

تشخیص اتوماتیک ستارگان در یک سامانه نجومی بینایی مبنا برای ردیابی ماهواره‌ها

محمدعلی شریفی^{*}، سعید فرزانه^۲، محمدرضا سیف^۳

۱- دانشیار ۲ و ۳- دانشجوی دکتری دانشگاه تهران

(دریافت: ۹۳/۰۸/۰۴، پذیرش: ۹۴/۰۳/۰۷)

چکیده

امروزه ماهواره‌های جاسوسی نقش مهمی در کسب اطلاعات نظامی بویژه اطلاعات تصویری ایفا می‌کنند. لذا یکی از ضروریات دفاعی، کاهش توانایی‌های آنها در خصوص جمع‌آوری اطلاعات می‌باشد، که این مهم تنها از راه رهگیری ماهواره‌ها و پیش‌بینی مدار آنها ممکن است. امروزه با در اختیار قرار گرفتن دوربین‌های رقومی با کیفیت‌ها و صحت بالا فصل جدیدی در کاربردهایی نظیر تعیین وضعیت و ردیابی ماهواره گشوده شده است. در این روش با استفاده از یک CCD^۱ و به‌کارگیری یک تلسکوپ مناسب می‌توان رد پای ماهواره و ستارگان را ثبت نمود. در این راستا دستیابی به روشی سریع با دقت بالا در انطباق ستارگان استخراج شده از تصویر با مختصات سماوی آنها بسیار مهم می‌باشد تا بتوان به کمک آنها مدار ماهواره‌های ثبت‌شده در تصویر را تعیین و نهایتاً پیش‌بینی نمود. در این مقاله، مراکز ستاره‌ها در تصویر با استفاده از روش‌های پیشرفته پردازش تصویر با دقت بهتر از ابعاد پیکسل استخراج شده‌اند. در این فرآیند با استفاده از تئوری حرکت همگرا، ستارگان متناظر کشف و سپس با استفاده از الگوریتم MSAC^۲ نقاط پرت حذف شده‌اند. نتایج حاصل بر روی تصاویر نمونه بیانگر دستیابی به انحراف معیاری برابر 10^{-3} پیکسل در انطباق نقاط می‌باشد.

کلید واژه‌ها: ردیابی ماهواره، CCD، شناسایی ستارگان، MSAC

Automatic Star Detection in an Astronomical Vision-Based Instrument for Satellite Tracking

M. A. Sharifi^{*}, S. Farzaneh, M. R. Seif

University of Tehran

(Received: 26/10/2014; Accepted: 28/05/2015)

Abstract

Today, Spy satellite play a major role in obtaining the military information, especially imaging. Then, one of the defensive essentials is to reduce the satellite ability in the data collection. It will be applicable only with the satellite tracking and orbit prediction. The related preventive measures fall into two categories, namely passive defence and active defence. For this purpose, the precise orbit determination is the key factor. From the passive perspective, it is possible to camouflage the strategic activities through determining the satellite tracking and passing time. Today, the digital cameras with relatively high geometric and radiometric accuracy has opened a new insight in the satellite attitude determination and tracking. In the automatic star detection, high precision and reliable in extraction of the star's centers from the captured images and corresponding them with the astronomical coordinates is the most important point. In this article, the star's centers are extracted by the advanced image processing technique with sub-pixel precision. Using the motion coherence theory, the corresponding stars are detected first, and the outliers are removed by MSAC algorithm afterwards. The suggested method was applied to the images taken by TZK2-D and Star-100 cameras and a standard deviation of 10^{-3} * pixel for point matching was achieved.

Keywords: Satellite Tracking, CCD, Star Detection, MSAC

*Corresponding Author E-mail: sharifi@ut.ac.ir

¹ Charge-Coupled Device

² M-estimator Sample and Consensus

۱. مقدمه

تلسکوپی می‌تواند مکان ماهواره‌های زمین ثابت را در پهنه آسمان با دقت نوعاً ۱ ثانیه (دویست متر) که به مراتب بهتر از اندازه‌گیری‌های زاویه‌ای آنتن ردیابی معمول است، در اختیار گذارد. به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان اظهار داشت که سامانه‌های ردیابی اپتیکی به لحاظ دقت در رتبه نخست قرار دارند. علاوه بر آن یکی از مهم‌ترین ملزومات تمامی ماهواره‌ها از بدو پیدایش، زیرسامانه تعیین و کنترل وضعیت می‌باشد، چرا که بدون آن عملاً بهره‌گیری از ماهواره در جهت انجام مأموریت‌های تعیین شده ممکن نیست. انجام مانورهای مختلف مداری و حتی حصول مدار از عمومی‌ترین ملزومات تمام این‌گونه سامانه‌ها با مأموریت‌های مختلف است. سامانه تعیین وضعیت که جزء جدایی‌ناپذیر سامانه کنترل ماهواره است، نقش به‌سزایی در الگوریتم‌های کنترلی ماهواره ایفا می‌کند.

به‌منظور توجیه ماهواره در یک سامانه مرجع اینرشیال تعیین وضعیت ماهواره امری حیاتی است. تعیین وضعیت عبارتست از محاسبه جهت ماهواره در فضا نسبت به یک مرجع و یا برخی اجرام سماوی مانند زمین که در این روند به‌کارگیری چند سنسور نصب‌شده بر روی ماهواره و استفاده از روش‌های مختلف پردازش و ترکیب داده‌های سنسوری امری اجتناب‌ناپذیر است. ذکر این نکته ضروریست که بررسی وضعیت یک ماهواره می‌تواند زمینه‌ای برای کنترل وضعیت و پیش‌بینی حرکت بعدی آن باشد که شامل دو قسمت پایدارسازی، جهت حفظ وضعیت موجود و کنترل مانور، برای تغییر از یک وضعیت به وضعیت دیگر است. به‌طور کلی وضعیت یک ماهواره صلب توسط سرعت زاویه‌ای و پارامترهای وضعیت نظیر زوایای اوایلر یا کوآرتزیون‌های^۱ آن تعیین می‌شود. پارامترهای وضعیت به حرکت چرخشی بدنه ماهواره حول مرکز جرم مربوط می‌شود و منظور از تعیین وضعیت، تخمین همین پارامترهای وضعیت یعنی کوآرتزیون می‌باشد. تعیین وضعیت در بسیاری از مأموریت‌های ماهواره نقش حیاتی دارد و ضرورت دارد که به دقت انجام گیرد. در صورتی که ماهواره مجهز به سامانه‌ای باشد که بتواند ستارگان را شناسایی نماید، می‌توان با استفاده از موقعیت ستارگان، موقعیت ماهواره را به‌دست آورد. به‌طوری که ماهواره قادر خواهد بود موقعیت خود را نسبت به زمین به‌منظور برقراری ارتباط مجدد بهبود بخشد. لازم به ذکر است که سامانه‌های تعیین موقعیتی نظیر GPS^۲ به دلیل عدم دسترسی به سیگنال آن در ارتفاعات بالا قادر نخواهد بود موقعیت ماهواره را تعیین کند. علاوه بر آن تجهیزات هم‌چون مغناطیس سنخ و حسگرهای خورشیدی دارای دقت کمتری نسبت به این دوربین‌های نجومی می‌باشند. وضعیت ماهواره را می‌توان با دقتی بهتر از ۱ ثانیه به وسیله روش جدید تعیین کرد.

در ابتدای قرن بیستم و یکم تغییرات اساسی در نجوم ژئودتیک با به‌کارگیری روش‌های الکترواپتیکیال نجوم ژئودتیک بوقوع پیوست [۵-۱]. به‌طوری که روشی با راندمان بالا، اتوماتیک و قابلیت آنی

امروزه ماهواره‌های جاسوسی (شناسایی) نقش بسیار مهمی در کسب اطلاعات نظامی به‌ویژه اطلاعات تصویری ایفا می‌کنند. بنابراین یکی از ضروریات دفاعی، کاهش یا از بین بردن توانایی‌های آن‌ها در خصوص اخذ و جمع‌آوری اطلاعات است. شیوه‌های مقابله با این تهدید جدی به دو دسته کلی پدافند غیرعامل و عامل تقسیم‌بندی می‌شود که شرط اساسی برای هر دو شیوه، پیش‌بینی دقیق مداری ماهواره‌ها می‌باشد. در نگاه پدافند غیرعامل می‌توان با ردیابی و دانستن زمان گذر ماهواره‌ها، فعالیت‌های حیاتی و حساس را از دید آن‌ها پنهان کرد. همچنین از دید پدافند عامل، با توجه به این‌که امروزه فناوری عملیات تهاجمی ضد فضایی در سرتاسر جهان در حال توسعه است، می‌توان با پیش‌بینی مداری ماهواره‌ها تخریب و یا از کار انداختن موقت سنجنده‌های آن‌ها به کمک ضد ماهواره‌های پرتابه‌ای (موشک‌های بالستیک) و پرتوی (میکروویو، لیزر و بیم ذره‌ای) را در دستور کار قرار داد. داشتن این قابلیت در زمان‌های بحرانی مانند جنگ‌ها بسیار مهم و حیاتی است. بنابراین یکی از مهم‌ترین ارکان استقلال در برنامه‌های فضایی هر کشور، داشتن توانایی ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها می‌باشد. به‌طور کلی فرآیند ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها را می‌توان به دو قسمت نسبتاً مجزای مشاهدات و محاسبات تقسیم کرد. مشاهدات به معنای جمع‌آوری داده‌هایی مرتبط با مکان ماهواره است که در قسمت محاسبات، از روی آن‌ها بر اساس روش‌ها و الگوریتم‌هایی ردیابی و تعیین مدار ماهواره انجام می‌پذیرد. اطلاعات مورد اشاره با تصویربرداری از آسمان در یک اپک مشخص حاصل می‌شود. از آنجا که سامانه‌های ردیاب مربوط به نظارت فضا می‌بایست توانایی شناسایی هر گونه جسم مداری اعم از ماهواره‌های فعال، فضاپیما‌های در حال مانور، اجسام گم‌شده و اجسام طبیعی سرگردان در فضا را داشته باشد، امکان استفاده از سامانه‌های ردیابی که بر اساس ارسال یا باز ارسال سیگنال الکترومغناطیسی توسط جسم مداری کار می‌کنند وجود ندارد به همین دلیل برای هدف نظارت و مراقبت فضایی عمدتاً از سامانه‌های ردیابی اپتیکی استفاده می‌شود.

تلسکوپ‌های عکس‌برداری که در زمره سامانه‌های ردیابی اپتیکی جای دارند، برای شناسایی فضاپیما‌های ناشناس و آشغال‌های فضایی ارتفاع ماهواره‌های زمین ثابت بسیار مناسب می‌باشند که از این‌رو از اجزای اصلی شبکه نظارت فضای ایالات متحده آمریکا به حساب می‌آید. امروزه به‌جای دوربین‌های اولیه Baker-Nunn که در آن‌ها فیلم‌های عکس‌برداری به‌کار می‌رفت تلسکوپ‌های GEODSS جایگزین شده‌اند که به سنسورهای الکتریکی مجهز می‌باشند. کاربرد دیگر تلسکوپ‌های نوری شامل نظارت بر مجموعه ماهواره‌های زمین آهنگ است که به‌صورت هماهنگ توسط یک مرکز کنترل واحد کنترل نمی‌شود. این کار سبب می‌شود که پیش از تصادم احتمالی این ماهواره‌ها آگاهی لازم به‌دست آید تا پیشگیری مربوطه صورت پذیرد. علاوه بر مزیت غیر فعال بودن کامل این روش، عکس‌های

^۱ Quaternion^۲ Global Positioning System

ستاره در میدان دید دوربین برای تشکیل اشکال هندسی مختلف از قبیل مثلث، مربع و غیره است و معمولاً فاصله زاویه‌ای بین نقاط را به‌عنوان ملاکی برای انطباق استفاده می‌کنند.

فاصله زاویه‌ای L_{ij} بین ستاره S_i و S_j به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{ij} = \text{Cos}^{-1}(\vec{r}_i \times \vec{r}_j) \quad (1)$$

به طوری که \vec{r} بردار مربوط به ستاره S_i در سامانه مختصات سماوی است.

مثلث‌بندی بین نقاط روش رایج و بهینه‌ای می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است. در این روش از ستارگان برای مثلث استفاده می‌شود و با توجه به قدر ستاره و فاصله زاویه‌ای آن‌ها ستارگان نظیر آن‌ها در کاتالوگ تعیین می‌گردند. اما به دلیل ابعاد پایین اشکال انتخابی این روش همواره با انطباق‌های نادرست همراه است. برای رفع ایراد ذکر شده تغییراتی در روش اعمال شده است در برخی روش‌ها بر روی قدر ستاره تأکید بیشتری شده است [۵]. به‌عنوان مثال روشن‌ترین ستاره به‌عنوان ستاره مرکزی انتخاب می‌شود [۸] که باعث کاهش حافظه مورد نیاز و افزایش صحت انطباق می‌گردد.

به‌منظور افزایش خصوصیات روش قبل، برای کاهش خطای انطباق اشکال هندسی دیگری مورد استفاده قرار گرفته است. مانند مثلث کروی که از مساحت و ممان قطبی به‌عنوان ملاکی برای انطباق استفاده می‌کنند [۱۲]. همچنین استفاده از مربع و تقسیم آن به دو مثلث مجاور با یک ضلع مشترک انتخاب دیگری است [۱۳].

روش‌های شبکه مبنا: این الگوریتم برای اولین بار توسط پاگت و کروتز دلگادو [۱۴] معرفی شده است. در این روش مسئله شناسایی ستاره به‌عنوان یک مسئله تشخیص الگو مطرح شد بدین معنی که برای هر ستاره یک الگو با توجه به ستارگان پیرامون آن تعریف می‌شود. بنابراین هر ستاره الگوی مخصوص به خود را دارا است که می‌بایست الگوی متناظر آن را در الگوهای تشکیل‌داده‌شده در کاتالوگ پیدا کرد. الگوی مربوط به هر ستاره به‌صورت زیر تشکیل می‌شود:

۱- انتخاب ستاره برای تشکیل الگوی مورد نظر.

۲- تشکیل یک شبکه $g \times g$ به مرکز ستاره انتخابی.

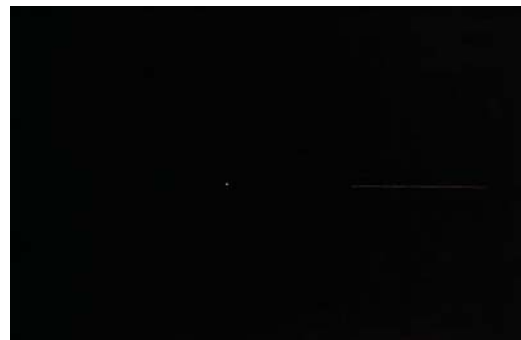
۳- تشکیل بردار الگو به طول g^2 . در صورت وجود ستاره در آرایه (i, j) از شبکه مؤلفه $g \times g + i$ از بردار یک و در غیر این صورت صفر است.

۴- جستجو در کاتالوگ برای نزدیک‌ترین الگو به الگوی تشکیل‌شده.

این روش نسبت به روش قبل از اعتبار بالاتری برای انطباق ستارگان برخوردار بوده و مناسب برای دوربین با میدان دید متوسط است. هر چند این روش محاسبات کمتری نسبت به حالت قبل دارا

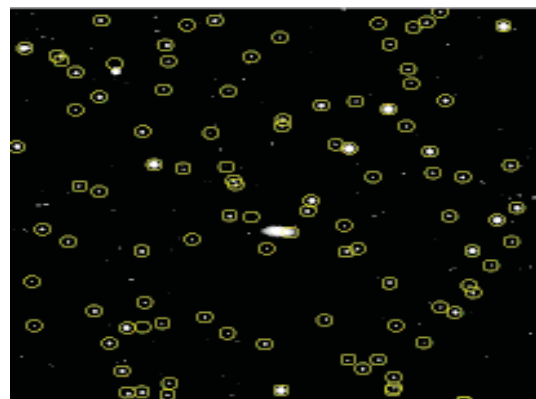
آنالیز داده‌ها است. به وسیله این روش می‌توان مختصات نجومی را با دقت بهتر از ۰/۰۱ ثانیه تعیین کنید [۶].

در این سامانه‌ها، CCD تصویری از ستارگان حول امتداد قائم تهیه می‌کند و پس از آن ستارگان استخراج شده از تصویر می‌بایست با ستارگان موجود در کاتالوگ شناسایی شده تا مختصات سماوی آن‌ها به‌دست آید. شکل (۱) نمونه‌ای از تصویر ثبت‌شده از ردپای ماهواره را نشان می‌دهد. یکی از مراحل اساسی روند فوق منطبق کردن ستارگان در سامانه مختصات پیکسلی و سماوی است، به عبارت دیگر پیدا نمودن نقاط متناظر و بهترین تبدیل بین نقاط از جمله مراحل کلیدی این روش می‌باشد.



شکل ۱. نمونه‌ای از تصویر ثبت شده از ردپای ماهواره

شکل (۲) تصویر نمونه‌ای از آسمان را نشان می‌دهد، پس از استخراج مراکز ستارگان با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر (دوایر زرد)، می‌بایست آن‌ها را با مختصات سماوی آن‌ها که از کاتالوگ استخراج شده است، منطبق نمود. از عواملی که می‌تواند باعث بروز مشکل شود وجود نقاط پرت در داده‌ها و همچنین وجود نویز در داده‌ها به دلیل خطای CCD است [۷].

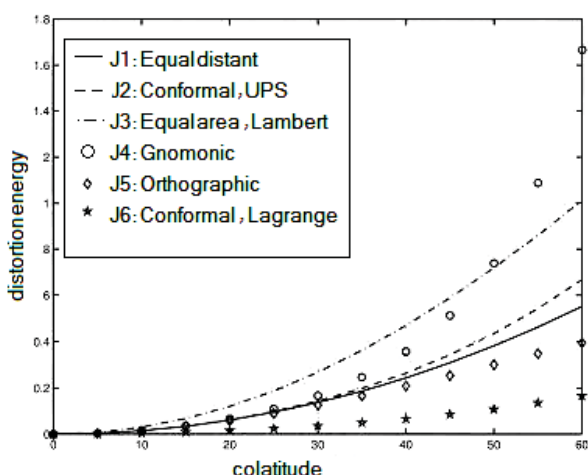


شکل ۲. تصویر آسمان در ایستگاه مورد نظر با استفاده از دوربین Star1000

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای حل این مسئله پیشنهاد شده است [۸-۱۱]. در حالت کلی می‌توان این روش‌ها را به سه دسته کلی: الف) روش‌های شکل مبنا، ب) روش‌های شبکه مبنا پ) روش‌های هوشمند، تقسیم‌بندی کرد.

روش‌های شکل مبنا: در این روش، ایده اساسی انتخاب تعدادی

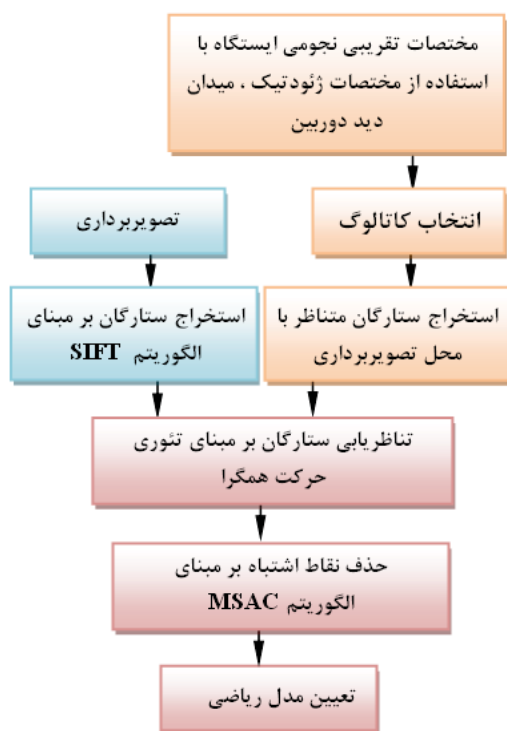
تصویر و کاتالوگ استفاده شده است.



شکل ۴. مقایسه اعوجاج ناشی از شش سامانه تصویر بر حسب فاصله از مرکز [۱۶]

۲. روش تحقیق

در این مقاله با استفاده از تئوری احتمال بیز ابتدا نقاط متناظر کشف و سپس توسط الگوریتم MSAC نقاط اشتباه حذف خواهد شد. به طوری که خواهیم دید الگوریتم پیشنهادی، روش مؤثری در کاهش زمان و حجم محاسبات نسبت به روش‌های پیشین دارد. علاوه بر آن به دلیل استفاده از الگوریتم MSAC امکان وجود خطا در تناظریابی از بین خواهد رفت. شکل (۵) فلوجارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد [۲۳].



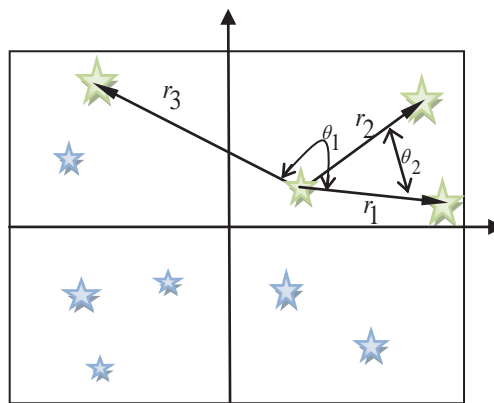
شکل ۵. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

قبل از بیان الگوریتم پیشنهادی لازم است برخی از مفاهیم مورد استفاده تشریح شود.

می‌باشد اما همچنان زمان بر و بدون کارایی در حالت‌هایی است که نقاط در یک سامانه دچار تغییر مقیاس شده‌اند و یا میدان دید دوربین کوچک باشد، خواهد بود [۹].

استفاده از الگوریتم شبکه عصبی: در این روش برای تشخیص الگو از شبکه‌های عصبی استفاده شده است. شبکه عصبی طراحی شده توسط لی و زانگ [۱۰] شامل زیرشبکه‌های موازی با الگوریتم پس‌انتشار خطا می‌باشد، ابتدا مطابق توزیع ستارگان در میدان دید دوربین یک ماتریس plane mapped به‌عنوان ورودی شبکه عصبی ایجاد می‌شود، سپس طبقه‌بندی معین می‌کند کدام زیرشبکه (با الگوریتم پس‌انتشار خطا) انتخاب شده در نهایت این زیرشبکه با داده‌های ورودی آموزش می‌بینند.

پالادوگو [۱۵] از شبکه کوهنن برای شناسایی ستاره استفاده کرده است. بردار طرح (F_V) ستاره مرکزی شامل بردار r و $\cos \theta$ ، شکل (۳) می‌باشد.



شکل ۳. تشکیل بردار طرح در روش شبکه عصبی [۱۵]

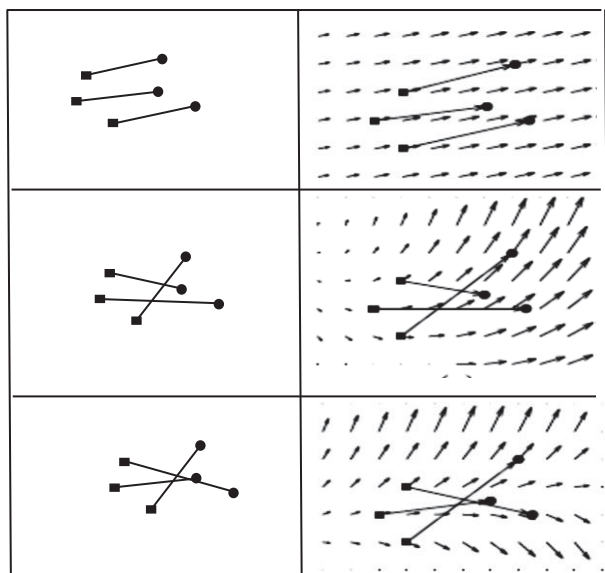
استفاده از الگوریتم ژنتیک: پالادوگو [۱۱] برای شناسایی الگو متناظر ستاره در کاتالوگ از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده است. بردار طرح شامل فاصله R بین ستاره مرکزی و تمام ستارگان موجود در FOV و کسینوس زاویه بین ستارگان (θ) در شکل (۳) می‌باشد.

$$P = [R_1, R_2, \dots, R_n, \cos \varphi_1, \cos \varphi_2, \dots, \cos \varphi_n] \quad (2)$$

این روش مشکل انطباق اشتباه و محاسبات پیچیده در روش‌های قبل را حل کرده است. اما همچنان زمان بر می‌باشد. همچنین همان‌طور که می‌دانید تصویربرداری از ستارگان بر اساس سامانه تصویر گنومونیک است [۱۶]. سامانه تصویر گنومونیک یک سامانه تصویر آزیموئال بوده و می‌توان آن را حول نقطه‌ای که محور دوربین متوجه آن است، برابر با سامانه تصویر متشابه در نظر گرفت (شکل (۴)). با توجه به این نکته نقاط در دو سامانه حول مراکزشان تقریباً بدون اعوجاج ناشی از سامانه تصویر بوده به طوری که با دور شدن از مرکز تصویر این اعوجاج بیشتر می‌شود. بنابراین روش‌های مذکور قابلیت خود را با دور شدن از مرکز تصویر از دست می‌دهند، چرا که در همه روش‌ها از وجود شرط تشابه بین ستارگان استخراج شده از

مدل آمیخته گوسی در نظر گرفته (Y_0) و تابع پیوسته سرعت V را برای این نقاط به گونه‌ای تعریف می‌شود که موقعیت ستاره در هر لحظه (Y) برابر است با:

$$Y = v(Y_0) + Y_0 \quad (4)$$



شکل ۶. انطباق مختلف دو دسته نقطه باعث ایجاد میدان‌های سرعت با مقادیر مختلف "همواری" می‌شوند، شکل اول نقاط به‌طور صحیح منطبق شده‌اند [۱۷]

تابع چگالی آمیخته گوسی را به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$p(x) = \sum_{m=1}^M \frac{1}{M} p(X | m) \quad (5)$$

به‌طوری که $X | m \propto N(y_m, \sigma^2 I_2)$ و Y مراکز دو بعدی تابع گوسین هموزن با کواریانس‌های برابر است. به‌منظور تحمیل شرط حرکت هموار قید زیر را اعمال می‌شود:

$$p(Y | \lambda) \propto \exp\left(-\frac{\lambda}{2} \phi(Y)\right) \quad (6)$$

$p(Y | \lambda)$ تابع احتمال اولیه نقاط عکسی و λ ثابت وزن و $\phi(Y)$ تابعی است که همواری حرکت را کنترل می‌نماید. با استفاده از قضیه بیز هدف یافتن Y به وسیله بیشینه کردن احتمال ثانویه (MAP^1) و یا به‌طور معادل کمینه کردن تابع انرژی زیر می‌باشد:

$$E(Y) = -\sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^M e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{x_n - y_m}{\sigma} \right|^2} + \frac{\lambda}{2} \phi(Y) \quad (7)$$

فرض می‌شود نقاط مستقل و دارای توزیع یکسان باشند، همچنین ترم‌های مستقل از Y را نادیده گرفته می‌شود. تابع ϕ بیانگر اطلاعات اولیه ما از حرکت است که می‌بایست در نهایت هموار باشد. به‌ویژه هدف ما هموار کردن میدان سرعت (V) تولیدشده به وسیله جابه‌جایی نقاط عکسی می‌باشد.

مدل آمیخته گوسی: مدل‌های آمیخته دسته‌ای از توابع چگالی بوده که از چند تابع توزیع (معمولاً گوسین) تشکیل یافته‌اند و برای تشکیل یک تابع توزیع چند مدی ترکیب یافته‌اند.

در مدل آمیخته گوسی فرض شده که هر x_i به‌طور مستقل از یک ترکیب با چگالی زیر ایجاد شده است:

$$f(x_i | \theta) = \sum_{k=1}^K p_k h(x_i | \mu_k, \Sigma_k) \quad (3)$$

به طوری که p_k نسبت اختلاط (با فرض $0 < p_k < 1$ برای هر k و $p_1 + \dots + p_K = 1$) مؤلفه k ام و $h(x_i | \mu_k, \Sigma_k)$ تابع توزیع گوسین d بعدی با میانگین μ_k و ماتریس Σ_k می‌باشد. همچنین θ برداری از پارامترهای ترکیب است.

$$\left(\theta = \left(p_1 + \dots + p_{K-1}, \mu_1 + \dots + \mu_K, \Sigma_1 + \dots + \Sigma_K \right) \right)$$

برآوردگر بی‌ز: برآوردگر بی‌زی $\tau(\theta)$ ، که با $T_{LG} = t_{LG}(X_1, \dots, X_n)$ نشان می‌دهیم، نسبت به تابع زبان L و توزیع جمعی پیشین G به برآوردگری می‌گویند که مخاطره بیز آن کوچک‌ترین باشد.

تئوری حرکت همگرا: در تئوری حرکت همگرا در صورتی که دو دسته نقطه متناظر در نظر گرفته شوند، میدان سرعت که با استفاده از اختلاف موقعیت نقاط در سامانه اول بر مبنای اختلاف موقعیت مکانی نقاط حاصل می‌شود، میدانی همگرا و هموار است (به شکل (۶) توجه شود). بنابراین می‌توان با اعمال شرط همگرایی میدان سرعت نقاط متناظر را پیدا کرد. همگرایی میدان سرعت راهی عملی برای تحمیل همواری تحت تبدیل در نظر گرفته شده است.

۱-۲. انطباق نقاط

در این روش تناظریابی به‌عنوان یک مسئله تخمین بیشینه انتظار با قید همگرایی حرکت بر روی میدان سرعت مطرح می‌شود به‌طوری که یک دسته نقطه دارای حرکتی همگرا برای منطبق شدن بر دسته دوم می‌باشند. اساس کار منطبق کردن یک مدل آمیخته گوسی بر دسته اول است به‌طوری که مراکز اولیه آن‌ها موقعیت نقاط در سامانه مختصات اول می‌باشد، فرآیند منطبق شدن مراکز مدل گوسین به موقعیت نهایی آن‌ها (نقاط در سامانه مختصات دوم) به‌عنوان یک حرکت موقت با قید همگرایی حرکت در نظر گرفته می‌شود.

مختصات سماوی ستاره را به‌عنوان مجموعه نقاط رفرانس در نظر گرفته و با نماد $X_{N \times 2}$ و مختصات عکسی ستاره را با نماد $Y_{M \times 2}$ نمایش داده می‌شود. هدف یافتن K ستاره متناظر از بین M ستاره در سامانه مختصات عکسی و N ستاره در سامانه مختصات سماوی می‌باشد، برای این منظور نقاط عکسی را به‌عنوان مراکز اولیه یک

¹ Maximum-a-Posteriori

همان‌طور که می‌دانید رفتار نوسانی یک تابع میزان همواری آن را مشخص می‌کند [۱۸]. در کلاس توابع مشتق‌پذیر یک تابع را هموارتر از یک تابع دیگر می‌نامیم در صورتی که نوسانات آن کمتر باشد به عبارت دیگر این تابع دارای انرژی کمتر در فرکانس بالا می‌باشد.

فرکانس‌های بالای یک تابع را می‌توان با اعمال یک فیلتر بالا گذر به دست آورد و در نهایت توان فرکانس‌های حاصله را اندازه‌گیری کرد. بنابراین تابع ϕ را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$\phi(v) = \int_{\mathbb{R}^2} \frac{|\tilde{v}(s)|^2}{\tilde{G}(s)} ds \quad (۸)$$

\tilde{V} نشان‌دهنده تبدیل فوریه سرعت و \tilde{G} یک فیلتر پایین‌گذر متقارن است. با بازنویسی فرمول (۷) خواهیم داشت:

$$E(\tilde{v}) = -\sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^M e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{x_n - y_{0m}}{\sigma} \right|^2} + \frac{\lambda}{2} \int_{\mathbb{R}^2} \frac{|\tilde{v}(s)|^2}{\tilde{G}(s)} ds \quad (۹)$$

می‌توان ثابت کرد تابعی که، تابع انرژی فوق را کمینه می‌نماید، بفرم یک تابع پایه شعاعی است [۲۳].

$$v(z) = \sum_{m=1}^M W_m G(z - y_{0m}) \quad (۱۰)$$

G را یک تابع گوسین در نظر گرفته می‌شود. دلایل متعددی برای این انتخاب وجود دارد که عبارتند از:

۱- خصوصیات مورد انتظار ما را برآورده می‌سازد (متقارن، معین مثبت و حد تبدیل فوریه این تابع با میل کردن نرم S به سمت صفر، برابر صفر می‌باشد).

۲- فرم گوسین در هر دو حوزه زمان و فرکانس بدون نوسان است.

۳- این انتخاب باعث شده که ترم پایدارسازی ما مشابه با ترم پایدارسازی در تئوری حرکت همگرا باشد [۱۷]. با جایگذاری نتایج فوق در رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$E(W) = -\sum_{n=1}^N \log \sum_{m=1}^M e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{x_n - y_{0m} - \sum_{k=1}^M w_k G(y_{0k} - y_{0m})}{\sigma} \right|^2} + \quad (۱۱)$$

$$\frac{\lambda}{2} \text{tr}(W^T G W)$$

$G_{M \times M}$ ماتریس گرام با عناصر

$$g_{ij} = e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{y_{0i} - y_{0j}}{\beta} \right|^2} \quad \text{و}$$

$W_{M \times 2}$ کرنل وزن گوسین است.

۲-۲. بهینه‌سازی

با به کارگیری الگوریتم بیشینه انتظار می‌توان کران بالای معادله (۱۱) را به دست آورد:

$$Q(W) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P^{old}(m | X_n) \frac{\|x_n - y_{0m} - G(m, \cdot)W\|^2}{2\sigma^2} + \quad (۱۲)$$

$$\frac{\lambda}{2} \text{tr}(W^T G W)$$

کمینه کردن کران بالای Q منجر به کمینه شدن تابع انرژی در رابطه (۱۱) خواهد شد. با مشتق‌گیری از رابطه (۱۲) نسبت به W و بازنویسی معادله بفرم ماتریسی خواهیم داشت (مرحله بیشینه‌سازی):

$$\frac{\partial Q}{\partial W} = \frac{1}{\sigma^2} G(\text{diag}(P1))(Y_0 + GW) - PX + \lambda GW = 0 \quad (۱۳)$$

P ماتریس احتمالات ثانویه با عناصر زیر می‌باشد:

$$P_{mm} = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{y_{0m}^{old} - x_n}{\sigma} \right|^2}}{\sum_{m=1}^M e^{-\frac{1}{2} \left| \frac{y_{0m}^{old} - x_n}{\sigma} \right|^2}} \quad (۱۴)$$

همچنین I یک ماتریس ستونی با عناصر واحد است. با ضرب رابطه

(۱۳) در عبارت $\sigma^2 G^{-1}$ به یک سامانه معادلات خطی می‌رسید:

$$(\text{diag}(P1)G + \lambda \sigma^2 I)W = PX - \text{diag}(P1)Y_0 \quad (۱۵)$$

خروجی الگوریتم ما ماتریس P خواهد بود که ستون نام آن احتمال متناظر بودن ستاره نام با تک تک ستارگان در کاتالوگ می‌باشد.

متأسفانه الگوریتم فوق در برابر نویز و نقاط اشتباه پایدار نبوده به عبارتی در بین نقاط تناظر یابی شده نقاط اشتباهی وجود خواهند داشت که دارای تناظر نمی‌باشد. در ادامه نحوه تشخیص نقاط اشتباه با استفاده از الگوریتم‌های RANSAC^۱ و MSAC توضیح داده خواهد شد [۱۹-۲۱].

۲-۳. تعیین نقاط اشتباه

این روش در سال ۱۹۸۱ توسط فیشلر و بولر پیشنهاد شده است [۲۰]. به طوری که روشی برای تعیین پارامترهای یک مدل ریاضی از مجموعه‌ای از داده‌های مشاهده شده که شامل نقاط پرت هستند، می‌باشد. فرض اساسی در این روش وجود دو دسته مشاهده است [۲۰].

inlier: داده‌هایی که با یک مدل مشخص قابل انطباق بوده است.

outlier: داده‌هایی که به مدل منطبق نمی‌شوند.

علاوه بر آن نقاط تحت تأثیر نویز می‌باشند. مزیت استفاده از RANSAC توانایی آن در تخمین پایدار پارامترهای مدل حتی در حضور نقاط پرت است. در ادامه نحوه کشف نقاط اشتباه با استفاده از الگوریتم RANSAC تشریح خواهد شد.

۲-۴. الگوریتم تبدیل خطی مستقیم

در صورتی که تمامی ستارگان در مرحله قبل به درستی شناسایی شده باشند، با استفاده از این الگوریتم می‌توان تابع تبدیل بین دو دسته

^۱ Random Sample Consensus

و یا:

$$A_i h = 0 \quad (22)$$

A_i در رابطه فوق یک ماتریس 2×9 است.

۲-۵. محاسبه هم‌نگاری

با توجه به مطالب ذکر شده نتیجه گرفته می‌شود که هر نقطه متناظر منجر به تشکیل دو معادله مستقل خواهد شد. بنابراین تنها با داشتن چهار نقطه متناظر می‌توان به یک سامانه خطی رسید که دارای ۸ معادله و ۸ مجهول است. در صورتی که بیش از ۴ نقطه متناظر داشته باشید سامانه معادلات ما فرامعین خواهند شد. این معادلات را می‌توان به شکل $Ah = 0$ نوشت به طوری که A ماتریس ضرائب خواهد بود که از سطرهای ماتریس A_i به دست آمده است و h یک بردار 9×1 که شامل تمام عناصر ماتریس H می‌باشد. در نهایت می‌توان ماتریس H را با اعمال SVD^1 بر ماتریس A و به دست آوردن بردار ویژه متناظر با کمترین مقدار ویژه ماتریس A تعیین کرد.

اما از آنجایی که مشاهدات شامل نقاط پرت می‌باشد، نمی‌توان با استفاده از الگوریتم فوق ماتریس H را به دست آورد، چرا که بعضی از نقاط به اشتباه تناظریابی شده‌اند. برای رفع این مشکل از الگوریتم RANSAC کمک گرفته می‌شود [۲۱]:

۱- به صورت اتفاقی ۴ نقطه متناظر انتخاب شده و ماتریس H محاسبه می‌شود.

۲- مقدار d_{\perp} که عبارتست از خطای بازنگاشت متقارن مربعی که برای تمام نقاط از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$d_{\perp}^2 = \sum d(X_i, \hat{X}_i)^2 + d(X'_i, \hat{X}'_i)^2 \quad (23)$$

\hat{X}_i : مختصات تبدیل شده ستارگان در سامانه مختصات پیکسلی
 $(\hat{X}'_i = H^{-1} X'_i)$

\hat{X}'_i : مختصات تبدیل شده ستارگان در سامانه مختصات سماوی
 $(\hat{X}'_i = H^{-1} X'_i)$

۳- محاسبه تابع هدف C :

$$C = \sum_i \rho(d_{\perp i}^2) \quad (24)$$

$$\rho(d_{\perp}^2) = \begin{cases} 0 & e^2 < T^2 \\ const & e^2 \geq T^2 \end{cases} \quad (25)$$

۴- انتخاب بهترین تبدیل در بین تمام نمونه‌ها یعنی تبدیلی که دارای کمترین C باشد و ذخیره مجموعه نقاط متناظری که این

نقاط را به شرح زیر به دست آورد. مختصات پیکسلی را با نماد X و سماوی را با نماد X' نشان داده می‌شود. هدف یافتن ماتریس $H_{3 \times 3}$ به طوری که به ازای هر نقطه داشته باشیم:

$$HX_i = X'_i \quad \forall i \quad (16)$$

برای تعیین ماتریس H از صفر بودن ضرب خارجی X' و HX_i استفاده می‌شود. در صورتی که سطر j ام ماتریس H را با h^{jT} نشان دهید می‌توان نوشت:

$$HX_i = \begin{pmatrix} h^{1T} X_i \\ h^{2T} X_i \\ h^{3T} X_i \end{pmatrix} \quad (17)$$

با در نظر گرفتن $X'_i = (x'_i, y'_i, 1)^T$ و جایگذاری در عبارت شرط خواهیم داشت:

$$X'_i \times HX_i = \begin{pmatrix} y'_i h^{3T} X_i - h^{2T} X_i \\ h^{1T} X_i - x'_i h^{3T} X_i \\ x'_i h^{2T} X_i - y'_i h^{1T} X_i \end{pmatrix} = 0 \quad (18)$$

از آنجایی که $h^{jT} X_i = X_i^T h^j$, $j = 1, \dots, 3$ می‌باشد، رابطه (۱۸) منجر به تشکیل سه معادله می‌شود:

$$\begin{pmatrix} 0^T & -X_i^T & y'_i X_i^T \\ X_i^T & 0^T & -x'_i X_i^T \\ -y'_i X_i^T & x'_i X_i^T & 0^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (19)$$

معادله فوق، به شکل $A_i h = 0$ می‌باشد به طوری که A_i یک ماتریس 3×9 و h_i ها داریه‌های ماتریس H می‌باشند.

$$h = \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{pmatrix} \quad (20)$$

در رابطه با معادله مذکور باید دو نکته را در نظر داشت:

۱- معادله $A_i h$ یک معادله خطی با مجهول h می‌باشد و ماتریس A_i یک ماتریس معلوم متشکل از مختصات ستارگان می‌باشد.

۲- با وجود این که رابطه (۱۹) دارای سه معادله است، تنها دارای دو معادله مستقل می‌باشد. چرا که سطر سوم از مجموع x'_i برابر سطر اول و y'_i برابر سطر دوم به دست می‌آید. بنابراین هر نقطه متناظر تنها منجر به تشکیل دو معادله مستقل خواهد شد. بنابراین رابطه (۱۹) به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$\begin{pmatrix} 0^T & -X_i^T & y'_i X_i^T \\ X_i^T & 0^T & -x'_i X_i^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (21)$$

¹ Singular Value Decomposition

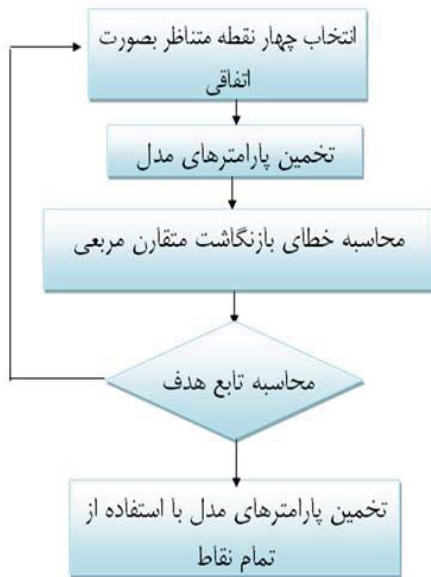
تبدیل بر اساس آن ایجاد شده است.

کمینه کردن آن هستیم به صورت زیر تغییر پیدا می‌کند:

$$C_2 = \sum_i \rho_2(d_{\perp i}^2) \quad (28)$$

$$\rho_2(d_{\perp}^2) = \begin{cases} d_{\perp}^2 & e^2 < T^2 \\ T^2 & e^2 \geq T^2 \end{cases} \quad (29)$$

در این حالت مانند روش قبل نقاط پرت مقدار ثابتی دریافت اما نقاط inlier متناسب با میزان انطباقشان با نقاط متنظر، مقادیر متفاوتی را دریافت می‌کنند.



شکل ۷. فلوجارت الگوریتم RANSAC

۳. نتایج و بحث

در این مقاله روش پیشنهادی بر اساس دو دسته داده بین‌المللی ذکر شده در جدول (۱) مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوریتم کشف ستارگان برای عکس نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۹) انجام شده تا مراکز آنها با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده توسط شریفی، صمدزادگان و فرزانه [۲۲] به صورت نقاط قرمز رنگ در شکل‌های (۸) و (۹) به دست آیند.

لازم به یادآوری است که با داشتن مختصات ژئودتیکی ایستگاه عکس‌برداری که توسط GPS ثبت شده است و میدان دید دوربین می‌توان قسمت متنظر آسمان را در اپک مشاهداتی که در تصویر ثبت شده است را از کاتالوگ استخراج کرد. شکل (۱۰) ستارگان استخراج شده را در سامانه مختصات سماوی نشان می‌دهد.

هدف این مقاله منطبق نمودن ستارگان استخراج شده از تصویر (شکل‌های (۸) و (۹) سمت چپ) با ستارگان استخراج شده از کاتالوگ (شکل ۱۰) می‌باشد.

مراحل ۱ الی ۴ را به تعداد N بار به‌منظور یافتن ماتریس هم‌نگاری با بیشترین نقاط inlier تکرار می‌شود.

۵- محاسبه تبدیل بین نقاط با استفاده از تمام نقاط متنظر. شکل (۷) فلوجارت الگوریتم RANSAC را نشان می‌دهد.

با توجه به مراحل ذکر شده فوراً دو سوال مطرح می‌گردد:

۱- آستانه تفکیک نقاط inlier از outlier چه میزان است، به عبارت دیگر مقدار پارامتر T چه اندازه می‌باشد، به‌طوری که یک نقطه با احتمال α به‌عنوان inlier در نظر گرفته شود. در عمل این پارامتر به‌صورت تجربی انتخاب می‌شود.

در صورتی که فرض شود خطای اندازه‌گیری مختصات از تابع گوسین با میانگین صفر و انحراف معیار σ تبعیت می‌کند [۱۹]، در این حالت d_{\perp}^2 از تابع کای اسکور با دو درجه تبعیت می‌کند.

احتمال این که مقدار این تابع از k^2 کوچک‌تر باشد به وسیله تابع توزیع تجمعی $F_m(K^2) = \int_0^{K^2} \chi_m^2(\xi) d\xi$ به دست می‌آید. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} inlier & e^2 < T^2 \\ outlier & e^2 \geq T^2 \end{cases} \quad \text{with } T^2 = F_m^{-1}(\alpha)\sigma^2 \quad (26)$$

۲- پارامتر N به چه میزان می‌باشد: پارامتر N را به اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری که با احتمال P حداقل یک دسته از نقاط انتخابی خالی از نقاط پرت باشد. غالباً P را برابر ۰/۹۹ در نظر می‌گیرند.

فرض کنید ω برابر است با احتمال این که یک نقطه inlier باشد، بنابراین حداقل N دسته نقطه باید انتخاب شود، به‌طوری که $(1 - \omega^*)^N = 1 - P$

$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - \omega^*)} \quad (27)$$

در الگوریتم RANSAC در صورتی که حد و آستانه نویز خیلی کوچک باشد، پارامترهای تخمین زده شده ناپایدار می‌باشند، علاوه بر آن در حضور داده‌های مشکوک (داده‌هایی که در یک مجموعه داده هستند و تحت هیچ تبدیلی در مجموعه داده‌های دیگر یافت نمی‌شوند) ممکن است به جواب صحیحی منتهی نشود.

بنابر دلایل ذکر شده، تور و زیسرمن [۱۹] الگوریتم MSAC که بهبود یافته RANSAC می‌باشد را پیشنهاد داده‌اند.

روش MSAC: در این روش روند کار مانند الگوریتم RANSAC است که مراحل آن توضیح داده شد منتها تابع هدفی که به دنبال

این مشکل نقاط تناظر یابی شده را وارد الگوریتم MSAC می‌شود. همان‌طور که در جدول (۲) ذکر شده است. با استفاده از این الگوریتم قادر به کشف تمام نقاط اشتباه خواهید بود. شکل (۱۱) و (۱۲) موقعیت ستارگان تناظریابی شده را با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد.

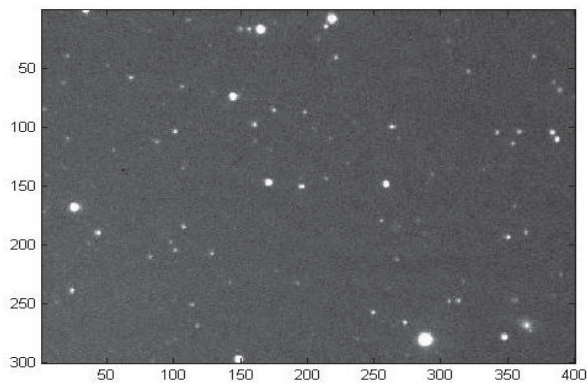
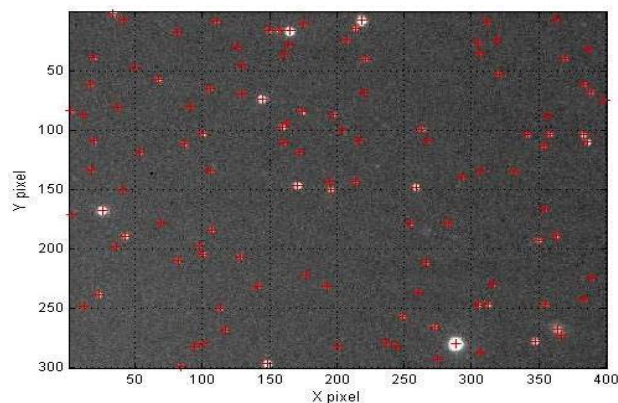
جدول ۲. نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی

داده‌های اول				
الگوریتم	تعداد کل نقاط	تعداد نقاط Inlier	تعداد نقاط پرت	تعداد نقاط بدون تناظر
تئوری حرکت همگرا	۲۰	۱۲	۴	۴
MSAC	۱۶	۱۲	۰	۴
داده‌های دوم				
الگوریتم	تعداد کل نقاط	تعداد نقاط Inlier	تعداد نقاط پرت	تعداد نقاط بدون تناظر
تئوری حرکت همگرا	۴۰	۳۱	۷	۲
MSAC	۳۸	۳۴	۰	۴

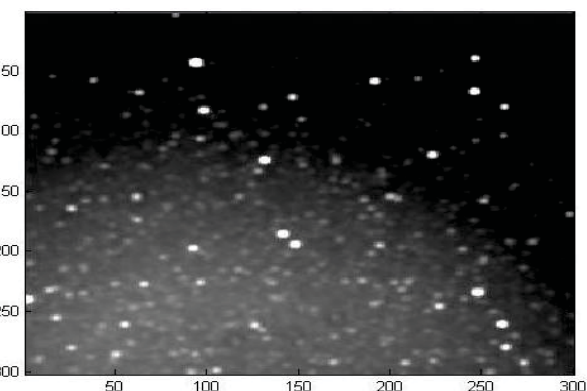
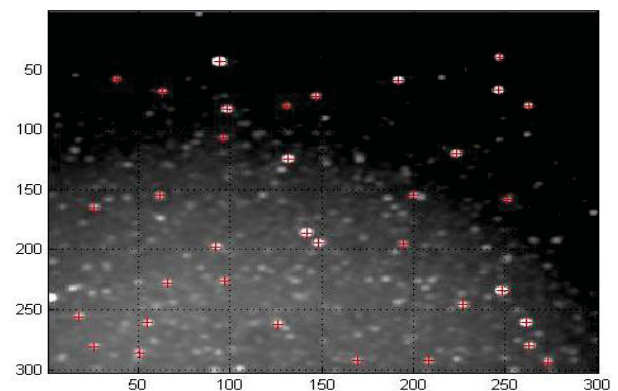
جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده

داده‌های اول	
Camera	Star 100
Image size	300×300
Exposure start	2001 Sep.18 12:43:41
Exposure	60 Sec
Center	RA : 17 ^h 52'26.78" Dec : -17°41'29.9"
FOV	18.43×18.43
Pixel Size	3.68×3.68
داده‌های دوم	
Camera	TZK2-D
Image size	400×300
Exposure start	1998 Mar.7 16:22:27 UT
Exposure	20 Sec
Center	RA : 11 ^h 50'00.78" Dec : -48°14'22.9"
FOV	1.037×0.778
Pixel Size	9.33" / Pixel

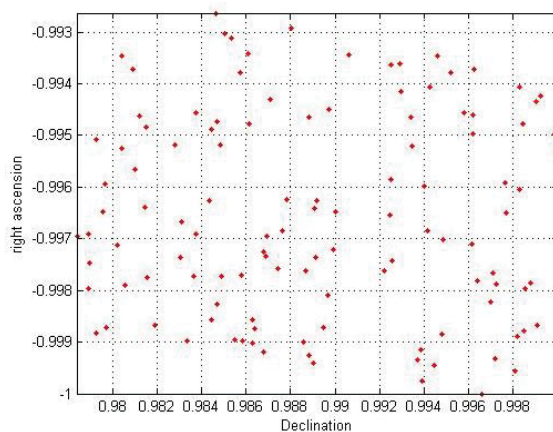
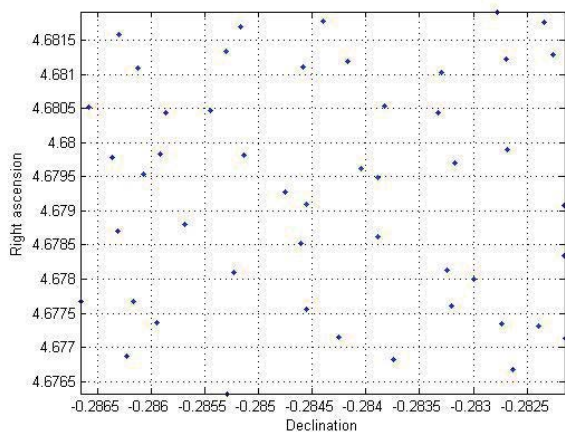
مختصات ستارگان در دو سامانه (پیکسلی و سماوی) را وارد الگوریتم تناظریابی می‌نماییم خروجی این مرحله ماتریس احتمال تناظر نقاط می‌باشد، به طوری که مؤلفه (i, j) احتمال تناظر ستاره نام استخراج شده از تصویر با ستاره زام از کاتالوگ است. عیب این روش همان‌طور که اشاره شد، وجود نقاط اشتباه می‌باشد. برای رفع



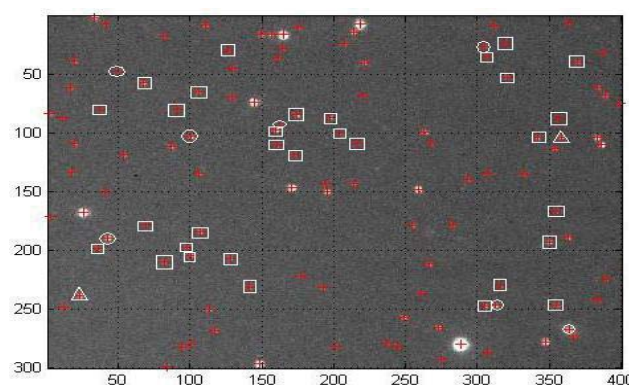
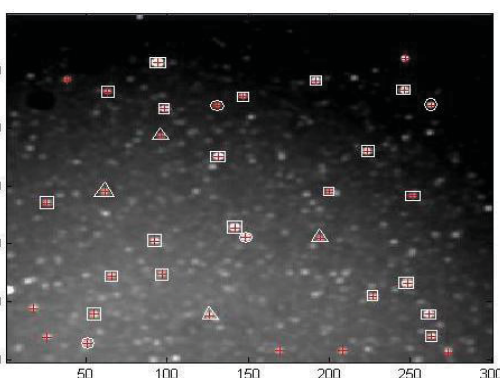
شکل ۸. سمت چپ: تصویر آسمان با استفاده از دوربین TZK2-D. سمت راست: استخراج مراکز ستارگان با استفاده از الگوریتم SIFT [۲۲]



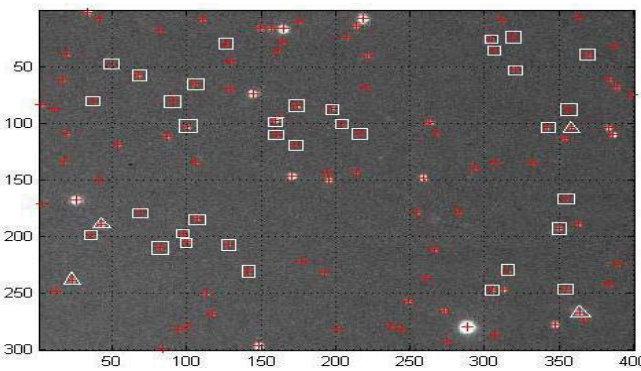
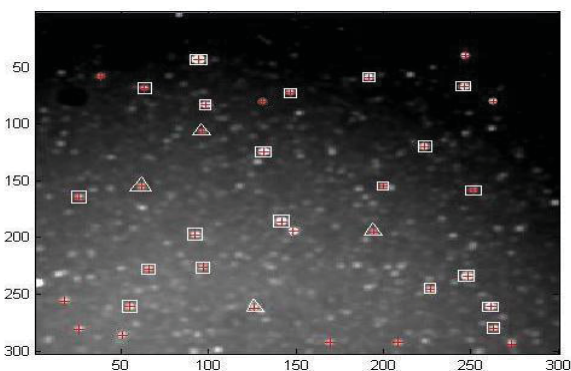
شکل ۹. سمت چپ: تصویر آسمان با استفاده از دوربین Star100. سمت راست: استخراج مراکز ستارگان با استفاده از الگوریتم SIFT [۲۲]



شکل ۱۰. ستارگان استخراج شده از کاتالوگ در اپک مشاهداتی بر حسب رادیان. سمت چپ داده‌های اول، سمت راست داده‌های دوم



شکل ۱۱. نتایج حاصل از تناظریابی بر مبنای تئوری حرکت همگرا. □: ستارگان تناظریابی شده، △: ستارگان بدون تناظر، ○: ستارگان اشتباه تناظریابی شده



شکل ۱۲. نتایج حاصل از تناظریابی بر مبنای الگوریتم MSAC. □: ستارگان تناظریابی شده، △: ستارگان بدون تناظر

۴. نتیجه‌گیری

به همین دلیل برای اهداف نظارت و مراقبت فضایی عمدتاً از سامانه‌های ردیابی اپتیکی استفاده می‌شود. به‌طور کلی فرآیند ردیابی و تعیین مدار ماهواره‌ها را می‌توان به دو قسمت نسبتاً مجزای مشاهدات و محاسبات تقسیم کرد. مشاهدات به معنای جمع‌آوری داده‌های مربوط به مکان ماهواره است که در قسمت محاسبات، از روی آن‌ها بر اساس روش‌ها و الگوریتم‌های موجود، ردیابی و تعیین مدار ماهواره انجام می‌پذیرد. در این راستا اولین قدم در مرحله محاسبات شناسایی دقیق ستارگان موجود در تصویر می‌باشد. نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این تحقیق بیانگر توانایی بالای آن در تعیین مختصات ستارگان در یک سامانه نجوم ژئودتیک

در یک نگاه کلی می‌توان انواع سامانه‌های ردیابی ماهواره را بر اساس نوع و هدف و کاربرد به سه دسته نظارت فضا، ناوبری (هدایت و کنترل ماهواره‌ها) و تعیین مکان بسیار دقیق برای استفاده در برخی مطالعات پیرامون زمین تقسیم‌بندی کرد. از آنجا که سامانه‌های ردیاب مربوط به نظارت فضا می‌بایست توانایی شناسایی هر گونه جسم مداری اعم از ماهواره‌های فعال، فضاپیماها در حال مانور، اجسام گم‌شده در فضا را داشته باشد، امکان استفاده از سامانه‌های ردیابی که بر اساس ارسال یا باز ارسال سیگنال الکترومغناطیسی توسط جسم مداری کار می‌کنند، برای اهداف مذکور وجود ندارد.

- بینایی - مبنا است.
- نتایج بررسی‌ها در تصاویر نمونه بیانگر دست‌یابی به دقتی در حدود 10^{-3} پیکسل در انطباق نقاط می‌باشد.
- عوامل مؤثر در کارایی روش فوق در عمل وابسته به پارامترهای مختلفی است که از اهم آن‌ها می‌توان به توانایی هندسی و رادیو متریک سنجنده مورد استفاده و ویژگی‌های اپتیکی تلسکوپ مورد استفاده اشاره نمود. خصوصیات فوق دارای تأثیر مستقیمی در پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم‌های استخراج ستارگان از تصاویر می‌باشند.
- ۵. مراجع**
- [10] Li, C.Y.; Li, K.; Zhang, Y. L.; Jin, S. Z.; Zu, J. F. "Star Pattern Recognition Based on Neural Network"; Chinese Sci. Bulletin 2003, 48, 1927-1930.
- [11] Li, L. H.; Zhang; F. E.; Lin, T. "An All-Sky Autonomous Star Map Identification Algorithm Based on Genetic Algorithm"; Opto-Electronic Eng. 2000, 27, 15-18.
- [12] Cole, C.; Crassidis, J. "Fast Star Pattern Recognition Using Spherical Triangles"; AIAA/IAAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, 2004.
- [13] Lin, T.; Zhou; J. L.; Zhang, J. P.; Jia, X. G.; Qian, G. H. "All Sky Automated Quaternary Star Pattern Recognition"; J. Astronautics 2000, 21, 82-85.
- [14] Padgett, C.; Delgado, K. K. "A Grid Algorithm for Star Identification"; IEEE Aerospace and Electronics Syst. 1997, 33, 202-213.
- [15] Paladugu, L.; Schoen, M. P.; Williams, B. G. "Intelligent Techniques for Star-Pattern Recognition"; Proc. of ASME; 2003.
- [16] Grafarend, E.; Krumm, F. "Map Projection"; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [17] Yuille, A. L.; Grzywacz, N. M. "The Motion Coherence Theory"; Int. J. Computer Vision 1988, 3, 344-353.
- [18] Girosi, F.; Jones, M.; Poggio, T. "Regularization Theory and Neural Networks Architectures"; Neural Computation 1995, 7, 219-269.
- [19] Torr, P. H. S. "MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry"; Computer Vision and Image Understanding 2002, 78, 138-156.
- [20] Fischler, M.; Bolles, R. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography"; Comm. Assoc. Comp. Mach. 1981, 24, 381-395.
- [21] Hartley, R.; Zisserman, A. "Multiple View Geometry in Computer Vision"; Cambridge University Press; 2003.
- [22] Sharifi, M. A.; Samadzadegan, F.; Farzaneh, S. "Automatic Star Extraction Using SIFT Method"; J. Space Sci. Tech., 2008, (in Persian).
- [23] Farzaneh, S. "Automatic Star Detection in an Astronomical Vision-Based Instrument;" Dissertation, Dep't of Geodesy and Geomatics Eng., Univ. of Tehran, 2008, (In Persian).
- [1] Gottfried, G. "Vertical Deflection Monitoring and Azimuth Control CCD Geodesy for Precise Terrestrial Networks"; TU Vienna, Inst. of Geodesy and Geophysics, 2003.
- [2] Hirt, C.; Burki, B. "Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of 21st Century"; Institut fur Erdmessung, Universitat Hannover, 2006.
- [3] Juang, J.; Kim; H.; Junkins, J. L. "An Efficient and Robust Singular Value Method for Star Pattern Recognition and Attitude Determination"; Technical Report, NASA/TM-2003-212142, Langley Research Center, NASA, Hampton, Virginia.
- [4] Kudryns, J. "Automatic Determination of Vertical Deflection Omponents from GPS and Zenithal Star Observation"; Acta Geodyn. Geomater. 2007, 4, 169-172.
- [5] Lamy au Rousseau, G.; Bostel, J.; Mazari, B. "Star Recognition Algorithm for APS Star Tracker: Oriented Triangles"; IEEE Aerospace and Electronic Syst. Mag. 2005, 20, 27-31.
- [6] Damljjanovic, G.; Cerstbach, G.; De Biasi, M. S.; Pejovic, N. "CCD Technique for Longitude/Latitude Astronomy"; Astronomical Observatory Belgrade 2003, 75, 229-234.
- [7] Denton, J. "Two Dimensional Projective Point Matching"; PhD Thesis, 2002.
- [8] Chen, C. Y.; Wang, B.; Zhang, C. "Star Pattern Recognition Algorithm Based on Main Star Pair"; Computer Simulation 2004, 21, 53.
- [9] Clouse, D. S.; Padgett, C. W. "Small Field-of-View Star Identification Using Bayesian Decision Theory"; IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Syst. 2000, 36, 773.