۱ و ۱) است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که کد الگوریتم ارائه شده در صورت چرخش تصاویر نیز قادر به موقعیت‌یابی با دقت مناسب می‌باشد. لازم به‌ذکر است که با لحاظ خطاهایی همچون تعیین و تنظیم محور دوربین در جهت قائم و خطاهای سیستم اپتیکی و نویزهای تصویری و الکترونیکی و غیره، در کل ایجاد تغییرات قابل توجه در پیکسل‌های تصویر مشابه با همین چرخش ایجاد شده در تصویر، دقت ۱۰ کیلومتر در تعیین موقعین ایدآل است.

نتایج و بحث

به‌منظور بررسی فاکتورهای موثر بر توان و دقت موقعیت‌یابی روش پیشنهادی، در این قسمت از مطالعه تاثیر توزیع نامتقارن ستارگان در تصویر و همچنین تاثیر چرخش تصویر (چرخش ناظر حول خود در امتداد خط‌انداز)، که موجب تغییرات قابل توجه در موقعیت ستارگان درون تصویر می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بررسی تاثیر توزیع نامتقارن ستارگان در تصویر

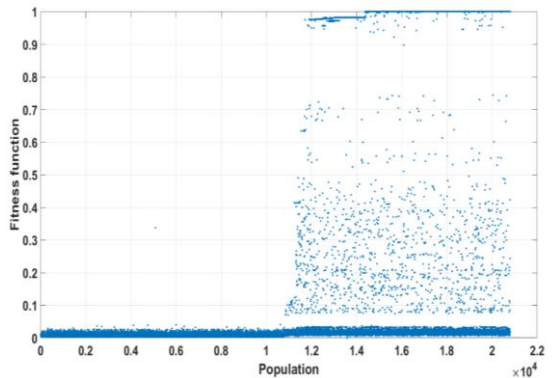
در ادامه جهت بررسی دقت و کارایی الگوریتم حاضر، تصویری با توزیع نامتقارن از ستارگان در نیم‌کره متقابل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تصویر از ستارگان، در همان زمان مربوط به تصویر ستارگان بالای برج میلاد تهران، گرفته شده است. با این تفاوت که در سمت مقابل کره زمین گرفته شده است. این تصویر در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

مقادیر تابع برازش برای تولید جمعیت‌های متوالی مربوط به این شکل در نیم کره دیگر در شکل ۲۱ آورده شده است. متناسب به آن در جست‌وجوی اول مقادیر کروموزوم به رنگ مشکی رنگ طبق شکل ۲۱ و همچنین جست‌وجوی آتی و در نهایت مختصات نهایی به‌عنوان کروموزوم پیدا شده، به‌دست آمده است. همان‌طور که مشهود است مقدار مختصات به‌دست آمده قرینه مختصات قبلی است که برابر است با $35/6808$ و $51/1317$ -. این نتیجه به‌خوبی نشان می‌دهد که الگوریتم موقعیت‌یابی پیشنهادی در پژوهش حاضر دقت خوبی نسبت به پیدا کردن موقعیت جغرافیایی تصاویر بر مبنای بهره‌گیری از تصاویر سماوی دارد.



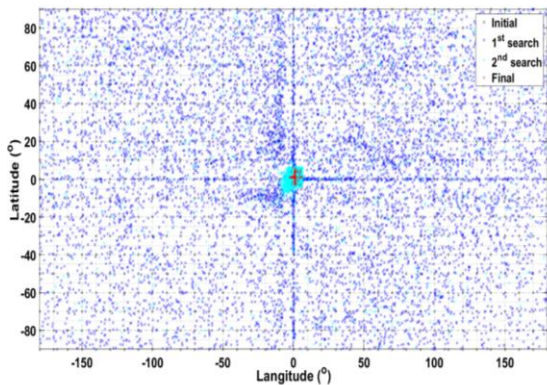
شکل ۲۰- تصویر با توزیع نامتقارن از ستارگان در نیم کره مخالف.

Fig. 20. Asymmetrical image in the opposite hemisphere.



شکل ۲۵- تولید نسل‌های متوالی بر اساس تابع برازش برای تصویر چرخش یافته.

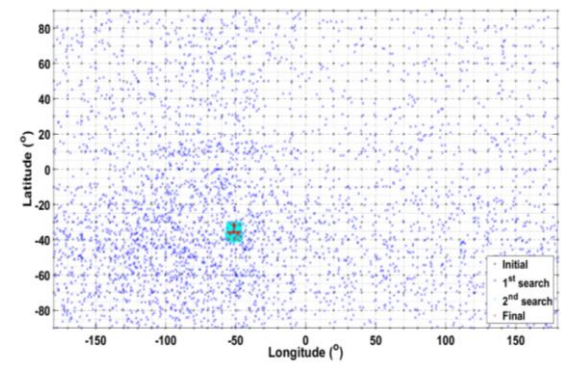
Fig. 25. Generation of successive generations based on the fitting function for the rotated image.



شکل ۲۶- جست‌وجوی جهت یافتن موقعیت (بهترین کروموزوم) برای تصویر چرخش یافته.

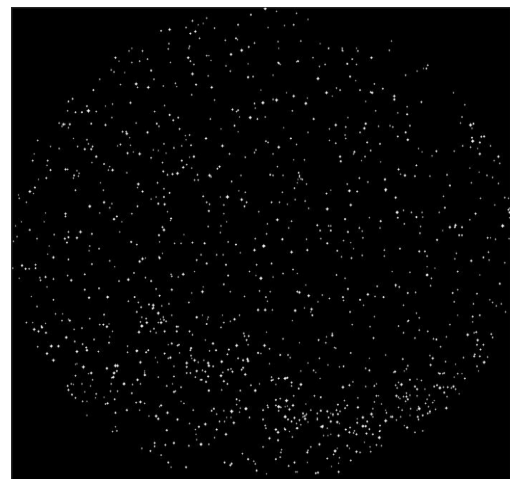
Fig. 26. Directional search to find the position (best chromosome) for the rotated image.

در برخی ماهواره‌ها یا سامانه‌های فضایی، انتشارگر (Transponder) یا سایر تجهیزات مخابراتی و ناوبری، اطلاعاتی نظیر موقعیت تقریبی ناظر یا ماهواره را در قالب داده‌های مخابراتی در اختیار قرار می‌دهند. این داده‌ها که از پیش‌بینی‌های مسیر مداری یا حسگرهای موقعیت ساده استخراج می‌شوند، دقت بالایی ندارند اما می‌توانند یک تخمین اولیه از مختصات تقریبی ناظر ارائه دهند. در پژوهش حاضر، الگوریتم ژنتیک با فرض عدم آگاهی کامل از موقعیت اولیه، ناچار به اسکن کل آسمان با گام‌های ۱۰ درجه‌ای بوده که بار محاسباتی قابل توجهی دارد. اما در صورت استفاده از داده‌های ابتدایی انتشارگر، نیازی به مرحله جست‌وجوی گسترده اولیه نخواهد بود و می‌توان جست‌وجو را مستقیماً در یک بازه محدود آغاز کرد. این رویکرد باعث کاهش چشمگیر زمان اجرا و افزایش کارایی الگوریتم می‌شود.



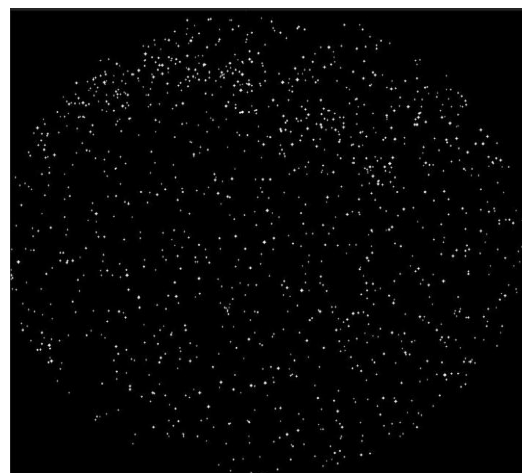
شکل ۲۲- پیدا کردن مختصات بهینه برای تصویر نامتقارن.

Fig. 22. Finding the optimal coordinates for asymmetric image.



شکل ۲۳- تصویر ستارگان در همان زمان با مختصات ۱ و ۱.

Fig. 23. Image of stars at the same time with coordinates 1 and 1.



شکل ۲۴- تصویر ۱۸۰ درجه چرخش یافته.

Fig. 24. Image rotated 180 degrees.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر روشی تلفیقی نوینی بر مبنای پردازش تصویر و فرآیند جست‌وجوی بهینه برای تعیین موقعیت جغرافیایی متحرک بر اساس تصاویر سماوی دریافتی در سنسور ستاره ارائه می‌دهد. با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی بهینه، امکان شناسایی دقیق موقعیت متحرک بر اساس تصاویر ستارگان، داده‌های زمانی و مکانی فراهم می‌شود. این روش با توانایی پوشش کل سطح زمین و غلبه بر پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات زمانی و مکانی تصاویر، می‌تواند گامی مؤثر در توسعه سیستم‌های مبتنی بر بینایی ماشین و همین‌طور کاربردهای فضایی محسوب شود. در فرآیند محاسباتی پیشنهادی ابتدا تصویر مجهول با اصلاحات لازم به فرمی مناسب و خاکستری تبدیل شده و سپس ویژگی‌های مکان و فرکانس از تصویر استخراج گردید. الگوریتم ژنتیک با تولید نسل‌های مختلف و استفاده از تابع برازش مناسب، تصاویر تولیدشده را با تصویر مجهول مکان مورد مقایسه قرار داد. این روند در نسل‌های متوالی ادامه یافته تا با حداقل‌سازی اختلاف، موقعیت دقیق متحرک شناسایی شود. در پژوهش حاضر همچنین حساسیت الگوریتم توسعه یافته نسبت به تقارن و چرخش تصاویر گرفته شده نیز مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی موید دستیابی به دقت مناسب و مقاوم بودن الگوریتم پیشنهادی به چنین تغییراتی است.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- Korea (South), 2015, pp. 461-465, <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2015.7364961>.
- [5] G. A. Finney, S. Fox, B. Nemati, and P. J. Reardon, "Extremely accurate star tracker for celestial navigation," in 24th *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*, Maui, Hawaii, 2023, Paper 98.
- [6] C. T. Kuhl, "Combined earth-/star sensor for attitude and orbit determination of geostationary satellites," Ph.D. dissertation, Institute of Flight Mechanics and Flight Control, University of Stuttgart, 2005.
- [7] L. Baohua, L. Wenjie, C. Yun, and L. Zongming, "An autonomous navigation algorithm for high orbit satellite using star sensor and ultraviolet earth sensor," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, no. 1, 2013, Art. no. 237189, <https://doi.org/10.1155/2013/237189>.
- [8] X. Wei, C. Cui, G. Wang, and X. Wan, "Autonomous positioning utilizing star sensor and inclinometer," *Measurement*, vol. 131, pp. 132-142, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.061>.
- [9] D. Rijlaarsdam, H. Yous, J. Byrne, D. Oddenino, G. Furano, and D. Moloney, "A survey of lost-in-space star identification algorithms since 2009," *Sensors*, vol. 20, no. 9, 2020, Art. no. 2579, <https://doi.org/10.3390/s20092579>.
- [10] Y. Zhao, X. Wei, J. Li, and G. Wang, "Star identification algorithm based on K-L transformation and star walk formation," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 13, pp. 5202-5210, 2016, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2553245>.
- [11] C. C. Liebe, "Accuracy performance of star trackers-a tutorial," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 2, pp. 587-599, 2002, <https://doi.org/10.1109/TAES.2002.1008988>.
- [12] A. M. Rad, J. H. Nobari, and A. A. Nikkhah, "Optimal attitude and position determination by integration of INS, star tracker, and horizon sensor," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 29, no. 4, pp. 20-33, 2014, <https://doi.org/10.1109/MAES.2014.130093>.
- [13] J. A. Van Allen, "Basic principles of celestial navigation," *American Journal of Physics*, vol. 72, no. 11, pp. 1418-1424, 2004, <https://doi.org/10.1119/1.1778391>.
- [14] W. Quan, X. Gong, J. Fang, and J. Li, "Star map processing algorithm of star sensor and autonomous celestial navigation," in *INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology*, Springer Berlin, Heidelberg, 2015, pp. 145-183, https://doi.org/10.1007/978-3-662-45159-5_5.
- [15] F. Jiancheng and N. Xiaolin, "Celestial navigation methods for space explorers," *Measurement and Control*, vol. 41, no. 3, pp. 77-80, 2008, <https://doi.org/10.1177/002029400804100302>.
- [1] R. Opromolla, G. Fasano, G. Rufino, M. Grassi, C. Pernechele, and C. Dionisio, "A new star tracker concept for satellite attitude determination based on a multi-purpose panoramic camera," *Acta Astronautica*, vol. 140, pp. 166-175, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.08.020>.
- [2] J. C. Springmann, "Satellite attitude determination with low-cost sensors," Ph.D. dissertation, University of Michigan, 2013.
- [3] M. Zahednamazi, A. Toloei, and 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, <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00093-y>.
- [4] H. S. Kim, J. H. Hong, W. S. Park, and C. K. Ryoo, "Satellite celestial navigation using star-tracker and earth sensor," in *15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Busan,

- [28] H. Zhao, M. F. Lembeck, A. Zhuang, R. Shah, and J. Wei, "Real-time convolutional neural network-based star detection and centroiding method for cubesat star tracker," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, pp. 1-13, 2025, <https://doi.org/10.1109/TAES.2025.3542744>.
- [29] A. S. Sadat and A. Behrad, "Star tracking and attitude determination using fuzzy based positional pattern and rotation compensation in Fourier domain," *Multimedia Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 401-410, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00530-014-0365-1>.
- [30] D. Eid, A. F. Attia, S. Elmasry, and I. Helmy, "A hybrid genetic-fuzzy controller for a 14-inch astronomical telescope tracking," *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 10, no. 3, 2021, Art. no. 2150011, <https://doi.org/10.1142/S2251171721500112>.
- [31] T. Delabie, J. D. Schutter, and B. Vandenbussche, "Highly efficient attitude-estimation algorithm for star trackers using optimal image matching," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 36, no. 6, pp. 1688-1697, 2013, <https://doi.org/10.2514/1.61082>.
- [32] H. Yoon, K. Baeck, and J. Wi, "Star tracker geometric calibration through full-state estimation including attitude," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, vol. 23, no. 1, pp. 180-191, 2022, <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00432-5>.
- [33] J. Roshanian, S. Yazdani, and F. Barzamani, "Application of PIV and delaunay triangulation method for satellite angular velocity estimation using star tracker," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 24, pp. 10105-10114, 2018, <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2866950>.
- [34] C. C. Liebe, "Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 7, no. 6, pp. 34-41, 1992, <https://doi.org/10.1109/62.145117>.
- [35] M. J. Lichter, "Star tracker accuracy improvement and optimization for attitude measurement in three-axis," in *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (AMOS)*, Maui, HI, United States, 2019, no. GRC-E-DAA-TN72340.
- [36] C. L. Cole and J. L. Crassidis, "Fast star-pattern recognition using planar triangles," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 29, no. 1, pp. 64-71, 2006, <https://doi.org/10.2514/1.13314>.
- [37] H. Salarieh and R. Khalesi, "Simultaneous attitude and orbit determination using sensor fusion algorithm based on the dynamic of satellite and star tracker," *Aerospace Mechanic*, vol. 13, no. 4, pp. 47-58, 2017.
- [16] F. Zhao, S. S. Ge, J. Zhang, and W. He, "Celestial navigation in deep space exploration using spherical simplex unscented particle filter," *IET Signal Processing*, vol. 12, no. 4, pp. 463-470, 2018, <https://doi.org/10.1049/iet-spr.2017.0184>.
- [17] X. Ning and J. Fang, "A new autonomous celestial navigation method for the lunar rover," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, no. 1, pp. 48-54, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2008.02.006>.
- [18] X. Ning and J. Fang, "An autonomous celestial navigation method for LEO satellite based on unscented Kalman filter and information fusion," *Aerospace Science and Technology*, vol. 11, no. 2-3, pp. 222-228, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2006.12.003>.
- [19] F. Pierros, "Stand-alone celestial navigation positioning method," *The Journal of Navigation*, vol. 71, no. 6, pp. 1344-1362, 2018, <https://doi.org/10.1017/S0373463318000401>.
- [20] W. Xinlong, W. Bin, and L. Hengnian, "An autonomous navigation scheme based on geomagnetic and starlight for small satellites," *Acta Astronautica*, vol. 81, no. 1, pp. 40-50, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2012.07.013>.
- [21] C. Padgett and 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, <https://doi.org/10.1109/7.570743>.
- [22] P. Alvelda and A. San Martin, "Neural network star pattern recognition for spacecraft attitude determination and control," *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 1, 1988.
- [23] Y. Jing and W. Liang, "An improved star identification method based on neural network," in *10th International Conference on Industrial Informatics*, Beijing, China, 2012, pp. 118-123, <https://doi.org/10.1109/INDIN.2012.6301126>.
- [24] B. B. Spratling IV and D. Mortari, "A survey on star identification algorithms," *Algorithms*, vol. 2, no. 1, pp. 93-107, 2009, <https://doi.org/10.3390/a2010093>.
- [25] L. Xu, J. Jiang, and L. Liu, "RPNet: A representation learning-based star identification algorithm," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 92193-92202, 2019, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927684>.
- [26] D. Mortari, M. A. Samaan, C. Bruccoleri, and J. L. Junkins, "The pyramid star identification technique," *Navigation*, vol. 51, no. 3, pp. 171-183, 2004, <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2004.tb00349.x>.
- [27] V. Schiattarella, D. Spiller, and F. Curti, "A novel star identification technique robust to high presence of false objects: The multi-poles algorithm," *Advances in Space Research*, vol. 59, no. 8, pp. 2133-2147, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.034>.

- [43] H. Aminolraya, M. Mahdinejad Noori, and A. Jabar Rashidi, "Optimal threshold level for star identification in star trackers," *Electronic Industries*, vol. 7, no. 3, pp. 99-106, 2016.
- [44] E. Kowsari and H. Makarem, "Computing the installation error between star tracker and fiber optic gyroscope," *Journal of Space Science, Technology & Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 92-102, 2022, <https://doi.org/10.22034/jssta.2022.328129.1073>.
- [45] D. Okoh. "SKY MAP (function) MATLAB Central File Exchange." (2024, January, 8). [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45673-sky-map-function>
- [46] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, Reprint Ed. MIT press, 1992.
- [47] Wikipedia. "Horizontal coordinate system." (7 January 2025). [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Horizontal_coordinate_system
- [38] E. Smith, "Star Catalogues," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 16, no. 98, pp. 193-201, 1904.
- [39] F. Somayehee, M. Ebrahimi, A. A. Nikkhah, and J. Roshanian, "Optimal uniform guide star catalog using a genetic algorithm," *Applied Optics*, vol. 62, no. 22, pp. 6031-6038, 2023, <https://doi.org/10.1364/AO.493810>
- [40] F. Somayehee, A. A. Nikkhah, and J. Roshanian, "Uniform star catalogue using GWKM clustering for application in star sensors," *The Journal of Navigation*, vol. 72, no. 4, pp. 948-964, 2019, <https://doi.org/10.1017/S0373463318001029>.
- [41] M. Hamidi and F. Samadzadegan, "A star identification algorithm based on a voting scheme for star trackers," *Iranian Journal of Physics Research*, vol. 14, no. 1, pp. 89-105, 2014.
- [42] M. Hashemi, S. K. Mosavi Mashhadi, S. M. Esmailzadeh, and M. Fiuzy, "Design and construction of star tracker platform in order to satellite attitude determination based on star tracking algorithm (Technical Note)," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 85-90, 2016.