

ارائه الگوریتم شناسایی ستاره بر مبنای رأی گیری هندسی به منظور استفاده در ردیاب های ستاره ای

معصومه حمیدی و فرهاد صمدزادگان

گروه مهندسی نقشه برداری، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
پست الکترونیکی: m.hamidi@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۹۲/۲/۱۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۲/۷)

چکیده

شناسایی ستاره در حالت جستجو، یکی از مهم ترین مراحل در تعیین وضعیت سکو با استفاده از ردیاب های ستاره ای است. این فرآیند توسط الگوریتم های تناظریابی بین ستاره های استخراج شده از تصویر ردیاب و یک کاتالوگ ستاره ای مرجع صورت می گیرد. چالش اصلی در این مسئله، فراهم نمودن الگوریتم شناسایی سریع و قابل اطمینان است که در حالت های مختلف قرارگیری جهت دستگاه اپتیکی سکو در فضا، از پایداری بالایی برخوردار باشد. در این تحقیق، الگوریتمی به منظور تناظریابی ستاره های مشاهده شده توسط ردیاب ستاره ای با ستاره های موجود در کاتالوگ ستاره ای بر مبنای روند رأی گیری هندسی ارائه می گردد. در این الگوریتم یک زوج از ستاره های موجود در کاتالوگ به یک زوج از ستاره های مشاهده شده در تصویر، در صورت تشابه فواصل آنها، رأی خواهد داد. از آنجا که فاصله زاویه ای یک رابطه متقارن است، در صورت تشابه فاصله ها به هر یک از دو ستاره تصویر دو رأی تعلق خواهد گرفت. در هر بار تکرار فرآیند رأی گیری، شناسه هر ستاره تصویر متناظر با شناسه ستاره ای از کاتالوگ قرار داده خواهد شد که بیشترین تعداد آراء را کسب کرده باشد. نتایج حاصل از به کارگیری روش پیشنهادی در شرایط مختلف قرارگیری توجیه سنجنده در فضا و با تغییر مشخصات اپتیکی، بیانگر توانایی بسیار بالای آن در شناسایی ستاره ها می باشد.

واژه های کلیدی: شناسایی ستاره، حالت جستجو، تعیین وضعیت، ردیاب ستاره ای، کاتالوگ ستاره ای، رأی گیری هندسی

۱. مقدمه

سنجنده خورشیدی^۱، مغناطیس سنج^۲، گیرنده های سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۳، سنجنده افق^۴ و ردیاب ستاره ای^۵ برای

تعیین وضعیت یک نیاز اساسی برای هر سکوی فضایی خصوصاً ماهواره هایی است که نیازمند نشانه روی با دقت بالایی هستند [۱-۵]. طیف گسترده ای از سنجنده ها از قبیل:ژیروسکوپ^۱،

۲. sun sensor

۳. magnetometer

۴. Global Positioning System

۵. horizon sensor

۶. star tracker

۱. gyroscope

در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از کاتالوگ‌های ستاره‌ای توسعه داده شده‌اند که با توجه به هدف آنها برای مطالعات نجومی و نیز تعیین وضعیت سماوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین کاتالوگ‌هایی که دارای دقت کافی بوده و در تعیین وضعیت سکویهای فضایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌توان به Hipparcos، Tycho، SKY2000، SAO، و HYG اشاره نمود. در این تحقیق از کاتالوگ Tycho-2 استفاده شده است. این کاتالوگ نتیجه همکاری بین رصدخانه دانشگاه کوپنهاگ^۸ و رصدخانه دریایی ایالات متحده^۹ است. تعداد ۵۰۰۰ ستاره از این کاتالوگ توسط چشم غیر مسلح قابل مشاهده است. محدوده دقت‌های موقعیتی، بسته به مقدار قدر در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ میلی ثانیه کمانی است. کاتالوگ Tycho-2 شامل ستاره‌های با قدر کمتر از ۱۱٫۵ است که شامل ۴۰۰۰۰ ستاره روشن‌تر از قدر ۹ است که در کاتالوگ Hipparcos وجود ندارد [۱۰].

۳. ردیاب ستاره‌ای

ردیاب‌های ستاره‌ای متشکل از سه بخش اصلی می‌باشند: یک دستگاه نوری که جمع‌آوری فتون‌های ستاره‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد؛ یک دستگاه آشکارساز^{۱۰} که از یک CCD^{۱۱}، یا CMOS^{۱۲} تشکیل شده است و نور ستاره بر روی آن غیر متمرکز می‌گردد؛ و یک واحد پردازنده الکترونیکی که رقوم‌سازی و همچنین آنالیز داده‌های ستاره‌ای را بر عهده دارد [۱۱-۳]. ردیاب ستاره‌ای در قدم اول مختصات ستاره‌ها را بر روی تصویر اندازه‌گیری و سپس آنها را با مختصات معلوم از کاتالوگ ستاره‌ای و یا تصاویر قبلی مقایسه می‌نماید. این مقایسه منجر به اطلاعات وضعیتی فریم ردیاب ستاره‌ای می‌گردد، که در مرحله بعد قابل انتقال به چارچوب بدنه سکو

این منظور توسعه داده شده‌اند [۱، ۶ و ۷]. در این میان ردیاب‌های ستاره‌ای دقیق‌ترین سنجنده‌های تعیین وضعیت هستند که قابلیت رسیدن به دقت‌هایی در حد چند ثانیه کمانی را دارا می‌باشند [۱-۳، ۶-۹]. این سنجنده‌ها برآورد وضعیت را مستقیماً با مقایسه تصویر ستاره‌هایی که توسط دوربین همراه سکو اخذ می‌گردد، با ستاره‌های موجود در کاتالوگ، امکان‌پذیر می‌سازند. بنابراین، به دلیل عدم وابستگی به موقعیت خورشید، زمین، میدان مغناطیسی، یا ماهواره‌های خارجی، انعطاف‌پذیری بسیار بالایی دارند [۱].

۲. کاتالوگ ستاره‌ای

ردیاب‌های ستاره‌ای به منظور شناسایی ستاره‌های مشاهده شده در تصویر نیازمند پایگاه داده‌ای هستند که اطلاعات مربوط به ستاره‌ها را در فضای اینرسی^۱ ارائه نماید. یک کاتالوگ ستاره‌ای، پایگاه داده‌ای است شامل اطلاعاتی از قبیل اسم ستاره، مختصات سماوی ستاره (بعد^۲ و میل^۳ ستاره)، قدر ظاهری^۴ و مطلق^۵ آن در باندهای مختلف، اطلاعات نورسنجی^۶، اطلاعات مربوط به حرکت خاص^۷ ستاره، اطلاعات طیفی و سایر اطلاعات مربوط به ستاره‌ها. بدیهی است که تمامی اطلاعات ارائه شده در کاتالوگ‌های اصلی، در داخل ردیاب‌های ستاره‌ای مورد استفاده نیست؛ از این رو تنها اطلاعات مورد نیاز در کاتالوگ همراه سکو ذخیره می‌گردد تا در حافظه مصرفی صرفه‌جویی گردد. همچنین، با توجه به معلوم بودن کیفیت دوربین مورد استفاده در داخل ردیاب ستاره‌ای، می‌توان میزان حساسیت سنجنده را نسبت به قدر ستاره‌ها تعیین و در نتیجه تنها اطلاعات مربوط به ستاره‌های تا قدر قابل دید توسط سنجنده را در کاتالوگ همراه سکو ذخیره نمود.

۱. Inertial Space

۲. Right Ascension

۳. Declination

۴. Apparent Magnitude

۵. Absolute Magnitude

۶. Photometry

۷. Proper Motion

۸. CUO

۹. United State Naval Observatory (USNO)

۱۰. Detector

۱۱. Charge-Coupled Device

۱۲. Charge-Injection Device

۱۳. Complementary Metal Oxide

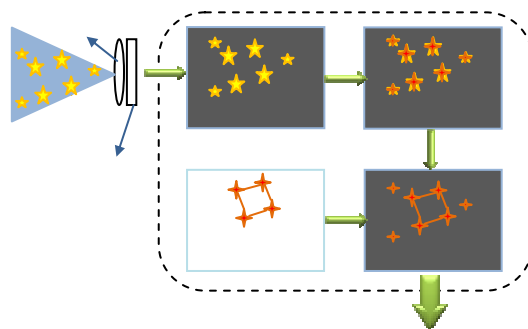
۳. محاسبه وضعیت: محاسبه وضعیت سکو بر مبنای ستاره‌های شناسایی شده.

یکی از مهم‌ترین مراحل در حالت LIS، شناسایی ستاره است. چالش اصلی، در این مرحله فراهم نمودن الگوریتم‌های شناسایی سریع است که نسبت به ستاره‌های اشتباهی که در تصویر ظاهر می‌گردند، پایدار باشد. در این راستا در سال‌های اخیر الگوریتم‌های متنوعی برای حل مسائل مطرح در حالت LIS توسعه داده شده است [۵، ۸، ۹، ۱۳-۱۸]. در این تحقیق نیز هدف ارائه یک روش کارآمد در شناسایی ستاره‌ها مبتنی بر رأی‌گیری هندسی می‌باشد.

۴. مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه

شناسایی ستاره

اصلی‌ترین بخش در تعیین وضعیت سکو در حالت LIS، شناسایی ستاره است و تمایز الگوریتم‌های مختلف LIS بر مبنای چگونگی انجام این بخش صورت می‌گیرد [۸، ۱۳ و ۱۴]. هدف فرآیند شناسایی، نسبت دادن یک شناسه ستاره کاتالوگ واحد به هر یک از ستاره‌های تصویری است. در صورتی که متناظر ستاره در کاتالوگ یافت نشود، به عنوان یک ستاره اشتباه علامت‌گذاری خواهد گردید. عموماً، تناظریابی با مقایسه اطلاعات کاتالوگ ستاره‌ای با ستاره‌های مشاهده شده در تصویر صورت می‌گیرد. با وجودی که کاتالوگ شامل اطلاعات شدت روشنایی به همراه اطلاعات موقعیت ستاره‌ها است، شدت روشنایی تنها به عنوان یک فیلتر مکمل ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در هنگام استفاده از الگوریتم‌های روشنایی-مبنا احتمال شناسایی صحیح ستاره به طور قابل توجهی تحت تأثیر خطاهای برآورد شدت روشنایی ستاره قرار خواهد گرفت [۹ و ۱۹]. کاتالوگ مقادیر قدر بصری ستاره‌ها را ذخیره می‌نماید، درحالی که شدت روشنایی ستاره‌های تصویری وابسته به قدر دستگاهی است [۲۰]؛ از این رو پیش‌بینی شدت روشنایی ستاره تصویری از روشنایی ستاره کاتالوگ کار ساده‌ای نیست. علاوه بر آن، مقادیر روشنایی نسبت به نوبه و عدم کارکرد صحیح دوربین بسیار حساس هستند [۹].



شکل ۱. نمودار کلی عملکرد یک ردیاب ستاره‌ای.

خواهد بود. شکل ۱ عملکرد کلی یک ردیاب ستاره‌ای را به طور نمادین نمایش می‌دهد.

از لحاظ عملکرد جستجو، یک ردیاب ستاره‌ای کلاسیک، دارای دو حالت گم شده در فضا (LIS^۱) و ردیابی^۲ است. در مرحله فعال‌سازی اولیه سکو، هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد وضعیت آن در دسترس قرار ندارد و از این رو این حالت گم شده در فضا یا جستجو^۳ نامیده می‌شود. اطلاعات به دست آمده از وضعیت سکو در حالت LIS، الگوریتم را در برآورد وضعیت متناظر با تصاویر متوالی بعدی یاری می‌نماید. این حالت، حالت ردیابی نامیده می‌شود. حالت ردیابی بر مبنای پیش‌بینی وضعیت جاری سکو از روی اطلاعات به دست آمده قبلی (وضعیت و نرخ تغییر آن) قرار دارد.

با توجه به پیچیدگی‌های مطرح در مرحله LIS و سطح بالای دقت و کارایی مورد نیاز در این مرحله، تمرکز اصلی تحقیقات مطرح در ردیاب‌های ستاره‌ای بر روی این مرحله قرار گرفته است [۸-۹، ۱۲-۱۶]. روش‌های LIS معمولاً از سه بخش اصلی تشکیل می‌گردند:

۱. برآورد مرکز ستاره: تعیین مراکز ستاره‌ها با دقت زیر پیکسل.
۲. شناسایی ستاره: نسبت دادن یک شناسه کاتالوگ واحد یا شناسه اشتباه به هر ستاره.

۱. Lost In Space

۲. Tracking

۳. Search

یک از ستاره‌های موجود در کاتالوگ چنین ماتریسی نسبت داده خواهد شد. به ازای هر ستاره، یک نقشهٔ بیتی از همسایگی آن تشکیل و به گونه‌ای دوران داده می‌شود که نزدیک‌ترین ستاره در همسایگی آن در امتداد محور x قرار گیرد. برای یافتن بهترین تناظر با الگوهای کاتالوگ، یک مقایسهٔ بیتی با هر یک از الگوهای موجود در کاتالوگ صورت می‌گیرد [۲۳ و ۲۴]. در سال ۲۰۱۳، ژنگ^۶ و همکاران الگوریتم دیگری را بر مبنای الگوی ستاره‌ای توسعه داده‌اند. شبکه‌ای که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، یک شبکه قطبی است [۱۸].

۴.۱. الگوریتم پیشنهادی

شناسایی ستاره، از طریق تناظریابی میان ستاره‌های استخراج شده از تصویر و یک کاتالوگ ستاره‌ای مرجع صورت می‌گیرد. الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی ستاره در این تحقیق از دو مرحلهٔ پردازشی آفلاین^۷ و آنلاین^۸ تشکیل گردیده است. در مرحلهٔ آفلاین پس از اعمال پیش‌پردازش‌هایی بر روی کاتالوگ ستاره‌ای، یک جدول جستجو بر اساس فاصلهٔ زاویه‌ای میان ستاره‌ها تشکیل می‌گردد. این جدول به عنوان پایگاه داده مرجع در سکو قرار داده می‌شود. مرحلهٔ آنلاین شامل تعیین موقعیت مراکز ستاره‌ها، شناسایی ستاره‌ها بر مبنای رأی‌گیری هندسی، و همچنین ارزیابی نتایج حاصل از رأی‌گیری اولیه می‌باشد. دیاگرام کلی روش پیشنهادی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۴.۲. مرحله آفلاین

در این مرحله، نخست پیش‌پردازش‌های مورد نظر بر روی کاتالوگ ستاره‌ای انجام شده، و سپس جدول جستجو با استفاده از آن تشکیل می‌گردد. با توجه به محدودیت‌های مطرح در میزان حساسیت سنجنده، ستاره‌ها تنها تا قدر مشخصی در تصویر ظاهر می‌گردند. از این رو با اعمال یک حد نهایی^۹ برای

روش‌های مختلف، راه‌کارهای متعددی را برای حل مسئله شناسایی ستاره به کار گرفته‌اند. متداول‌ترین روش، برخورد با ستاره‌های کاتالوگ به عنوان رئوس یک گراف بدون جهت G است که فاصلهٔ زاویه‌ای میان ستاره‌ها به عنوان وزن هر یال در نظر گرفته می‌شود. مجموعهٔ نقاط استخراج شده از سنجنده به عنوان یک گراف بدون جهت G_s در نظر گرفته خواهد شد. سپس، مسئله به صورت یافتن زیرگرافی از G که مشابه با G_s باشد، بازنویسی خواهد شد. نخستین الگوریتم‌های ارائه گردیده از این گروه، پایگاه داده‌ای از فواصل از پیش گردآوری شده میان ستاره‌ها را در سه تایی‌های مختلفی مورد استفاده قرار داد [۲۱]. هدف این الگوریتم‌ها یافتن زیرگرافی در کاتالوگ با فواصل مشابه بود. در سال ۲۰۰۶، سامان^۱ و همکاران از زوایای مشاهده شده در صفحهٔ کانونی برای تشکیل مثلث‌های ستاره‌ای استفاده نموده و الگوریتم خود را نسبت به خطاهای پارامترهای کالیبراسیون دوربین بسیار پایدارتر ساختند [۱۳]. آنها این روش را روش شناسایی ستاره بدون بعد^۲ نامیدند. الگوریتم‌های بر مبنای ستاره راهنما نسخهٔ دیگری از الگوریتم‌های این گروه هستند [۲۲]. ایدهٔ این الگوریتم‌ها یافتن ستاره‌ای از کاتالوگ است که فواصل آن تا همسایگانش به فواصل ستاره‌ای از سنجنده بیشترین تشابه را داشته باشد. الگوریتم ارائه شده توسط گانگ^۳ و سایر همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۴]، الگوریتم SHAZAM که جالابرت^۴ و سایر همکاران در سال ۲۰۱۱ برای تناظریابی ستاره‌ها استفاده نمودند [۱۱]، و همچنین الگوریتمی که توسط زی^۵ و سایر همکاران در سال ۲۰۱۲ ارائه گردید [۵]، نسخه‌های دیگری از این گروه هستند.

یک شیوهٔ متداول دیگر، الگوریتم‌های بر مبنای الگو است. هر ستاره به الگویی نسبت داده می‌شود که موقعیت ستاره و همسایگانش را بیان می‌نماید [۲۳]. شبکه‌ای به مرکزیت ستاره S به فاصلهٔ از پیش تعریف شده‌ای از آن تشکیل می‌گردد. شبکه یک ماتریس تنک است که سلول‌های خالی متناظر با صفر و سلول‌های حاوی ستاره متناظر با یک قرار داده می‌شود. به هر

۱. Samaan

۲. Non-dimensional star identification

۳. Gong

۴. Jalabert

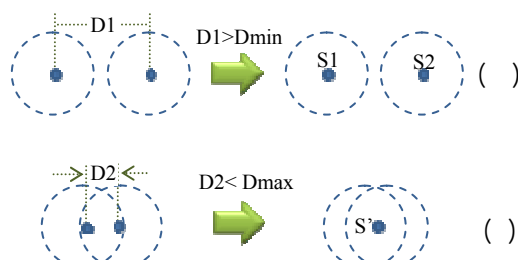
۵. Xie

۶. Zhang

۷. Off-Line

۸. On-Line

۹. Threshold



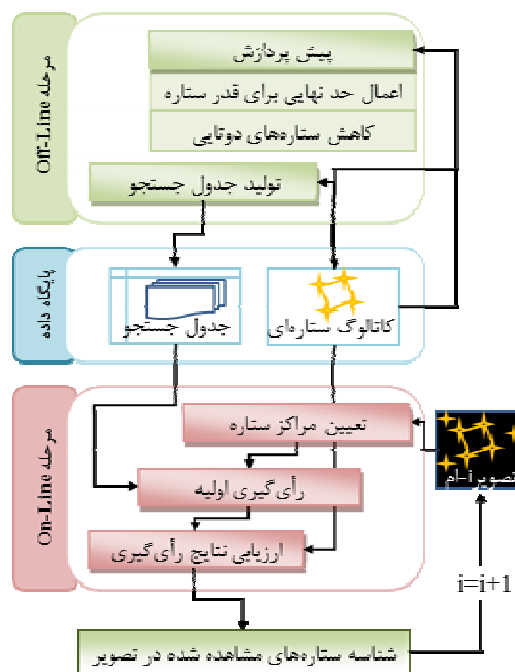
شکل ۳. دو ستاره نزدیک به هم در تصویر: (الف) دو ستاره مجزا، (ب) ستاره دوتایی.

دو ستاره به عنوان دو ستاره مجزا تشخیص داده خواهند شد (شکل ۳ الف)). در غیر این صورت، الگوریتم مرکزیابی تنها یک ستاره را در موقعیت نقطه‌ای واقع در خط واصل مراکز دو ستاره و نزدیک به ستاره با شعاع بیشتر تعیین خواهد نمود (شکل ۳ ب)). در نتیجه ممکن است در فرآیند شناسایی ستاره نتایج نادرست تولید کرده و یا در بهترین حالت هیچ جوابی به دست نیاید.

برای حل مشکل وجود ستاره‌های دوتایی، دو راه حل وجود دارد؛ راه حل نخست حذف ستاره‌های دوتایی از کاتالوگ ستاره‌ای می‌باشد. راه حل دیگر در نظر گرفتن ستاره‌های دوتایی به صورت یک ستاره مصنوعی با محاسبه قدر و مولفه‌های مختصاتی این ستاره ساختگی (یا ستاره معادل)، توسط هر دو ستاره می‌باشد. بدیهی است که در صورت انتخاب راه حل دوم، روش مورد استفاده برای ایجاد ستاره‌های معادل در کاتالوگ و پردازش‌های تصویری مربوط به تصویر ستاره‌های دوتایی باید با هم سازگاری بالایی داشته باشند. در این تحقیق راه حل اول، یعنی حذف ستاره‌های دوتایی مورد استفاده قرار گرفته است. پس از اعمال تصحیحات به کاتالوگ ستاره‌ای، بایستی جدول جستجو تشکیل گردد. برای این منظور، فاصله زاویه‌ای (d_{ij}) میان تمامی زوج‌های ستاره S_i و S_j $1 \leq i < j \leq N$ موجود در کاتالوگ محاسبه می‌گردد:

$$d_{ij} = \frac{\arccos(\vec{V}_i \cdot \vec{V}_j)}{\|\vec{V}_i\| \cdot \|\vec{V}_j\|} \quad (1)$$

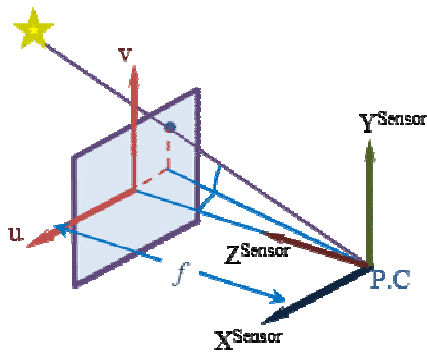
که، \vec{V}_i و \vec{V}_j بردارهای کارتیزین یک‌ه، متنظر با زوج ستاره مورد نظر می‌باشد که موقعیت ستاره را بر روی کره سماوی مشخص می‌نماید.



شکل ۲. نمودار کلی روش پیشنهادی.

بیشینه قدر ستاره، نه تنها می‌توان حافظه مصرفی برای ذخیره کاتالوگ ستاره‌ای بر روی یک سکوی در حال حرکت را تا حد زیادی کاهش داد، بلکه حجم محاسبات تناظریابی نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. کاتالوگ ستاره‌ای قبل از استفاده می‌بایست با توجه به ویژگی‌های سنجنده تصویربرداری مورد استفاده در ردیاب ستاره‌ای و توانایی آن در تشخیص دو ستاره نزدیک به هم، نیز تصحیح گردد. این فرآیند تحت عنوان کاهش ستاره‌های دوتایی^۱ شناخته می‌شود. یکی از مشکلاتی که در روند شناسایی ستاره ظاهر می‌شود، حضور ستاره‌های دوتایی است. منظور از ستاره‌های دوتایی، ستاره‌هایی هستند که به دلیل کم بودن فاصله زاویه‌ای آنها، بر روی تصویر در کنار یکدیگر ظاهر می‌گردند. بنابراین تمیز آنها توسط الگوریتم تعیین مرکز امکان‌پذیر نمی‌باشد و توسط الگوریتم به عنوان یک ستاره تشخیص داده خواهند شد. این‌که چه زوج ستاره‌هایی ممکن است برای سنجنده، ستاره دوتایی محسوب گردند، وابسته به ویژگی‌های سنجنده مورد استفاده است. اگر فاصله مراکز دو ستاره واقع بر روی تصویر بیش از مجموع شعاع آنها باشد، این

۱. binary stars



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) مختصات ستاره در دستگاه مختصات سنجنده.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^m g_i}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^m g_i} \quad (3)$$

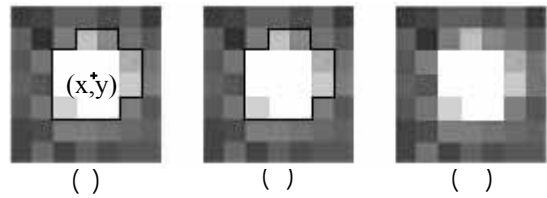
که در رابطه بیان شده، m تعداد پیکسل‌های مربوط به قطعه تصویری ستاره مورد نظر، x_i و y_i مختصات مراکز این پیکسل‌ها، و g_i درجات خاکستری مربوط به آنها می‌باشد.

استفاده از روش مرکز نوری به منظور تعیین مرکز ستاره برای کاربرد در ردیاب‌های ستاره‌ای، روش متداولی است [۴، ۹ و ۲۶]. پس از تعیین مراکز ستاره‌ها، به ازای هر زوج ستاره S_j و S_i $1 \leq i < j \leq n$ مشاهده شده در تصویر، فاصله $d_{ij} = |P_i - P_j|$ و عدم قطعیت آن $e_{ij} = e_i + e_j = 2e$ محاسبه می‌گردد. P_i و P_j مختصات مراکز ستاره در دستگاه مختصات یکه مربوط به سنجنده (شکل ۵) می‌باشد که با رابطه زیر داده می‌شود:

$$P = \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \begin{bmatrix} u \\ v \\ f \end{bmatrix}, \quad (4)$$

در رابطه بیان شده، u و v مختصات ستاره بر روی صفحه تصویر، و f فاصله کانونی سنجنده است که جزو پارامترهای توجیه داخلی سنجنده بوده و در داخل فایل کالیبراسیون ارائه می‌گردد.

بنابراین، فرض خواهد شد که فاصله حقیقی ستاره‌های متناظر با دو ستاره مشاهده شده در تصویر در بازه $R_{ij} = [d_{ij} - e_{ij}, d_{ij} + e_{ij}]$ قرار داشته باشد. به ازای تمامی



شکل ۴. روند تعیین مرکز ستاره (الف) تصویر ستاره، (ب) قطعه تصویری مربوط به ستاره، (ج) مرکز ستاره.

برداری \vec{V} بر حسب مختصات بعد (α) و میل (δ) هر ستاره نوشته می‌شود:

$$V = \begin{bmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

لیست فواصل کمتر از یک حد نهایی D بر حسب مقادیر فواصل مرتب شده و یک جدول فاصله T با این ترتیب ایجاد می‌گردد. هر سطر در این جدول شامل فاصله d و شناسه دو ستاره متناظر با آن $ID1$ و $ID2$ (سه ستون) می‌باشد. اندازه جدول برابر $O(Nk)$ می‌باشد، که در آن N تعداد ستاره‌های موجود در کاتالوگ و k تعداد متوسط ستاره‌های واقع در همسایگی به فاصله D می‌باشد.

۳.۴. مرحله آنالیز

در مرحله آنالیز، نخست n مرکز ستاره S_i ، با دقت زیر پیکسل، e ، در تصویر استخراج می‌گردد. تعیین دقیق مرکز ستاره یک فرآیند اساسی در افزایش دقت اطلاعات وضعیتی است [۱]. نواحی مربوط به مناطق ستاره‌ها با استفاده از روش‌های قطعه‌بندی، مانند رشد ناحیه^۱، از تصویر استخراج می‌شود. ایده اصلی این روش، جستجوی سیستماتیک در طول کل تصویر برای یافتن پیکسل‌هایی است که روشنایی (درجه خاکستری) آنها از یک مقدار حداقل بیشتر باشد؛ و سپس به سایر پیکسل‌های مجاور یک درجه خاکستری یکسان نسبت داده می‌شود [۲۵]. پس از تعیین قطعات تصویری مربوط به ستاره‌ها، مختصات مرکز نوری^۲ این قطعات به عنوان مرکز ستاره قابل محاسبه خواهد بود (شکل ۴)

۱. Region Growing
۲. Center of Mass

شناسایی ستاره‌های مشاهده شده در تصاویر صورت گرفت. به منظور شبیه‌سازی عملکرد ردیاب ستاره‌ای، نخست با توجه به وضعیت قرارگیری سکو در فضای اینرسی، میدان دید سنجنده بر روی کره سماوی یافت شده و ستاره‌های مرجع واقع در داخل میدان دید تعیین می‌گردد. گام بعدی، تصویر نمودن ستاره‌های یافت شده به روی صفحه دو بعدی تصویر و سپس اعمال پارامترهای سنجنده است تا تصویر شبیه‌سازی شده نهایی به دست آید.

پس از به دست آوردن مختصات تصویری مراکز ستاره‌ها و با خواندن قدر آنها از کاتالوگ ستاره‌ای، با داشتن پارامترهای سنجنده می‌توان تصویر رستر^۱ شبیه‌سازی شده نهایی را تولید نمود. بدین منظور قدر ستاره طی رابطه‌ای به روشنی^۲ آن تبدیل می‌شود. سپس با اعمال یک تابع گوسین به‌عنوان تابع PSF^۳ می‌توان تصویر نهایی را تولید نمود.

به منظور نمایش هشت بیتی بایستی روشنایی تمامی ستاره‌ها در بازه $[0, 2^8] = [0, 255]$ به دست آید. ابتدا درجه خاکستری متناظر با کم‌نورترین ستاره قابل دید توسط سنجنده (ستاره دارای بیشترین قدر) و پر نورترین ستاره موجود در کاتالوگ (ستاره دارای کم‌ترین قدر) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \text{Max } GV &= \exp\left(-\frac{\text{Min Mag}}{2.5}\right), \\ \text{Min } GV &= \exp\left(-\frac{\text{Max Mag}}{2.5}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

که در رابطه بالا $\text{Max } GV$ و $\text{Min } GV$ به ترتیب بیشترین و کمترین درجه خاکستری به دست آمده است. با توجه به درجات خاکستری روشن‌ترین و کم‌نورترین ستاره موجود در کاتالوگ، درجات خاکستری به‌گونه‌ای مقیاس‌دهی خواهد گردید که نتایج به دست آمده در محدوده $[0, 255]$ قرار داشته باشند. بنابراین، درجه خاکستری یک ستاره در نهایت برابر خواهد بود با:

$$\text{Star } GV = \exp\left(-\frac{\text{Star Mag}}{2.5}\right) \cdot \frac{255}{|\text{Max } GV - \text{Min } GV|} \quad (7)$$

سطرهای k در جدول فاصله با مقادیر فواصل $T(k) \cdot d \in R_{ij}$ هر یک از دو ستاره کاتالوگ به دو ستاره تصویر رأی خواهند داد. برای یافتن نخستین سطر در جدول از جستجوی دو دویی استفاده شده و سپس یافتن سایر سطرها با یک جستجوی خطی صورت خواهد گرفت. پس از آن که یک بار فرآیند رأی‌گیری انجام شد، مرحله شناسایی اولیه آغاز می‌گردد. به ازای هر ستاره موجود در تصویر، شناسه‌ای که بیشترین تعداد آراء را کسب کرده باشد، به عنوان شناسه متناظر در نظر گرفته خواهد شد. شناسه‌های حاصل از این مرحله در اغلب موارد صحیح خواهد بود، با این وجود ممکن است برخی ستاره‌ها به اشتباه شناسایی شده باشند. از این رو، ارزیابی نتایج حاصل از رأی‌گیری اولیه ضروری خواهد بود. بنابراین، به ازای هر زوج از ستاره‌های تناظریابی شده بررسی می‌گردد که آیا فاصله میان آنها در تصویر برابر با فواصل ستاره‌های متناظر با این شناسه‌ها در کاتالوگ می‌باشد یا خیر، یعنی

$$|S_{St(i)} - S_{St(j)}| \in R_{ij} \quad (5)$$

در صورتی که فواصل مشابه باشد، دو ستاره کاتالوگ به دو ستاره تصویر رأی خواهند داد. سپس، از یک الگوریتم ساده خوشه‌بندی برای تشخیص ستاره‌هایی که به درستی شناسایی گردیده‌اند استفاده خواهد شد: اگر تعداد آراء یک ستاره نزدیک به بیشترین تعداد آراء در میان تمام ستاره‌ها باشد، شناسایی ستاره صحیح در نظر گرفته خواهد شد. این فرآیند در حذف تناظرهای اشتباه مؤثر است.

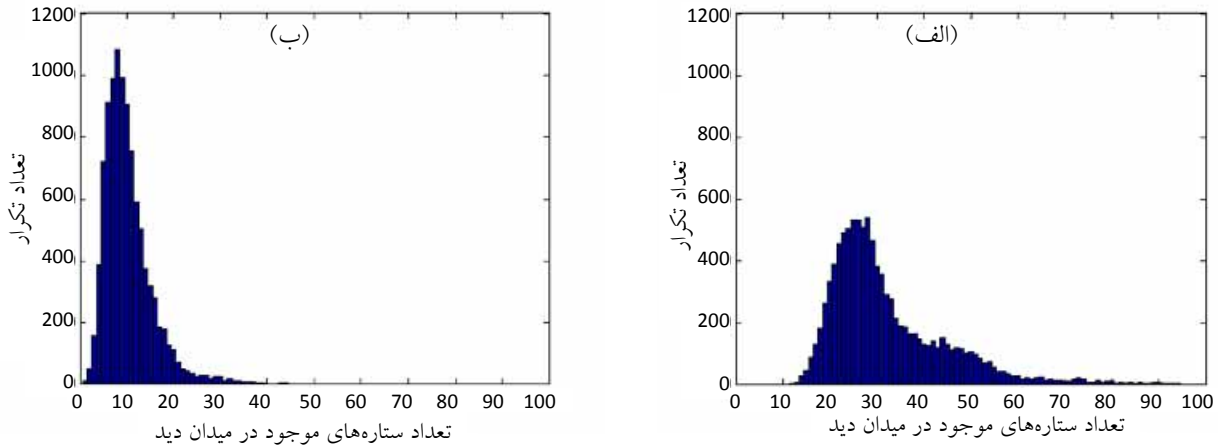
۵. نتایج عملی و ارزیابی

به منظور ارزیابی توانایی روش پیشنهادی، الگوریتم‌های بیان شده برای تعیین مرکز و شناسایی ستاره در قالب یک دستگاه نرم‌افزاری پیاده‌سازی گردید و نتایج آزمون‌های مختلف به منظور ارزیابی توانایی الگوریتم مورد استفاده بررسی و تحلیل گردید. بدین منظور، عملکرد ردیاب ستاره‌ای نصب شده بر روی یک سکو در فضای اینرسی به طور کامل شبیه‌سازی شد و تصاویر شبیه‌سازی شده مشابه وضعیت واقعی سکو ایجاد گردید. پس از تعیین مراکز ستاره‌ها با دقت زیر پیکسل،

۱. Raster

۲. brightness

۳. Point Spread Function



شکل ۶. هیستوگرام تعداد ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید، (الف) $18^\circ \times 18^\circ$ ، (ب) $10^\circ \times 10^\circ$.

جدول ۱. تعداد ستاره‌های کاتالوگ به‌ازای هر قدر.

تعداد	قدر ستاره
۱۰۰	<۳
۳۱۴	۳-۴
۱۰۱۶	۴-۵
۳۱۳۹	۵-۶
۹۵۸۷	۶-۷
۲۷۷۸۴	۷-۸

جدول ۲. مشخصات سنجنده مورد استفاده برای شبیه‌سازی.

مقدار	پارامتر
353×353	ابعاد CCD (پیکسل)
۱۰	ابعاد پیکسلی (میکرون)
$18^\circ \times 18^\circ$	FOV _۱ (عریض)
$10^\circ \times 10^\circ$	FOV _۲ (باریک)
۸	تعداد بیت به‌ازای هر پیکسل
۶	بیشینه حساسیت به قدر ستاره (Mag)
۱	PSF σ (پیکسل)

با فرض توزیع گاوسین برای تابع پخش نقطه (PSF) خواهیم داشت:

$$PSF = \exp\left(-\frac{(x-xp)^2 + (y-yp)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{۸}$$

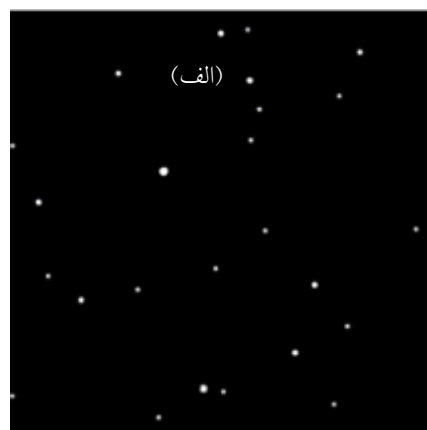
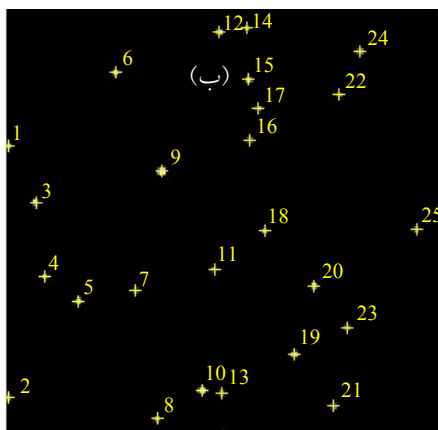
که در آن، xp و yp مختصات مرکز ستاره را نمایش می‌دهند. همچنین پارامتر σ بازشدگی تابع PSF را تعیین می‌نماید. حال بایستی این تابع را بر روی مراکز ستاره‌ها اعمال نمود تا تصویر نهایی حاصل شود. تصویر رستر نهایی، آرایه‌ای ماتریسی متشکل از درجات خاکستری زمینه آسمان به همراه ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید سنجنده خواهد بود.

کاتالوگ ستاره‌ای مورد استفاده، کاتالوگ Tycho-2 است که با توجه به حساسیت سنجنده، ستاره‌های با مقادیر قدر حداکثر ۶ (قدر کاری اکثر دوربین‌های مورد استفاده در ردیاب‌های ستاره‌ای) از آن انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۴۵۶۹ ستاره با مقادیر قدر کوچک‌تر از ۶ در این کاتالوگ وجود دارد.

جدول ۱ تعداد ستاره‌های موجود در این کاتالوگ را به‌ازای میزان قدر آنها تا قدر ۸ نمایش می‌دهد.

مشخصات سنجنده مورد استفاده برای شبیه‌سازی در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود از دو میدان دید باریک ($10^\circ \times 10^\circ$) و عریض ($18^\circ \times 18^\circ$) برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

هیستوگرام تعداد ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید در شکل ۶ ملاحظه می‌شود. این دو هیستوگرام به‌ازای ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی در وضعیت‌های تصادفی به‌ازای دو میدان دید در نظر گرفته شده (۱۸ درجه و ۱۰ درجه) هستند. محور افقی تعداد ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید و محور قائم تعداد شبیه‌سازی‌های تصادفی را نشان می‌دهد که در آنها تعداد ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید



شکل ۷. تعیین مراکز ستاره بر روی تصویر شبیه‌سازی شده، (الف) تصویر شبیه‌سازی شده، (ب) مراکز ستاره تعیین شده بر روی تصویر.

الگوریتم شناسایی در ادامه آورده شده است. جدول جستجو با در نظر گرفتن بیشینه فاصله زاویه‌ای برابر 15° در مرحله آفلاین تشکیل، و با در نظر گرفتن سنجنده با میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$ تصویر شبیه‌سازی شده به دست آمد. پس از شبیه‌سازی تصویر، الگوریتم تعیین مرکز بر روی آن اعمال و مراکز ستاره با دقت زیر میکسل (0.47 میکرون) استخراج شد. همان گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، تعداد ۲۵ ستاره در تصویر شبیه‌سازی شده وجود دارد که از میان آنها ستاره‌های شماره ۱۱ و ۱۳ دو ستاره اضافه شده در روند ساخت تصویر هستند که در کاتالوگ وجود نداشتند، و به منظور ارزیابی استحکام الگوریتم شناسایی در مقابل حضور ستاره‌های اضافی موجود در تصویر معرفی شده‌اند.

با تعیین مراکز ستاره در تصویر، شناسایی ستاره‌ها از طریق الگوریتم رأی‌گیری هندسی قابل اجرا خواهد بود. نتایج مرحله‌های مختلف الگوریتم شناسایی در خصوص تصویر نمایش داده شده در شکل ۷ (الف) در جدول ۴ آورده شده است. ستون نخست این جدول شامل شماره ستاره‌های مرکزیابی شده است که در شکل ۷ (ب) دیده می‌شود. ستون‌های دوم و سوم به ترتیب شناسه نسبت داده شده به هر ستاره و تعداد آرای هر یک را نمایش می‌دهد که حاصل مرحله رأی‌گیری اولیه می‌باشند. همان گونه که در قسمت‌های پیشین ذکر گردید، در این مرحله شناسه‌ای که بیشترین تعداد آرا را کسب کرده باشد، به ستاره نسبت داده شده است، اما ممکن است این شناسه‌ها به

جدول ۳. ملزومات مورد نیاز برای الگوریتم شناسایی ستاره.

بیشینه فاصله زاویه‌ای	تعداد سطر	حافظه (بایت)
20°	۳۵۲۴۲۹	۸۴۵۸۸۲۴
15°	۲۰۱۶۹۲	۴۸۴۱۱۳۶
10°	۹۱۰۹۶	۲۱۸۶۸۳۲
5°	۲۳۴۸۱	۵۶۴۰۷۲

برابر هر یک از مقادیر مورد نظر بوده است. قابل ذکر است که منظور تعداد ستاره‌های با قدر کمتر از حد نهایی در نظر گرفته شده برای قدر ستاره‌ها (جدول ۲) می‌باشد. همان گونه که ملاحظه می‌شود در میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$ عمدتاً ۲۲ تا ۳۰ ستاره در میدان دید سنجنده ظاهر می‌گردد، در حالی که برای میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ این تعداد برابر ۶ تا ۱۳ می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که در میدان دید باریک ($10^\circ \times 10^\circ$) مناطق عاری از ستاره و یا به تعداد کم وجود دارد که می‌تواند فرآیند شناسایی و تعیین وضعیت را با مشکل مواجه نماید.

تعداد سطرها و همچنین حافظه مصرفی جدول جستجو، به‌ازای فواصل مختلف در جدول ۳ آورده شده است. با افزایش بیشینه فاصله زاویه‌ای، حجم محاسبات و حافظه مورد نیاز افزایش می‌یابد، با این وجود انتخاب مناسب مقدار این فاصله برای رسیدن به نتایج بهتر در مرحله شناسایی دارای اهمیت است.

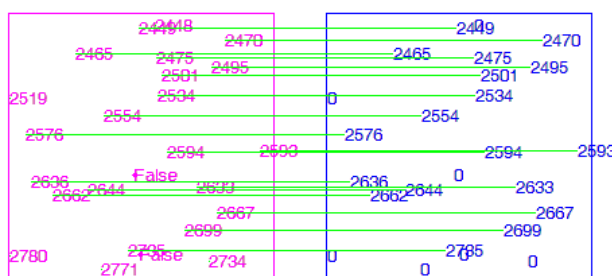
نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی شده و حاصل اعمال

جدول ۴. نتیجه الگوریتم شناسایی ستاره در رابطه با تصویر نمایش داده شده در شکل ۷ (الف).

شماره ستاره	شناسه ۱	تعداد آراء	تعداد آراء ۲	شناسه ۲
۱	۶۷۹	۴	۰	۰
۲	۹۷۴	۳	۰	۰
۳	۲۵۷۶	۱۵	۱۴	۲۵۷۶
۴	۲۶۳۶	۱۴	۱۳	۲۶۳۶
۵	۲۶۶۲	۱۲	۱۲	۲۶۶۲
۶	۲۴۶۵	۱۲	۱۲	۲۴۶۵
۷	۲۶۴۴	۱۹	۱۹	۲۶۴۴
۸	۲۷۷۱	۷	۶	۰
۹	۲۵۵۴	۱۹	۱۸	۲۵۵۴
۱۰	۲۷۳۵	۱۱	۱۱	۲۷۳۵
۱۱	۱۵۵۰	۴	۰	۰
۱۲	۲۴۴۹	۱۵	۱۵	۲۴۴۹
۱۳	۱۰۶۲	۴	۰	۰
۱۴	۲۴۴۸	۱۰	۹	۰
۱۵	۲۴۷۵	۱۸	۱۷	۲۴۷۵
۱۶	۲۵۳۴	۱۷	۱۷	۲۵۳۴
۱۷	۲۵۰۱	۱۴	۱۴	۲۵۰۱
۱۸	۲۵۹۴	۱۵	۱۵	۲۵۹۴
۱۹	۲۶۹۹	۱۶	۱۶	۲۶۹۹
۲۰	۲۶۳۳	۱۷	۱۷	۲۶۳۳
۲۱	۲۷۳۴	۸	۸	۰
۲۲	۲۴۹۵	۱۳	۱۳	۲۴۹۵
۲۳	۲۶۶۷	۱۲	۱۲	۲۶۶۷
۲۴	۲۴۷۰	۱۱	۱۱	۲۴۷۰
۲۵	۲۵۹۳	۱۳	۱۳	۲۵۹۳

ازای تمامی ستاره‌ها صحیح نباشد. از این رو، یک مرحله ارزیابی برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده در مرحله شناسایی اولیه ضروری خواهد بود. در مرحله ارزیابی، به ازای هر دو ستاره شناسایی شده توسط الگوریتم، تشابه فواصل آنها در تصویر و همچنین متناظر آنها در کاتالوگ بررسی می‌گردد. در صورت مشابه بودن این دو فاصله، به هر یک از دو شناسه یک رأی تعلق خواهد گرفت. ستون چهارم جدول ۴ تعداد آراء

حاصل از این مرحله را نمایش می‌دهد. شناسه نهایی در این مرحله پس از اعمال یک الگوریتم خوشه‌بندی حاصل خواهد گردید. همان‌گونه که دیده می‌شود بیشترین تعداد آرای کسب شده برابر ۱۸ است؛ بنابراین، شناسه‌های متناظر با تعداد آرای ۰، ۶، ۹، ۸، یعنی ستاره‌های شماره ۱، ۲، ۸، ۱۱، ۱۳، ۱۴، و ۲۱ به دلیل عدم کسب تعداد آرای کافی از لیست شناسه‌ها حذف خواهند شد. ستاره‌های ۱۱ و ۱۳ دو ستاره اضافه شده در روند



شکل ۸. نتیجه الگوریتم شناسایی ستاره، سمت چپ: شناسه‌های حقیقی واقع بر روی کاتالوگ، سمت راست: شناسه‌های حاصل از الگوریتم شناسایی.

هر ستاره، یک مقدار برای الگوریتم تعیین مرکز به دست می‌آید. به منظور رسیدن به یک مقدار قابل اطمینان‌تر برای دقت الگوریتم تعیین مرکز، مقادیر دقت‌های حاصل از ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی تصادفی میانگین‌گیری شد تا یک مقدار متوسط به دست آید. این مقدار متوسط برابر $۴/۰۰۲$ میکرون به دست آمده است. از سوی دیگر انحراف معیار مقادیر دقت‌های حاصل از این ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی نیز محاسبه شد تا شاخصی برای انحراف از مقدار میانگین به دست آمده وجود داشته باشد. انحراف معیار نیز مقداری برابر با $۱/۰۲۵$ به دست آمده است.

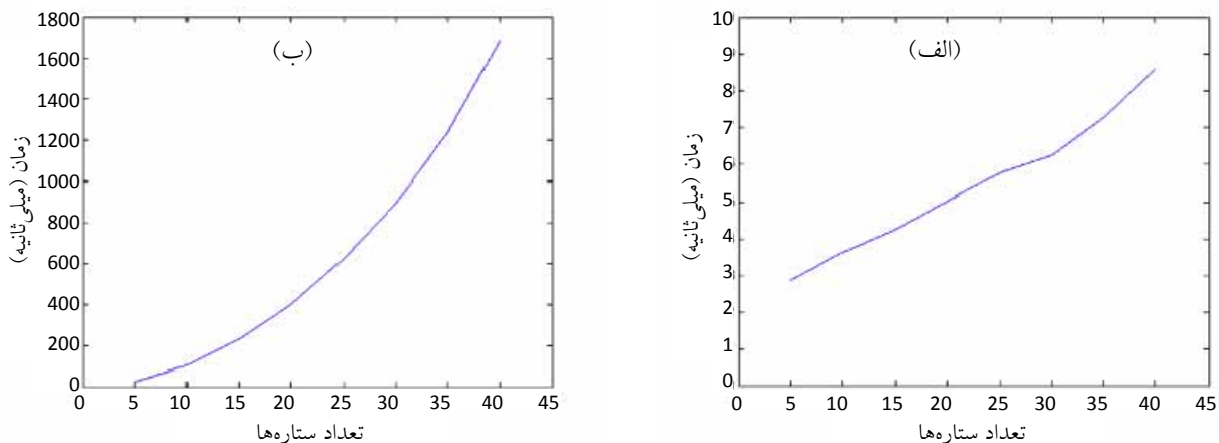
زمان اجرای الگوریتم تعیین مرکز و همچنین الگوریتم شناسایی ستاره بر حسب میلی ثانیه در شکل ۹ (الف) و (ب) دیده می‌شود. با افزایش تعداد ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید، زمان اجرای هر دو الگوریتم افزایش می‌یابد. قابل توجه است که روند افزایش در مورد الگوریتم تعیین مرکز به صورت خطی و در مورد الگوریتم شناسایی به‌طور نمایی می‌باشد.

شکل ۱۰ هیستوگرام نسبت ستاره‌هایی که به درستی شناسایی شده‌اند را نمایش می‌دهد.

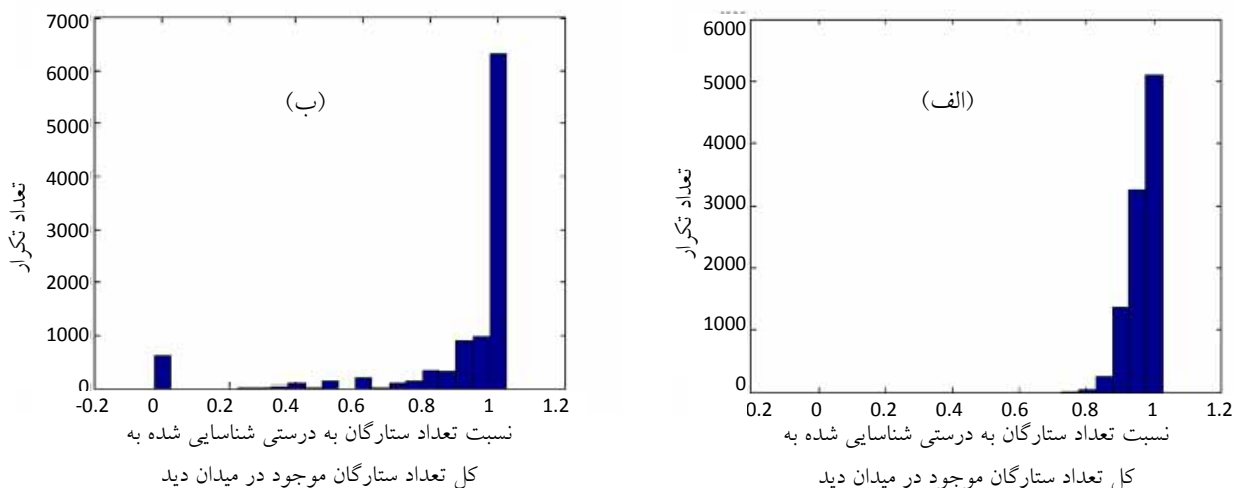
همان‌گونه که دیده می‌شود، در مورد میدان دید عریض (شکل ۱۰ الف)) که تعداد کافی از ستاره‌های همواره در میدان دید ظاهر می‌شود، الگوریتم شناسایی موفق شده است درصد بالایی از ستاره‌های را شناسایی نماید. در این میدان دید همواره بیش از ۷۰ درصد ستاره‌های مشاهده شده در تصویر شناسایی گردیده‌اند و در بیشتر جهت‌گیری‌ها نیز الگوریتم توانسته است ۱۰۰ درصد ستاره‌های مشاهده شده در تصویر را شناسایی نماید. در مورد میدان دید باریک (شکل ۱۰ ب)) که در برخی مواقع تعداد کافی از ستاره‌ها برای شناسایی در میدان دید

شبیه‌سازی بودند که الگوریتم نیز برای آنها شناسه‌ای اختصاص نداد. سایر شناسه‌هایی که به دلیل عدم کسب تعداد آرای کافی در مرحله ارزیابی حذف گردیدند، (ستاره‌های شماره ۱، ۲، ۸، ۱۴، و ۲۱) در حاشیه‌های تصویر قرار دارند و همین موجب شده است که اتصال آنها به تعداد کمتری از ستاره‌ها برقرار شده و در نتیجه تعداد آرای کسب شده برای آنها در مرحله ارزیابی به حد نصاب نرسد. بنابراین، مادامی که تعداد کافی از ستاره‌های در سطح تصویر وجود داشته باشد، الگوریتم شناسایی با موفقیت قادر به شناسایی ستاره‌ها خواهد بود. نتایج نهایی الگوریتم شناسایی در شکل ۸ دیده می‌شود. در این شکل، تناظرهای یافت شده میان ستاره‌های کاتالوگ (سمت چپ) و ستاره‌های تصویر (سمت راست) با خطوط سبز رنگ نمایش داده شده است.

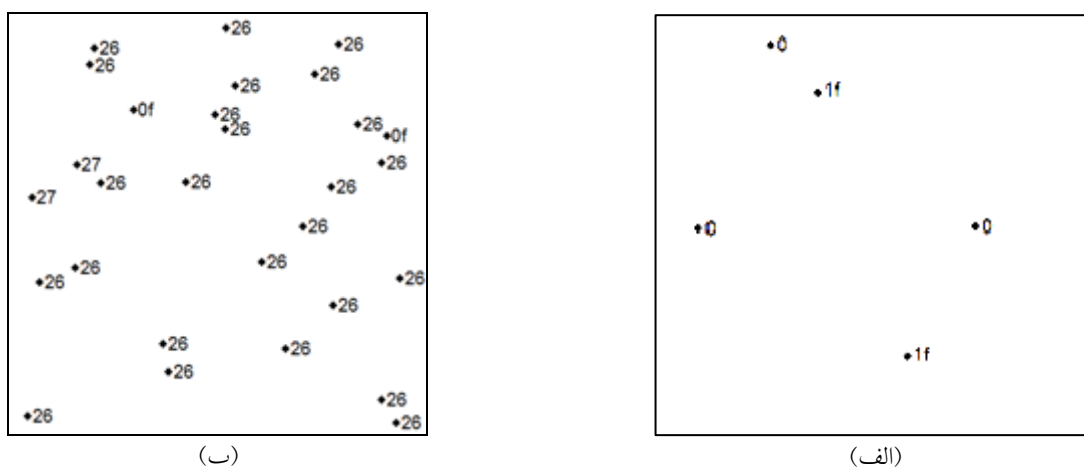
به منظور ارزیابی الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده، تصاویری با مشخصات ذکر شده برای سنجنده (جدول ۲) در ۱۰۰۰۰ جهت‌گیری تصادفی شبیه‌سازی گردید. دقت متوسط به دست آمده برای الگوریتم تعیین مرکز در این آزمون‌ها برابر $۴/۰۰۲$ میکرون با انحراف معیار $۱/۰۲۵$ می‌باشد؛ که در مقایسه با ابعاد پیکسلی مورد استفاده (جدول ۲، ۱۰ میکرون) مقدار کوچکی دارد. از آنجایی که تصاویر شبیه‌سازی شده هستند، موقعیت حقیقی مراکز ستاره‌ها در هر تصویر در دسترس است. از سوی دیگر موقعیتی که توسط الگوریتم تعیین مرکز ستاره به دست می‌آید در الگوریتم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اختلاف میان این دو سری مختصات (مختصات حقیقی و مختصات حاصل از الگوریتم تعیین مرکز) دقت تعیین مرکز را مشخص می‌نماید. در هر تصویر با میانگین‌گیری از دقت‌های به دست آمده برای



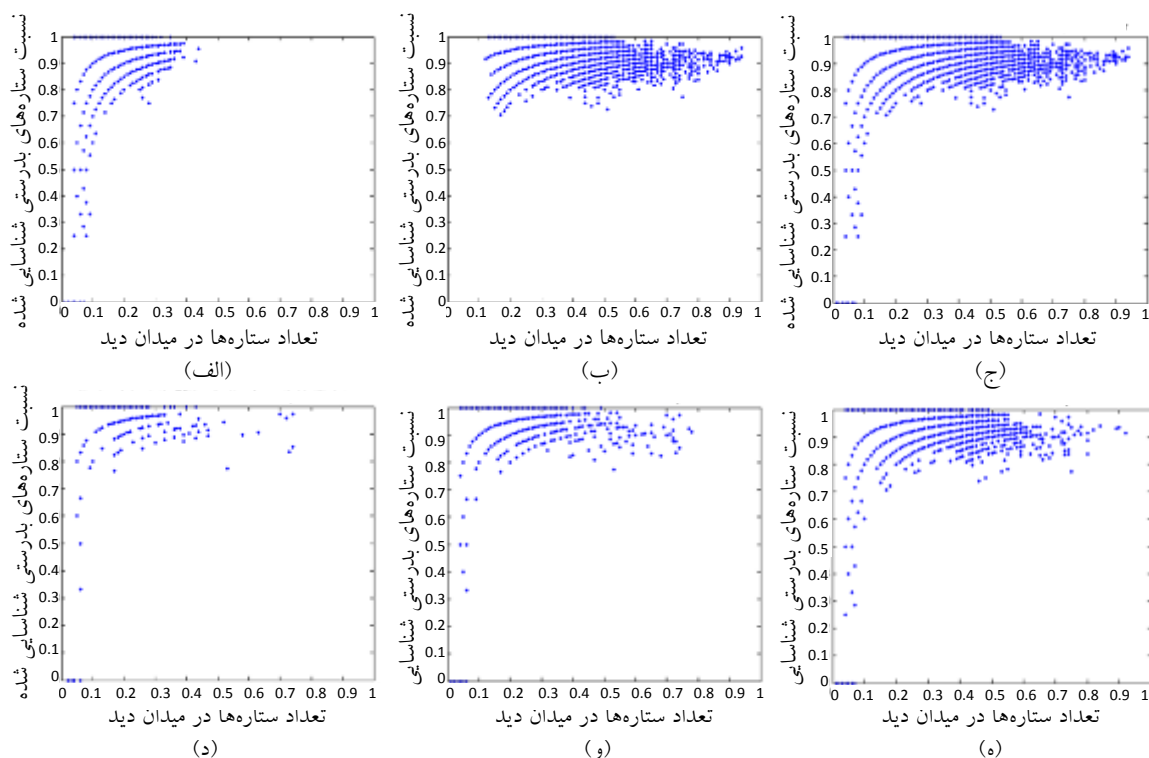
شکل ۹. زمان اجرای الگوریتم مرکزی ستاره (الف) و الگوریتم شناسایی ستاره (ب)، به ازای تعداد ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید.



شکل ۱۰. هیستوگرام نسبت ستاره‌های به درستی شناسایی شده برای (الف) میدان دید عریض، (ب) میدان دید باریک.



شکل ۱۱. نمونه‌ای از نتایج الگوریتم شناسایی، (الف) میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ (ب) میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$.



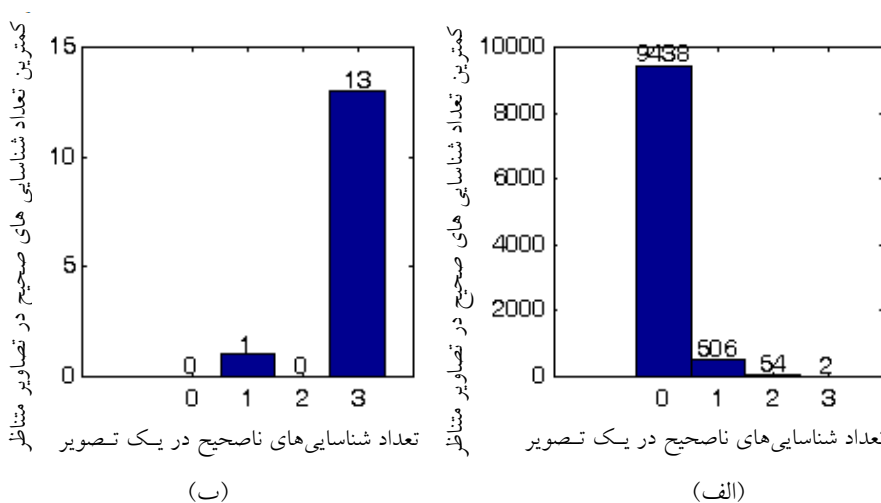
شکل ۱۲. نسبت تعداد ستاره‌های به درستی شناسایی شده به ازای تعداد مختلف ستاره‌های مشاهده شده برای: (الف) $10,000$ شبیه‌سازی تصادفی در میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ ، (ب) $10,000$ شبیه‌سازی تصادفی در میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$ ، (ج) $20,000$ ، (د) 250 ، (و) 1000 و (ه) 5000 ، شبیه‌سازی تصادفی در دو میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ و $18^\circ \times 18^\circ$.

میدان دید، نسبت تعداد ستاره‌هایی که به درستی شناسایی شده‌اند، به صورت مجانبی به سمت ۱ میل می‌نماید. با دقت بیشتر در دو نمودار نمایش داده شده می‌توان دریافت که این دو نمودار از روندهای یکسانی تبعیت می‌کنند. تنها اختلاف در بازه قرارگیری آنها است (تعداد ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید) که وابسته به میدان دید مورد استفاده دارد (به ازای میدان دید باریک در بازه $[0, 45]$ ، و به ازای میدان دید عریض در بازه $[10, 95]$). بنابراین، می‌توان دو نمودار را تلفیق نموده و نمودار نمایش داده شده در شکل ۱۲ (ج) را به دست آورد. در نتیجه نمودار حاصل، نسبت تعداد ستاره‌هایی که توسط الگوریتم به درستی شناسایی شده‌اند را در بازه $[95, 0]$ به ازای $20,000$ شبیه‌سازی تصادفی نمایش می‌دهد.

با دقت به شکل ۱۲ می‌توان نتیجه گرفت که در ابعاد تصویری در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، حضور ۸ تا ۵۰ ستاره در میدان دید، نتایج رضایت بخشی را ارائه می‌دهد، چرا که

سنجیده وجود نداشته است، الگوریتم شناسایی موفق نبوده است. نمونه‌ای از این دو وضعیت در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود. شکل ۱۱ (الف) مربوط به یک جهت‌گیری تصادفی در میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ می‌باشد که به دلیل کم بودن تعداد ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید، الگوریتم قادر به شناسایی هیچ یک از ستاره‌ها نبوده است. شکل ۱۱ (ب) نمونه‌ای از جهت‌گیری‌های تصادفی در میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$ را نمایش می‌دهد که تمامی ستاره‌ها به درستی شناسایی شده‌اند.

شش نمودار نمایش داده شده در شکل ۱۲، نسبت تعداد ستاره‌هایی که توسط الگوریتم به درستی شناسایی شده‌اند را به ازای تعداد مختلف ستاره‌های ظاهر شده در میدان دید نمایش می‌دهد. شکل ۱۲ (الف) حاصل 10000 شبیه‌سازی تصادفی با میدان دید $10^\circ \times 10^\circ$ و شکل ۱۲ (ب) حاصل 10000 شبیه‌سازی تصادفی با میدان دید $18^\circ \times 18^\circ$ می‌باشد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد ستاره‌های مشاهده شده در

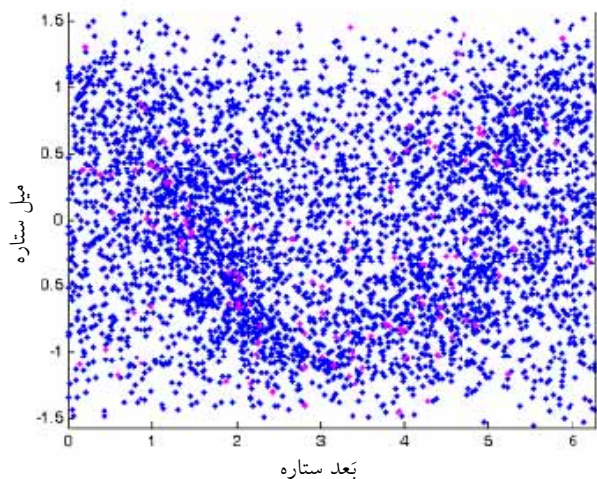


شکل ۱۳. نمایش شناسایی‌های ناصحیح، (الف) هیستوگرام تعداد فریم‌های دارای شناسایی ناصحیح، (ب) کمترین تعداد شناسایی‌های صحیح به ازای تعداد شناسایی‌های ناصحیح در هر فریم.

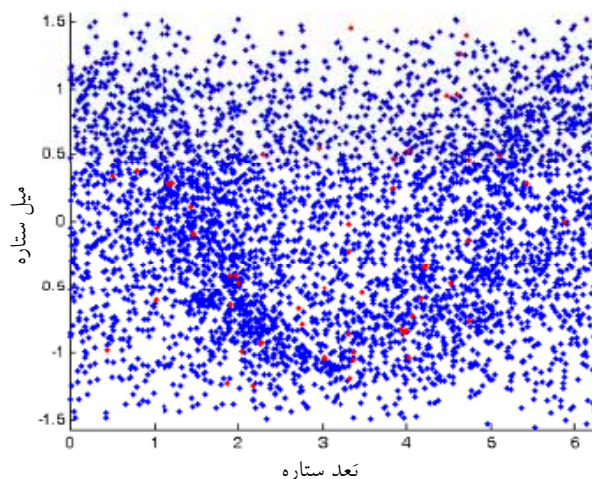
مشاهده شده در میدان دید نمودارها متراکم‌تر می‌گردند، به بیان دیگر تعداد آنها افزایش و فاصله آنها از هم کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار را می‌توان بدین گونه شرح داد که با تعداد نقاط کمتر تعداد کمتری از گراف‌ها حاصل می‌گردد و هرچه تعداد نقاط بیشتر باشد، تعداد گراف‌های ممکن که می‌توان با آنها تشکیل داد، افزایش می‌یابد. اما، بایستی در نظر داشت که نقاط یاد شده در تمامی موارد در یک محدوده مکانی مشخص (محدوده میدان دید سنجنده) قرار دارند؛ از این رو، با افزایش تعداد گراف‌ها تشابه آنها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه نمودارهای بیان شده در قسمت‌های مربوط به تعداد نقاط بیشتر به هم نزدیک‌تر هستند.

به منظور داشتن دیدی از احتمال وقوع بخش‌های مختلف نمودار، نتایج حاصل از ۲۵۰ تا ۲۰,۰۰۰ شبیه‌سازی تصادفی در نمودارهای مجزایی نمایش داده شده است (شکل ۱۲ ج) تا (ه). بدیهی است که احتمال وقوع نقاط نمایش داده شده در نمودارها با افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها به تدریج کاهش می‌یابد، به بیان دیگر نقاط نمایش داده شده در نمودارهای (د)، (و)، (ه) و (ج) به ترتیب احتمال قرار دارند. همچنین، نمودارهای شکل ۱۳ نمایشی از شناسایی‌های ناصحیح الگوریتم تناظریابی می‌باشد. شکل ۱۳ (الف) فراوانی تعداد فریم‌های با تعداد مختلف شناسایی‌های ناصحیح را به ازای ۱۰,۰۰۰ شبیه‌سازی

الگوریتم قادر خواهد بود بیش از حدود ۷۰ درصد ستاره‌های مشاهده شده در تصویر را شناسایی نماید، که برای اهداف یک ردیاب ستاره‌ای کافی خواهد بود، بدین دلیل که شناسایی حداقل دو ستاره تعیین وضعیت سکوا را امکان‌پذیر می‌نماید. بنابراین، در انتخاب میدان دید بایستی این نکته در نظر گرفته شود که تا جای ممکن حداقل تعداد ستاره‌های مورد نیاز برای شناسایی مطمئن تأمین گردد. همچنین، آن گونه که دیده می‌شود، با افزایش تعداد ستاره‌ها از یک حد نهایی به بعد (۵۰ ستاره در شکل) درصد ستاره‌هایی که به درستی شناسایی شده‌اند، کاهش می‌یابد. بنابراین، با وجود افزایش تعداد ستاره‌هایی که در الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعداد شناسایی‌های صحیح افزایش نمی‌یابد. از سوی دیگر، همان گونه که در نمودار زمان اجرای الگوریتم (شکل ۹) مشاهده گردید، با افزایش تعداد ستاره‌های استفاده شده در الگوریتم، زمان اجرا به صورت نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب حد بیشینه‌ای برای ستاره‌های مورد استفاده در الگوریتم، سرعت را افزایش خواهد داد. مورد دیگری که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد، تعدد نمودارهای نمایی است که ناشی از ترکیب‌بندی مختلف ستاره‌ها در داخل کاتالوگ می‌باشد. تعداد این نمودارها و فاصله آنها از هم وابسته به تعداد ستاره‌های مشاهده شده در میدان دید است، به گونه‌ای که با افزایش تعداد ستاره‌های



شکل ۱۵. توزیع ستاره‌های دوتایی موجود در کاتالوگ.



شکل ۱۴. توزیع ستاره‌های دارای شناسایی ناصحیح.

۰۲٪ دارای ۱ شناسایی ناصحیح بوده‌اند (شکل ۱۶). بررسی فریم‌های دارای شناسایی اشتباه در این حالت علت شناسایی‌های ناصحیح را به دلیل حضور تصافی ستاره‌هایی دانست که به عمد در داخل فریم‌ها به عنوان ستاره اشتباه معرفی شده بودند. این ستاره‌ها در برخی فریم‌ها به طور تصادفی در کنار یک ستاره مرجع موجود در کاتالوگ ظاهر و در نتیجه یک ستاره دوتایی مصنوعی تولید شده بود.

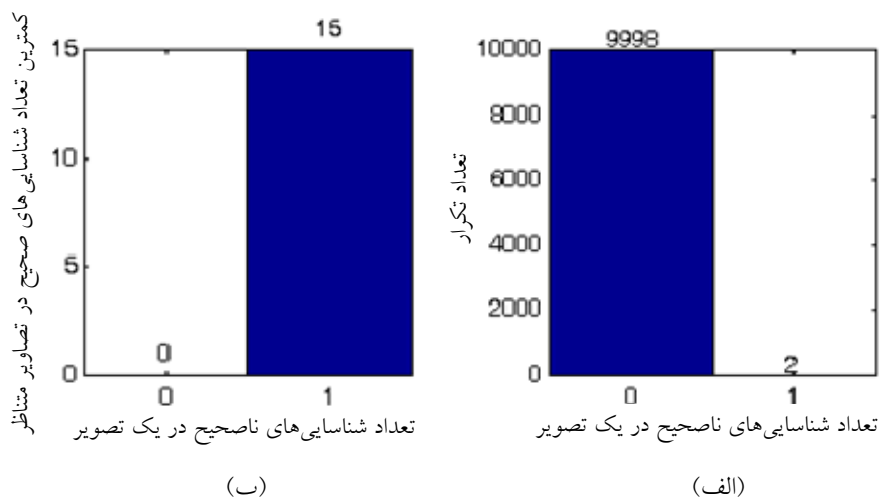
۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، الگوریتمی بر مبنای رأی‌گیری هندسی برای شناسایی ستاره‌ها در ردیاب‌های ستاره‌ای ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، تصاویر حاصل از عملکرد ردیاب ستاره‌ای شبیه‌سازی، و الگوریتم شناسایی ستاره بر روی این تصاویر اعمال گردید. از آنجایی که الگوریتم بیان شده، تنها از اطلاعات هندسی در روند تناظریابی استفاده می‌کند، نسبت به خصوصیات فتومتریک سنجنده که در طول عملکرد آن ممکن است تغییر نماید، حساس نیست. اگرچه، می‌توان اطلاعات رادیومتریک را نیز به عنوان یک پارامتر پشتیبانی در شناسایی ستاره مورد استفاده قرار داد.

ارزیابی نتایج حاصل نشان داد، در شرایط مختلف، تا زمانی که تعداد کافی از ستاره‌ها در سطح تصویر وجود داشته باشد، الگوریتم از پایداری بالایی در شناسایی ستاره‌های مشاهده شده

تصادفی نمایش می‌دهد. آن گونه که دیده می‌شود، ۹۴/۳۸٪ فریم‌ها عاری از شناسایی ناصحیح بوده‌اند؛ ۵/۰۶٪ دارای ۱ شناسایی ناصحیح، ۰/۵۴٪ دارای ۲ شناسایی ناصحیح، و ۰/۰۲٪ دارای ۳ شناسایی ناصحیح بوده‌اند. شکل ۱۳ (ب) کمترین تعداد شناسایی‌های صحیح را به ازای تعداد شناسایی‌های ناصحیح در هر فریم نمایش می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، کمترین تعداد شناسایی‌های صحیح در فریم‌های با ۰ شناسایی ناصحیح برابر ۰، در فریم‌های با ۱ شناسایی ناصحیح برابر ۱، در فریم‌های با ۲ شناسایی ناصحیح برابر ۰، و در فریم‌های با ۳ شناسایی ناصحیح برابر ۱۳ می‌باشد. بنابراین بایستی تعداد این شناسایی‌های ناصحیح تا جای ممکن کاهش یابد. نتیجه بررسی فریم‌های دارای شناسایی ناصحیح حاکی از آن است که حضور ستاره‌های دوتایی در فریم می‌تواند موجب شناسایی ناصحیح گردد.

شکل ۱۴ توزیع ستاره‌های دارای شناسایی ناصحیح را نمایش می‌دهد. مقایسه این شکل با توزیع ستاره‌های دوتایی موجود در کاتالوگ مورد استفاده (شکل ۱۵)، انطباق آنها را در بیشتر نقاط نتیجه می‌دهد. از این رو، به منظور به حداقل رسانیدن تعداد شناسایی‌های ناصحیح، ستاره‌های دوتایی از داده‌های کاتالوگ حذف گردید. نتایج شناسایی ۱۰۰۰۰ شبیه‌سازی تصادفی پس از حذف ستاره‌های دوتایی حاکی از آن بود که ۹۹/۹۸٪ از فریم‌ها بدون شناسایی ناصحیح، و تنها



شکل ۱۶. نمایش شناسایی‌های ناصحیح، (الف) هیستوگرام تعداد فریم‌های دارای شناسایی ناصحیح، (ب) کمترین تعداد شناسایی‌های صحیح، به‌ازای تعداد شناسایی‌های ناصحیح در هر فریم، پس از حذف ستاره‌های دوتایی از کاتالوگ.

ستاره به کار گرفته شده و امکان افزایش ضریب موفقیت مورد با این ترتیب مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه نتایج حاصل بیانگر موفقیت بالای روش پیشنهادی در تناظریابی ستاره‌ها می‌باشد، تحقیقات دیگری در زمینه افزایش سرعت تناظریابی و تلفیق اطلاعات حاصل از دیگر سنجنده‌ها از قبیل GPS و IMU با ردیاب ستاره‌ای در روند تناظریابی توصیه می‌گردد.

در تصویر و حذف تناظریابی‌های اشتباه برخوردار می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که حضور ستاره‌های دوتایی می‌تواند موجب بروز شناسایی‌های ناصحیح شد. بنابراین، انجام پیش‌پردازش‌هایی بر روی کاتالوگ ستاره‌ای مورد استفاده به منظور جلوگیری از مشکلاتی که حضور ستاره‌های دوتایی می‌تواند موجب آن گردد، پیشنهاد می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود زاویه بین اشکال به وجود آمده، علاوه بر فاصله زاویه‌ای میان ستاره‌ها در طی روند شناسایی

مراجع

1. K M Huffman, "Designing Star Trackers to Meet Microsatellite Requirements", Master thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, USA (2006).
2. J A Tappe, "Development of Star Tracker System for Accurate Estimation of Spacecraft Attitude", Master thesis, Naval Postgraduate School, USA (2009).
3. J Padro, "Development of a star tracker-based reference system for accurate attitude determination of a simulated spacecraft", Master thesis, Department of The Air Force, Air University, USA (2012).
4. M W Knutson, "Fast Star Tracker Centroid Algorithm for High Performance CubeSat with Air Bearing Validation", Master thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, USA (2012).
5. J Xie, X Tang, W Jiang, and X Fu, "An Autonomous Star Identification Algorithm Based on The Directed
6. M A Samaan, "Toward Faster and More Accurate Star Sensors Using Recursive Centroiding and Star Identification", PHD thesis, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, USA (2003).
7. K Svartveit, "Attitude determination of the NCUBE satellite", Master thesis, Department of Engineering Cybernetics, NTNU Norges Teknisk-naturvitenskapelige University, Norway (2003).
8. D Ying, X Fei, and Y Zheng, *Tsinghua Science and Technology* **11**, 5 (2006) 543.
9. M Kolomenkin, S Polak, M Lindenbaum and I Shimshoni, *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems* **44**, 2 (2008) 441.
10. M M Space and A Spazio, "The Hipparcos and Tycho Catalogues", Vol. 1, Introduction and Guide

18. H Zhang, X Jiang, and S Chen, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **48**, 1 (2013) 094.
19. D Accardo and G Rufino, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, **38**, 3 (2002) 813.
20. G C Holst, "CCD Arrays, Cameras, and Displays", 2nd ed. Winter Park, JCD Publishing, and Bellingham, WA (1998).
21. E Groth, *Astronomical Journal* **91** (1986) 1244.
22. H Kim and J L Junkins, *IEEE Aerospace Conference Proceedings* **5** (2002) 2275.
23. C Padgett, K Kreutz-Delgado, and S Udomkesmalee, *Journal of Guidance, Control and Dynamics* **20**, 2 (1997) 259.
24. C Liebe, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* **7**, 6 (1993) 34.
25. C Hirt, B Bürki, A Somieski, and G Seeber, *Journal of Surveying Engineering* **136**, 1 (2010) 1.
26. M J Swanzy, "Analysis and Demonstration: A Proof-of-Concept Compass Star Tracker", Master thesis, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, USA (2005).
- to Data. European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands (1997).
11. E Jalabert, E Fabacher, N Guy, S Lizy-Destrez, W Rappin, and G Rivier, "Optimization of Star Research Algorithm for ESMO Star Tracker", 8th International ESA Conference on Guidance, Navigation & Control Systems, Carlsbad, Czech Republic (2011).
12. H Lee, C S Oh, and H Bang, "Modified Grid Algorithm for Star Pattern Identification by Using Star Trackers", Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey 20-22 (2003).
13. M A Samaan, D Mortari, and J L Junkins, *Journal of the Astronautical Sciences* **54**, 1 (2006) 95.
14. J Gong, L Wu, J Gong, J Ma, and J Tian, "A Flower Algorithm for Autonomous Star Identification in Space Surveillance", International symposium on multispectral image processing and pattern recognition MIPPR 6th (2009).
15. S S Miri and M E Shiri, *International Journal of Modeling and Optimization* **2**, 3 (2012) 234.
16. W Quan and J Fang, *Sensors* **10**, 3 (2010) 1955.
17. V Tabur, *Publications of the Astronomical Society of Australia* **24**, 4 (2007) 189.