JSST
Journal of Space Science & Technology

Vol. 2, No. 4, Summer 2009

An Adaptive Method for Star Extraction from Digital Astronomical Images

M. A. Sharifi[1]* , F. Samadzadegan[2] and Saeed Farzaneh[3]

1, 2, 3. Department of Surveying and Geomatics Engineering, College of Engineering, University of Tehran

*P.O. Box 11155-4563

saeed.farzaneh@gmail.com

Celestial positioning has been used for navigation purposes for many years. Stars as the extra-terrestrial benchmarks provide unique opportunity in absolute point positioning. However, astronomical field data acquisition and data processing of the collected data is very time-consuming. The advent of the Global Positioning System (GPS) nearly made the celestial positioning system obsolete. The new satellite-based positioning system has been very popular since it is very efficient and convenient for many daily life applications. Nevertheless, the celestial positioning method is never replaced by satellite-based positioning in absolute point positioning sense.The invention of electro-optical devices at the beginning of the 21st century was really a rebirth in geodetic astronomy. Today, the digital cameras with relatively high geometric and radiometric accuracy has opened a new insight in satellite attitude determination and the study of the Earth's surface geometry and physics of its interior, i.e., computation of astronomical coordinates and the vertical deflection components. 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. Relating the parameters of the presented technique to star's Mag is one of it's exclusive properties.

Keywords: PSF, photometry, geodetic astronomy, digital astronomical images, scale space, differential of Gaussian, low pass filter, SIFT

JSST
فصلنامهٔ علمی - پژوهشی علوم و فناوری فضایی

جلد ۲/ شمارهٔ ۴ / تابستان ۱۳۸۸
ص. ص ۳۸-۲۷

ارائهٔ یک روش تطابقی جهت استخراج ستارگان از تصاویر رقومی نجومی

محمد علی شریفی[۱*]، فرهاد صمدزادگان[۲] و سعید فرزانه[۳]

۱، ۲ و ۳- دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری

* تهران، خیابان کارگر شمالی

Saeed.farzaneh@Gmail.com

امروزه، با در اختیار قرارگرفتن دوربین‌های رقومی با دقت هندسی و رادیومتریک بالا، فصل جدیدی در به‌کارگیری نجوم ژئودتیک در کاربردهای مختلفی نظیر تعیین وضعیت ماهواره، مختصات نجومی و مؤلفه‌های انحراف قائم، تحت عنوان نجوم ژئودتیک بینایی- مبنا گشوده شده است. در روش‌های اخیر با استفاده از یک CCD مناسب و به‌کارگیری تلسکوپی مناسب می‌توان روشی با قابلیت رؤیت‌پذیری بالا برای ثبت ستارگان به‌وجود آورد که برخلاف روش‌های سنتی نجوم ژئودتیک نیازمند انجام مشاهدات طولانی و زمان‌بر و کارشناسان خبره نیست. مسئلهٔ مهم در شناسایی اتوماتیک ستاره در سیستم‌های بینایی- مبنا، دستیابی به روشی سریع با قابلیت اعتماد و دقت بالا در استخراج ستارگان تصویربرداری شده است. در این مقاله، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی نقطهٔ کلیدها از طریق یک روش فیلترینگ مرحله‌ای در فضای مقیاس مشخص می‌شوند. مزیت اصلی این روش مقاوم‌بودن ویژگی‌های محلی تصویر در برابر تغییرات مقیاس و حساسیت کمتر نسبت به نور و تغییرات هندسی است. از ویژگی‌های منحصر به فرد در این روش می‌توان به تعیین مراکز ستارگان بدون در نظر گرفتن شکل تابع توزیع نقطه‌ای (PSF) همچنین استخراج ستارگان با قدر مشخص از تصویر اشاره کرد.

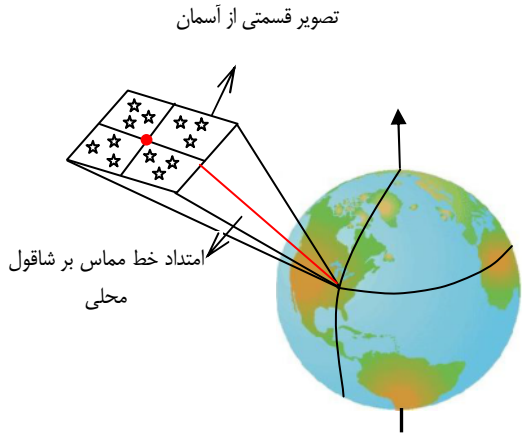
کلمات کلیدی: تابع توزیع نقطه‌ای، نورسنجی، نجوم ژئودتیک، تصاویر رقومی نجومی، فضای مقیاس، تابع تفاضل گوسی، فیلتر پایین‌گذر، تبدیل ویژگی‌های مستقل از تغییر مقیاس

مقدمه

موقعیت نسبتاً ثابت ستارگان در فضا و حرکت پیش‌بینی‌شدهٔ زمین باعث شده است تا ستارگان منبعی با دقت بسیار بالا، برای ناوبری به‌کارگرفته شود. با این وجود با توجه به مشکلات مطرح در به‌کارگیری ستارگان از یکسو و در اختیار قرارگرفتن سیستم‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای از سوی دیگر باعث شده است که از روش‌های کلاسیک نجوم ژئودتیک به‌ندرت استفاده شود، اما در ابتدای قرن بیست و یکم تغییرات اساسی در نجوم ژئودتیک با به‌کارگیری روش‌های الکترواپتیکال نجوم ژئودتیک به‌وقوع پیوست [۱-۵]. به‌طوری‌که روشی با راندمان بالا، اتوماتیک و آنالیز آنی[۱] داده‌ها ایجاد گردید [۶]. به‌وسیلهٔ این روش می‌توانیم مختصات نجومی را با دقت بالاتر از ۰/۰۱ ثانیه تعیین نماییم [۷].

در این سیستم‌ها، CCD تصویری از ستارگان حول امتداد قائم تهیه می‌کند و پس از آن ستارگان استخراج شده از تصویر باید با ستارگان موجود در کاتالوگ شناسایی شوند تا مختصات سماوی آنها به‌دست آید. به شکل (۱) توجه شود.

1. Real Time



شکل ۱- اصول پایه روش الکترواپتیکال نجوم ژئودتیک

یکی از مراحل اساسی روند فوق استخراج دقیق موقعیت ستارگان ثبت شده در تصویر است. دقت این مرحله تأثیر بالایی در دقت تعیین موقعیت نجومی و تعیین وضعیت با استفاده از تصویربرداری رقومی از ستارگان خواهد داشت.

نورسنجی

نورسنجی فرآیندی است که در آن مقدار درخشش ستارگان را اندازه‌گیری می‌کنند [۸]. به‌عبارت دیگر برای شمارش و اندازه‌گیری تعداد فوتون‌های کسب شده از ستاره، در یک تصویر CCD. جهت رسیدن به هدف مذکور موانعی وجود دارد که باید در مرحلهٔ اول آنها را شناخت و سپس به رفع آنها پرداخت:

۱- دید جو که موجب پخش‌شدن تصویر ستاره بر روی تعداد بیشتری از پیکسل‌ها می‌گردد. همچنین شکل تصویر ستاره را به مرور زمان (از یک تصویر به تصویر دیگر) تغییر می‌دهد.

۲- پیکسل‌هایی که فوتون‌های رسیده از ستاره را در برگرفته‌اند، شامل فوتون‌های رسیده از پیش‌زمینهٔ آسمان نیز هستند؛ بنابراین سیگنال آسمان باید به دقت اندازه‌گیری شود و از پیکسل‌های در برگرفته تصویر آسمان و ستاره کم شود.

۳- برای برخی از تصاویر همانند خوشه‌های ستاره‌ای پرتعداد، تصاویر ستارگان گاهی بر روی هم قرار می‌گیرند. بنابراین روشی باید پیدا شود تا نور اجرام را از یکدیگر جدا سازد. این مشکل اغلب به اسم آلودگی[۲] نامگذاری می‌شود.

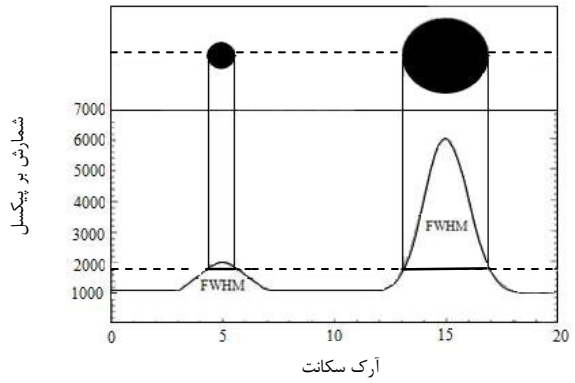
تابع توزیع نقطه‌ای و شکل تصویر ستاره

تابع توزیع نقطه‌ای بیانگر شکل تصویر CCD از یک منبع نقطه‌ای (تجزیه نشده) نور است. ستارگان واقعی نقاط نورانی نیستند، آنها باید دارای اندازهٔ زاویه‌ای محدود باشند، با این همه بجز چند ستارهٔ بسیار نزدیک و بزرگ اندازهٔ زاویه‌ای هر ستاره در آسمان از حد پراش نور توسط سیستم اپتیکی بسیار کوچک‌تر است. بنابراین می‌توانیم ستارگان را به‌صورت نقاط تجزیه‌نشدنی تلقی کنیم. برای تمامی تلسکوپ‌های تحقیقاتی، بیشترین و غالب‌ترین مشخصهٔ تعیین‌کنندهٔ تابع توزیع نقطه‌ای، پهن شدن نور ستاره در اثر گذر از جو آشفتهٔ زمین است. در عمل عوامل دیگری همانند تنظیم ضعیف کانون تلسکوپ و خطاهای ردیابی در تعیین تابع توزیع نقطه‌ای شرکت می‌کنند.

با فرض اینکه سیستم اپتیکی خوبی در اختیار باشد و تنظیمات کانونی و ردیابی نیز متناسب باشند، تابع توزیع نقطه‌ای باید به‌صورت دایره‌ای متقارن باشد. با توجه به تقارن دایره‌ای، تابع توزیع نقطه‌ای به صورت شار بر حسب شعاع تصویر ستاره رسم می‌شود.

شکل واقعی تابع توزیع نقطه‌ای که به‌وسیلهٔ دید تنظیم می‌شود پیچیده است، اما به وسیلهٔ یک هسته گوسی مرکزی و یک حلقهٔ بزرگ قابل تقریب زدن است [۸]. اندازهٔ زاویه‌ای تابع توزیع نقطه‌ای به روش‌های مختلف قابل تشریح است. یکی از روش‌های رایج، اندازه‌گیری پهنای کامل در نصف مقدار بیشینه است (FWHM)، که در حقیقت قطر محلی است که شار به نصف مقدار مرکزی کاهش می‌یابد.

از آنجا که تابع توزیع نقطه‌ای، شکل یک نقطهٔ نورانی بر روی CCD است و با توجه به اینکه تمام ستارگان نقطه هستند، بنابراین تمامی ستارگان دارای شکل و اندازهٔ یکسانی بر روی CCD هستند. اما در تصویری از آسمان مقدار تاریکی هر پیکسل متناسب با شدت آن پیکسل است. شکل (۲) در امتداد یک خط، شدت معینی را از یک ستارهٔ روشن و یک ستارهٔ ضعیف نزدیک آن نشان می‌دهد. شکل هر دو ستاره یکسان است، ولی ما در حال نظاره‌کردن قطر بزرگ‌تر ستاره روشن در یک شدت معین در مقایسه با ستارهٔ ضعیف هستیم.



شکل ۲- شکل هر دو ستاره یکسان است ولی ستارهٔ روشن‌تر به‌دلیل داشتن پیکسل‌هایی با شدت بیشتر، در زمان مقایسه بزرگ‌تر به‌نظر می‌رسد.

2. Contamination

در قسمت بالای نمودار تمامی پیکسل‌ها با مقادیر کمتر از ۱۸۰۰ را به رنگ سفید و بالاتر از این مقدار را به رنگ سیاه نمایش داده است. در اینجا فرض شده است که ستارهٔ روشن در هر نقطه ۵ برابر، شدت بیشتری نسبت به ستارهٔ ضعیف دارد. قسمت پایین نمودار، مقطع روشنایی در امتداد خط نقطه‌چین عبوری از مرکز هر دو ستاره را نشان می‌دهد. شکل هر دو ستاره کاملاً یکسان است (دارای تابع توزیع نقطه‌ای یکسانی هستند). روشنایی در طول خط نقطه‌چین پایین نمودار، سطح ثابت ۱۸۰۰ را برای هر پیکسل در حالی نشان می‌دهد که هر دو ستاره شکل یکسانی دارند، بنابراین ستارهٔ روشن برای هر سطح روشنایی به نظر بزرگ‌تر خواهد رسید. در قسمت میانی نمودارها، خط نقطه‌چین مقدار FWHM را برای هر یک از ستاره‌ها مشخص می‌کند. در یک تصویر واقعی از CCD هر پیکسل را می‌توان به‌صورت مجزا دید و لبه‌های تصویر ستاره همانند مجموعه مربع‌های مجزا خواهند بود، بنابراین مقطع شدت در امتداد یک خط جداگانه الگوی پله‌ای از پیکسل‌های مجزا نمایش خواهد داد.

نکتهٔ مهم دیگر که در رابطه با شکل ستاره باید گفت این است که تابع توزیع نقطه‌ای لبه ندارد؛ شدت نور ستاره به آرامی با افزایش شعاع از مرکز کم می‌شود؛ اما محلی وجود ندارد که بتوان آن را لبه نام گذاشت. سؤالی که مطرح می‌شود اگر بخواهیم تمامی نور ستاره را اندازه‌گیری کنیم تا چه شعاعی از مرکز ستاره باید پیش رویم؟ یا مقدار روزنه برای اندازه‌گیری فوتون‌ها چه اندازه است؟

مقدار روزنه را نمی‌توان آنقدر بزرگ در نظر گرفت تا تمامی نور ستاره را دربر بگیرد چراکه استفاده از روزنهٔ اندازه‌گیری بزرگ بدین معنی است که مقدار بسیار زیادی نور زمینهٔ آسمان در فوتون-های شمارشی ستاره شرکت می‌کنند. نویز آسمان در روزنه‌ای که شامل ستاره است به همراه نویز اندازه‌گیری سیگنال ستاره شرکت می‌کند.

همچنین هرچه قطر روزنه بیشتر باشد احتمال اینکه نور اجرام دیگر در این اندازه‌گیری شرکت کنند بالاتر می‌رود.

بنابراین استفاده از قطر کوچک‌تر پیشنهاد می‌شود، اگرچه قطر کوچک‌تر تنها کسری از کل نور ستاره را در بر می‌گیرد اما اگر مقدار دید جو ثابت باشد هر مقدار روزنهٔ کسر یکسانی از نور هر ستاره را اندازه‌گیری می‌کند و زمانی که دو ستاره با هم مقایسه می‌شوند تکثیر اندازهٔ روزنه حذف می‌شود. البته مشکل اینجاست که مقدار دید ثابت نیست؛ بنابراین اگر مقدار دید تغییر کند مقدار اندازه‌گیری نور از تصویری به تصویر دیگر متفاوت خواهد بود.

اما همان‌طورکه می‌دانیم تأثیر دید بیشتر بر روی داخل هستهٔ گوسی تصویر است. استفاده از روزنه در حدود ۴ تا ۱۰ برابر قطر FWHM بیشتر نور را در بر خواهد گرفت. با این اندازه از روزنه منطقی است که تغییرات دید نتیجه‌ای بر روی اندازه‌گیری نخواهد گذاشت.

با این حال برای ستارگان با نور کم، روزنه با قطری معادل ۴ برابر FWHM مقدار بسیار زیادی سیگنال آسمان را در بر خواهد گرفت و از آن مضرتر نویز اجتناب‌ناپذیر سیگنال آسمان خواهد بود.

مروری بر تحقیقات انجام شده

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای استخراج دقیق مرکز ستارگان پیشنهاد شده است [۱، ۵، ۷ و ۹].

از دیدگاه پردازش تصاویر می‌توان روش‌های موجود را به دو دسته کلی تفسیم کرد:

۱- تعیین مرکز ستاره با درنظرگرفتن تابع توزیع نقطه‌ای ستاره

۲- تعیین مرکز ستاره با تکیه بر تعیین مرکز جرم

تعیین مرکز ستاره با درنظرگرفتن تابع توزیع نقطه‌ای ستاره

کُهل[3] (۲۰۰۵) [۱۰] تعیین موقعیت ستاره را به دو مرحله تقسیم کرده است: ۱- کشف ستاره در تصویر ۲- تعیین مرکز ستاره.

هدف از مرحلهٔ اول، جدا کردن ستاره از پیش‌زمینهٔ آن است که شامل مراحل زیر است:

الف) آستانه‌گیری

در مرحلهٔ اول تمامی ستارگان با مختصات (x_i, y_i) که شدت آنها از شدت آستانه بیشتر است به‌عنوان مرکز ناحیهٔ کاندید R_i به ابعاد 5×5 انتخاب می‌نماییم.

ب) تعیین شدت مرکز روشنایی

برای تعیین شدت مرکز روشنایی $([c_x, c_y])$ ابتدا باید ماکزیمم نویز را مشخص کرد که افست سیگنال ستاره معرفی شده است. ماکزیمم نویز با متوسط‌گیری از پیکسل‌های همسایهٔ مرز خارجی ناحیهٔ بیرونی ستاره به‌دست می‌آید [۹]:

سپس مرکز روشنایی، با مشخص‌کردن مرکز پیکسل که به‌وسیلهٔ ماکزیمم خطا تصحیح شده است از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$[c_x, c_y]^T = \frac{\sum_i \left((Signal(x_i, y_i) - NoiseFloor).[x_i, y_i]^T \right)}{\sum_i (Signal(x_i, y_i) - NoiseFloor)} \qquad (۱)$$

مرحلهٔ دوم تعیین مرکز دقیق ستارگان استخراج شده است؛ به‌طوری‌که مراحل آن را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

الف) تعیین تابع توزیع نقطه‌ای

3. Kuhl

به‌منظور تعیین دقیق موقعیت ستاره در عکس باید شکل ظاهری آن را در عکس مشخص نماییم، به‌دلیل استفاده از اپتیک و وابستگی شدید آن به موقعیت و توجیه آشکارساز آن نسبت به صفحهٔ کانونی آن، این شکل الزاماً نقطه یا به‌صورت مرسوم توزیع شدت گوسین نیست؛ علاوه بر آن، تصویر، وابسته به طول موج λ است. همان‌طورکه ستاره را می‌توان منبع نقطه‌ای از نور در نظر گرفت می‌توان تصویر آن را بر روی صفحهٔ آشکارساز معادل PSF سیستم نوری نیز درنظرگرفت که بیانگر شدت تصویر در مختصات (x, y) به‌صورت تابعی از زاویهٔ برخورد بیان شود:

$$PSF(x, y) = f(Optics, Detector\ position, Detector\ orientation, \lambda, a_x, a_y) \quad (۲)$$

تابع فوق را باید با استفاده از تحلیل یا با استفاده از کالیبراسیون یا هر دو مشخص کرد.

ب) تعیین مرکز حقیقی شدت روشنایی

با مشخص‌شدن تابع PSF، می‌توان اثرات بیشتری مبنی بر آشکارساز را نظیر حساسیت پیکسل به‌عنوان تابعی از موقعیت درون پیکسل و شکل ناحیهٔ حساس به نور مربوط به یک پیکسل و حساسیت نسبت به طول موج‌های مختلف در نظر گرفت.

تعیین مرکز ستاره با تکیه بر تعیین مرکز جرم

۱. هراچ (۱۹۹۹) [۱۱] اطلاعات مورد نیاز را با استفاده از پرفیل شدت ستاره به‌دست آورد؛ وی پروفیل شدت ستاره را در تقریب اول یک تابع دو بعدی گوسین در نظر می‌گیرد.

از این دیدگاه به‌راحتی می‌توان بین یک پیکسل داغ (پیکسلی که دارای تفاوت زیادی در شدت با پیکسل‌های پیرامون آن است) را از ستاره‌ای حقیقی متمایز کرد.

ستاره در یک عکس با یک پروفیل گوسین غالباً بر روی چندین پیکسل گسترده می‌گردد؛ در صورتی که بیشترین شدت $I_{i_0 j_0}$ مربوط به پیکسل (i_0, j_0) باشد موقعیت مرکز ستاره را می‌توان از رابطهٔ زیر تعیین کرد:

$$x_c = \frac{\sum I_{ij}.i}{\sum I_{ij}} \quad , \quad y_c = \frac{\sum I_{ij}.j}{\sum I_{ij}} \quad (۳)$$

به‌طوری‌که جمع بر روی ناحیهٔ کوچکی پیرامون پیکسل مرکزی (مثلاً $5' \times 5'$) محاسبه می‌گردد. در مرحلهٔ بعد شدت مشاهده شده با یک تابع گوسین دو بعدی تقریب زده می‌شود:

$$G(i,j) = G_0 e^{\frac{-[(i,x_c)^2+(j-y_c)^2]}{2h^2}} + b \quad (۴)$$

به‌طوری‌که b آستانهٔ آسمان و G پروفیل تخمین‌زده شدهٔ شدت ستاره است.

با توجه به فرمول فوق ستاره به‌عنوان یک شیئ با محورهای متقارن در نظر گرفته می‌شود و نهایتاً پارامترهای g و b را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$S = \sum (G(i,j) - I_{i,j})^2 \to min \quad (۵)$$

بنابراین می‌توان شدت مرکزی I_0 را از شدت ماکزیمم $I_{i_0 j_0}$ از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$I_0 = I_{i_0} - B_{i_0 j_0} \quad (۶)$$

و

$$B_{i_0 j_0} = \frac{\sum_{(i,j)\neq(i_0,j_0)} w_{i,j} I_{i,j}}{\sum_{(i,j)\neq(i_0,j_0)} w_{i,j}} \quad (۷)$$

با محاسبهٔ پارامتر شارپ[4] می‌توان بین ستاره و پیکسل داغ تمایز قائل شد:

$$sharp = \frac{I_0}{G_0} \quad (۸)$$

درصورتی‌که $G_0 > I_0$ پیکسل مورد نظر ستاره است در غیر این صورت پیکسل داغ است.

همان‌طورکه می‌دانیم اشعهٔ کیهانی بر روی عکس دارای پروفیل باریک و فرکانس پایین نسبت به ستاره است.

ستارهٔ ظاهر شده در یک عکس شکلی به‌صورت دایره‌های هم مرکز دارد اما یک کهکشان عموماً شکلی به‌صورت بیضی دارند.

بهترین راه برای توصیف پدیده‌ای ثبت شده در تصویر استفاده از ممنتم مرتبهٔ دوم است:

$$h_x^2 = \frac{\sum I_{i,j}(i-x_c)^2}{\sum I_{i,j}} \quad , \quad h_x^2 = \frac{\sum I_{i,j}(i-x_c)^2}{\sum I_{i,j}} \quad (۹)$$

$$h_{xy} = \frac{\sum I_{i,j}(i-x_c)(i-y_c)}{\sum I_{i,j}}$$

به‌طوری‌که مجموع، بر روی ناحیهٔ کوچکی حول (i_0, j_0) است حال پارامتر شیپ[5] را به‌صورت زیر معرفی می‌نماییم:

$$shape = 2\frac{\sqrt{(h_x - h_y)^2 + 4h_{xy}^2}}{h_x + h_y} \quad (۱۰)$$

این پارامتر بیانگر شکل پدیده‌هاست به‌طوری‌که برای ستاره، شکل دایره و برای اشعهٔ کیهانی شکل کشیده را درنظرمی‌گیریم. مقدار این پارامتر برای ستاره صفر خواهد بود.

4. Sharp
5. Shape

۲. سوآنزی (۲۰۰۵) [۱۲] نیز تابع توزیع نقطه‌ای را به‌صورت یک تابع گوسین در نظر می‌گیرد.

اگرچه ستاره‌ها اکثریت نقاط روشن در عکس هستند اما در صفحهٔ تصویر می‌توان نقاط روشنی را یافت که ستاره نیستند (Hot pixel). روش کلی تعیین مرکز ستاره را در این روش، می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- ابتدا روشن‌ترین پیکسل را در تصویر مشخص می‌نماییم (x_m, y_m).
- با استفاده از جستجوی توپولوژی تمامی پیکسل‌های اطراف (x_m, y_m) را با شدت بزرگ‌تر از شدت آستانه مشخص می‌نماییم.
- مرکز ستاره را با استفاده از رابطهٔ زیر تعیین می‌نماییم:

$$\hat{x} = x_m + \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} I_{ij}} \quad , \quad \hat{y} = y_m + \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} I_{ij}} \qquad (۱۱)$$

در رابطهٔ فوق n تعداد پیکسل‌ها در اطراف پیکسل مرکزی، (x_m, y_m)، است که شدتی بیشتر از شدت آستانه دارند. $(\hat{x}, \hat{y})$ مرکز ستاره و I_{ij} شدت پیکسل در پیکسل (i, j) و (x_{ij}, y_{ij}) مختصات پیکسل (i, j) است.

۳. در روش به‌کاررفته در سیستم‌های Pixy و Iris تابع شدت زمینه را به‌صورت یک تابع درجه دو به‌صورت زیر فرض می‌کند:

$$Flat(x, y) = A + Bx + Cy + Dx^2 + Ey^2 + Fxy \qquad (۱۲)$$

سپس مراحل زیر را جهت استخراج ستاره به‌ترتیب پیاده می‌کند:

- تابع فوق را تابع فلتفیلد[6] می‌نامیم، ضرایب مجهول را با استفاده از تمامی پیکسل‌ها به‌دست می‌آوریم.
- سپس مقدار انحراف معیار- اختلاف بین مقدار تابع در هر پیکسل و مقدار واقعی- آن را به‌دست می‌آوریم.
- پیکسل‌هایی که مقدار آنها بیشتر از $Flat_0(x,y) + 2s_0$ باشد به‌عنوان بخشی از ستاره در نظر گرفته می‌شود.
- پیکسل‌هایی که مقدار آن کمتر از $Flat_0(x,y) - 2s_0$ باشد به‌عنوان dark noise در نظر گرفته می‌شود.
- پیکسل‌هایی که مقدار شدت آنها بین $Flat_0(x,y) \pm 2s_0$ باشد را به‌عنوان زمینه واقعی انتخاب کرده و سپس تابع فوق مجددا محاسبه می‌گردد.
- با استفاده از تابع فوق انحراف معیار را محاسبه می‌نماییم.
- پیکسلی که مقدار شدت آن بیشتر از $Flat_0(x,y) + 2s_0$ باشد به‌عنوان ستاره درنظر گرفته می‌شود که مقدار آن را به $p - Flat(x,y)$ تغییر می‌دهیم؛ مقدار پیکسلی که شدت آن از حد کمتر باشد را صفر قرار می‌دهیم.
- پیکسل‌هایی که مقدار آنها مخالف صفر است درون ناحیه‌های کوچکی جدا شده و سپس مرکز آن ناحیه به‌عنوان ستاره معرفی می‌شود.

اگرچه روش‌های فوق باتوجه به مفروضات ذکر شده می‌توانند مرکز ستاره را تعیین کنند اما باید نکات زیر را در نظر داشت:

در روش اول، تابع توزیع نقطه‌ای نیاز به شناسایی کامل سیستم تصویربرداری و نحوهٔ تصویربرداری (موقعیت و توجیه CCD، زاویهٔ برخورد نور با CCD، طول موج) تعیین می‌شود که نیاز به محاسبات پیچیده دارد.

در روش دوم، هر چند نیاز به محاسبات پیچیده نیست اما درنظرگرفتن تابع توزیع نقطه‌ای به‌صورت یک تابع گوسین فرض ایده‌الی است که همیشه صادق نخواهد بود چراکه مطابق جدول (۱) تصاویر مختلفی از ستاره با توجه به زاویهٔ برخورد نور به CCD و همچنین موقعیت CCD نسبت به صفحهٔ کانونی ثبت خواهد شد.

علاوه بر آن، ناتوانی در تعیین دقیق ناحیهٔ اطراف تصویر ستاره جهت نورسنجی از معایب هر دو روش است.

جدول ۱- اشکال مختلف ستاره بر روی تصویر تحت زوایای برخورد مختلف و موقعیت‌های مختلف آشکارساز نسبت به صفحهٔ کانونی [۱۰]

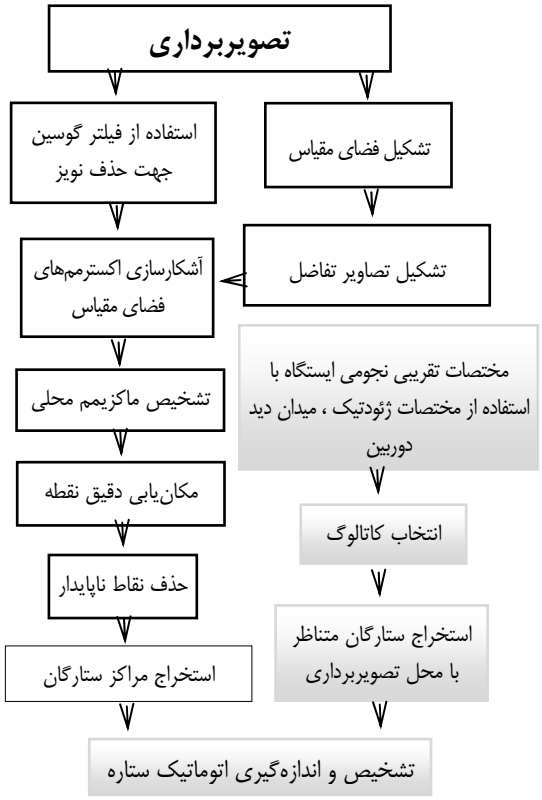
زاویهٔ برخورد	۰/۱ میلی‌متر جلوی صفحهٔ کانونی	صفحهٔ کانونی	۰/۱ میلی‌متر پشت صفحهٔ کانونی	۰/۲ میلی‌متر پشت صفحهٔ کانونی
۰				
۸				
۱۰				
۱۲				

الگوریتم پیشنهادی

در این الگوریتم بدون نیاز به درنظر گرفتن شکل تابع توزیع نقطه‌ای موقعیت ستاره با دقت زیرپیکسل به صورت کاملاً اتوماتیک تعیین می‌گردد؛ علاوه بر آن با تعیین صحیح پارامترهای الگوریتم پیشنهادی همان‌طورکه در ادامه ملاحظه خواهیم کرد، می‌توان ستارگان با قدرهای مشخص را از تصویر استخراج کرد که این

6. Flatfield

مسئله باعث کاهش حجم محاسبات در مرحلهٔ تشخیص ستاره خواهد شد. شکل (۳) نمودار الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل۳- نمودار الگوریتم پیشنهادی

فیلتر پایین‌گذر

یکی از دلایل اصلی مات کردن تصویر، کم کردن نویز به‌علت طبیعت ذاتی نور است حتی اگر نور به‌صورت یکدست و یکنواخت تابیده شود، مقدار هر پیکسل با پیکسل‌های اطرافش فرق خواهد داشت. از طرف دیگر تصویری که با تلسکوپ تشکیل می‌شود بهم وابسته است و از آنجا که جزئیاتی که می‌خواهیم ثبت کنیم در طول چند پیکسل کنار هم پخش می‌شود، مقدار هر پیکسل به مقدار پیکسل‌های اطرافش وابسته است. بدین ترتیب اثر میانگین‌گیری فیلتر پایین گذر بر روی نویزهای تصادفی بیشتر از خود تصویر تأثیر می‌گذارد. از بین‌بردن نویز کمک آشکاری به آشکارشدن تغییر تدریجی نور زمینه می‌کند.

با تجربه‌کردن فیلترهای مختلف پایین گذر بهترین نوع برای حالتی که تصویر، بدون مات شدن، بیش از اندازه نمایان شود فیلتر گوسین خواهد بود.

آشکارسازی اکسترمم‌های فضای مقیاس

هدف از این مرحله تعیین نقاطی به‌عنوان کاندیدای مراکز ستارگان است [۱۳].

مرحلهٔ اول در یافتن مراکز ستارگان عبارت است از تشخیص مکان‌ها و مقیاس‌هایی که بتوان آنها را در نمادهای مختلف یک شئ به‌گونه‌ای تکرارپذیر تعیین کرد. یافتن نقاطی که نسبت به تغییر مقیاس تصویر ثابت باشند، از طریق جستجوی ویژگی‌های ثابت در میان تمام مقیاس‌های ممکن و با استفاده از تابع پیوسته‌ای از مقیاس که به‌عنوان فضای مقیاس شناخته شده است صورت می‌گیرد (ویتکین ۱۹۸۳) [۱۴].

کوندریک (۱۹۸۴) [۱۵] و لیدنبرگ (۱۹۹۴) [۱۶] ثابت کردند که تنها تابع فضای مقیاس تحت مفروضات قابل قبولی، تابع گوسی است. بنابراین فضای مقیاس یک تصویر به‌صورت یک تابع $L(x,y,s)$ تعریف می‌شود که از طریق کانولوشن یک تابع گوسی با مقیاس متغیر $G(x,y,s)$ و تصویر ورودی $I(x,y)$، حاصل می‌شود:

$$L(x,y,s) = G(x,y,s) * I(x,y) \qquad (۱۳)$$

* بیانگر عملگر کانولوشن در x و y است.

همچنین تابع G به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

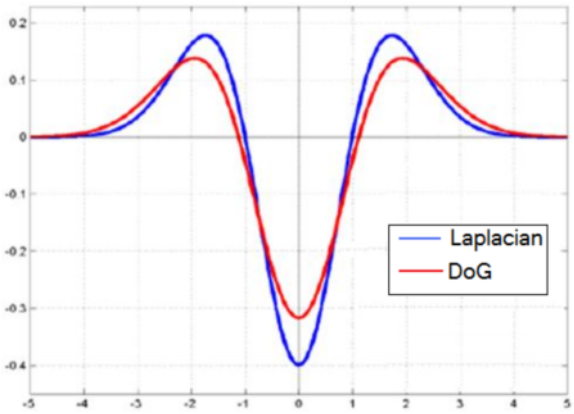
$$G(x,y,s) = \frac{1}{2ps^2} e^{\frac{-(x^2+y^2)}{2s^2}} \qquad (۱۴)$$

لوو (۱۹۹۹) [۱۷] برای تعیین مناسب و کارآمد مکان‌های نقاط اصلی (ستارگان) پایدار در فضای مقیاس، استفاده از ماکزیمم فضای مقیاس در تابع تفاضل گوسین وابسته به تصویر $D(x,y,s)$ را پیشنهاد کرده است که می‌توان آن را از طریق دو مقیاس نزدیک به هم را که به‌وسیلهٔ فاکتور افزایندهٔ ثابت K جدا شده است محاسبه کرد.

$$D(x,y,s) = L(x,y,ks) - L(x,y,s) \qquad (۱۵)$$

همان‌گونه که توسط لیندربرگ (۱۹۹۴) [۱۶] بررسی شد، تابع تفاضل گوسی، تقریب نزدیک به تابع لاپلاسین نرمال شده است. به شکل (۴) توجه شود. وی نشان داد که نرمال‌سازی تابع لاپلاسین با فاکتور s^2 برای تغییرناپذیری صحیح مقیاس لازم است.

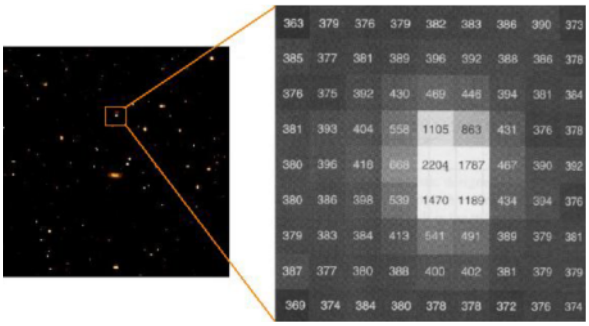
یکی از ویژگی‌های مهم الگوریتم پیشنهادی مرتبط‌کردن پارامترهای مختلف الگوریتم به قدر ستاره است؛ اولین پارامتری که باید به‌طور مناسب تنظیم شود پارامتر σ در رابطهٔ (۱۵) است.



شکل ۴- کرنل گوسین و لاپلاسین (هر دو کرنل نسبت به مقیاس و دوران مستقل هستند)

تشخیص ماکزیمم محلی

مرحلهٔ اول در اغلب روش‌های استخراج مراکز ستارگان، تعیین میانگین شدت پیش‌زمینه و دسته‌بندی پیکسل‌هایی است که شدت بیشتری نسبت به مقدار تعیین شده دارند، به‌عنوان تصویر ستاره است. چرا که تصویر ستارگان بر روی صفحهٔ آشکارساز به‌وسیلهٔ یک تابع توزیع نقطه‌ای خاص بیان شده است؛ به‌طوری‌که شدت نور ستاره به آرامی با افزایش فاصله از مرکز آن به‌سمت صفر میل می‌کند شکل (۵).



شکل ۵- توزیع شدت پیرامون ستارهٔ تصویر شده بر روی آشکارساز

در صورتی‌که بتوان نقاط با ماکزیمم شدت را به‌طور مستقیم استخراج کرد دیگر نیازی به دسته‌بندی و سپس تعیین دقیق مراکز روشنایی نخواهد بود. در الگوریتم پیشنهادی نقاط ماکزیمم محلی تابع تفاضل گوسی را به‌عنوان مراکز اولیهٔ ستارگان در نظر می‌گیریم. جهت تشخیص ماکزیمم محلی تابع تفاضل گوسی، $D(x,y,s)$، هر نقطه نمونه با ۸ نقطه در تصویر خود و ۹ نقطه مجاور در مقیاس بالا و پایین مقایسه می‌شود، این نقطه در صورتی انتخاب می‌شود که از تمام نقاط مجاور بزرگ‌تر باشد. بنابراین بر خلاف روش‌های پیشین، ملاک تصمیم‌گیری، توزیع شدت در پیکسل‌های مجاور خواهد بود که این باعث می‌شود تا روش پیشنهادی نسبت به تغییرات درجهٔ خاکستری در یک ناحیه بزرگ حساس نباشد. با تعیین صحیح آستانهٔ انتخاب می‌توان ستارگان با قدر مشخص را از تصویر استخراج کرد. لازم به یادآوری است که میزان صحیح پارامترها در کلیه موارد این مقاله به‌صورت تجربی تعیین شده است.

مکان‌یابی دقیق نقاط اکسترمم

پس از استخراج اکسترمم‌های تابع تفاضل گوسی، برای رسیدن به مراکز ستارگان با دقت sub pixel از بسط تیلور (تا جملات درجه دوم) تابع فضای مقیاس، $D(x,y,s)$، حول نقطهٔ نمونه استفاده می‌نماییم [۹] :

$$D(x) = \mathrm{D} + \frac{\partial D^T}{\partial x} + \frac{1}{2} x^{\mathrm{T}} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} x \qquad (۱۶)$$

D و مشتق‌های آن در نقطهٔ نمونه محاسبه می‌شوند. همچنین $X = (x,y,s)^T$ میزان افست از این نقطه است.

مکان دقیق نقطه اکسترمم، $\hat{x}$، با مشتق‌گیری از این تابع نسبت به x و صفر قرار دادن آن تعیین می‌شود. در نتیجه:

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial x^2} \frac{\partial D}{\partial x} \qquad (۱۷)$$

حذف نقاط ناپایدار

قدم بعدی پس از مکان‌یابی دقیق نقاط اکسترمم کاندید حذف نقاط ناپایدار و حساس به نویز است چراکه در بین مراکز واقعی ستارگان نقاط داغ نیز وجود خواهد داشت.

مقدار تابع در اکسترمم، $D(\hat{x})$، جهت رد اکسترمم‌های ناپایدار با روشنایی پایین سودمند است که می‌توان آن را با جایگزینی معادلهٔ (۱۷) در (۱۶) به‌دست آورد:

$$D(\hat{x}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial \mathrm{D}^{\mathrm{T}}}{\partial \mathrm{x}} \hat{x} \qquad (۱۸)$$

یکی دیگر از پارامترهایی که برای ارتباط دادن الگوریتم پیشنهادی به قدر ستاره مورد استفاده قرار می‌گیرد تعیین صحیح آستانه $|D(\hat{x})|$ است؛ به‌طوری‌که تمام اکسترمم‌ها با مقدار $|D(\hat{x})|$ کمتر از آن از بین ستارگان استخراج شده حذف می‌شوند.

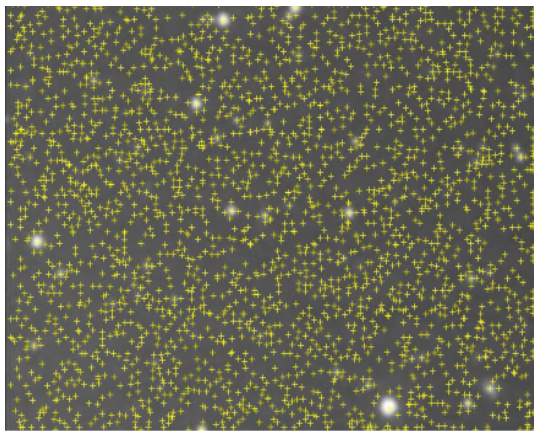
ارزیابی و پیاده‌سازی

در این مقاله روش پشنهادی بر اساس دادهٔ بین‌المللی ذکر شده در جدول (۲) مورد ارزیابی قرارگرفته است [۱۸]:

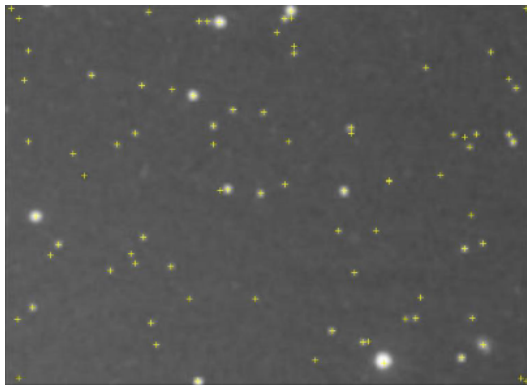
جدول ۲- مشخصات داده‌های مورد استفاده

دوربین	Star 100
ابعاد تصویر	300 ´ 300
تاریخ تصویربرداری	2001 Sep.18 12:43:41
زمان نوردهی	60 Sec
مختصات مرکز	$RA: 17^h52¢26.78¢¢$ $Dec: -17^o41¢29.9¢¢$
زاویه دید	18.43 ´ 18.43
ابعاد پیکسل	3.68 ´ 3.68

شکل‌های (۶) و (۷) خروجی مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که شکل (۶) مراکز ستارگان استخراج شده با توجه به اکسترمم‌های فضای مقیاس است. همان‌طورکه ذکر شد در بین این نقاط، نقاطی که نسبت به نویزهای ناچیز بی‌ثبات و همچنین نقاطی که به‌خوبی در مرکز روشنایی متمرکز نشده‌اند وجود خواهند داشت. جهت حذف این نقاط نیاز به مکان‌یابی دقیق نقاط استخراج شده است؛ به‌طوری‌که پس از مکان‌یابی دقیق نقاط اکسترمم نقاط با روشنایی کم و همچنین نقاطی که نسبت به نویز بی‌ثبات هستند حذف خواهند شد. به شکل (۷) توجه شود.



شکل۶- نقاط استخراج شده با توجه به اکسترمم‌های فضای مقیاس



شکل ۷- حذف نقاط با روشنایی پایین

در مرحلهٔ دوم الگوریتم پیشنهادی، تعداد و صحت مراکز ستارگان استخراج شده از تصویر تحت عوامل زیر مورد بررسی قرار می‌دهیم:

۱- اثر اعمال فیلتر گوسین قبل از استخراج ستارگان

۲- اثر پارامترهای مختلف الگوریتم پیشنهادی

بررسی اثر فیلتر گوسین

همان‌طورکه اشاره شد؛ نقش این فیلتر کم‌کردن نویز و حذف اطلاعات زائد به‌وسیلهٔ نرم‌کردن تصویر است. این اثر را می‌توان به‌وضوح در جدول (۳) مشاهده کرد، تعداد نقاط اشتباه قبل از اعمال فیلتر گوسین بسیار زیاد است به‌طوری‌که با افزایش سیگمای فیلتر نه تنها این نقاط حذف می‌شود بلکه ستارگان با قدر بالا نیز استخراج نمی‌شوند. بنابراین می‌توان از این خاصیت در ارتباط دادن قدر ستاره به ستارگان استخراج شده استفاده کرد؛ بدین معنی که به‌منظور استخراج ستارگان با قدر پایین از فیلتر با سیگمای بالا استفاده می‌نماییم.

جدول ۳- اثر اعمال فیلتر گوسین

تعداد نقاط اشتباه	تعداد ستارگان کشف شده	سیگما
۸	۳۰	بدون اعمال فیلتر
۳	۱۶	۱
۰	۹	۱۵

بررسی اثر پارامترهای مختلف الگوریتم پیشنهادی

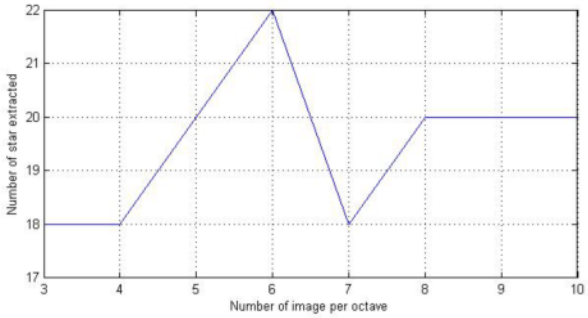
اثر پارامترهای مختلف بر روی تعداد ستارگان استخراج شده و نقاط اشتباه را نسبت به یک حالت خاص، سطر اول از جدول (۴) مورد بررسی قرار می‌دهیم.

جدول (۴) اثر چهار پارامتری که بیشترین تأثیر را در استخراج ستارگان دارند نشان می‌دهد.

به‌منظور مطالعهٔ اثر تعداد اکتاو بر روی تعداد ستارگان استخراج شده تعداد تصویر در هر اکتاو را با ثابت نگه داشتن بقیهٔ پارامترها تغییر می‌دهیم. شکل (۸) نشان می‌دهد که با پارامترهای مفروض (سطر اول از جدول (۴)) در تعداد ۶ تصویر در هر اکتاو تعداد ستارگان استخراج شده ماکزیمم می‌گردد لذا چنانچه هدف استخراج تمام ستارگان تصویربرداری شده باشد، بهترین مقدار برای قرار دادن تعداد اوکتاو ۶ است.

جدول ۴- اثر پارامترهای مؤثر در استخراج ستارگان

تعداد نقاط اشتباه	تعداد ستارگان استخراج شده	پارامتر سیگما در تشکیل هرم تصویری	پارامتر سیگما در فیلتر لاپلاسین	حد تشخیص ماکزیمم محلی	تعداد تصویر در هر اکتاو
۰	۲۲	۱/۵	۱/۵	۵/۵	۶
۰	۱۱	۱/۵	۱/۵	۱۰	۶
۱۰	۶۰	۱/۵	۱/۵	۲	۶
۹	۲۳	۱/۵	۱/۵	۵/۵	۵
۰	۴	۱/۵	۰/۵	۵/۵	۶
۴	۸	۱/۵	۵	۵/۵	۶
۰	۲۰	۰/۵	۱/۵	۵/۵	۶
۴	۲۲	۵	۱/۵	۵/۵	۶



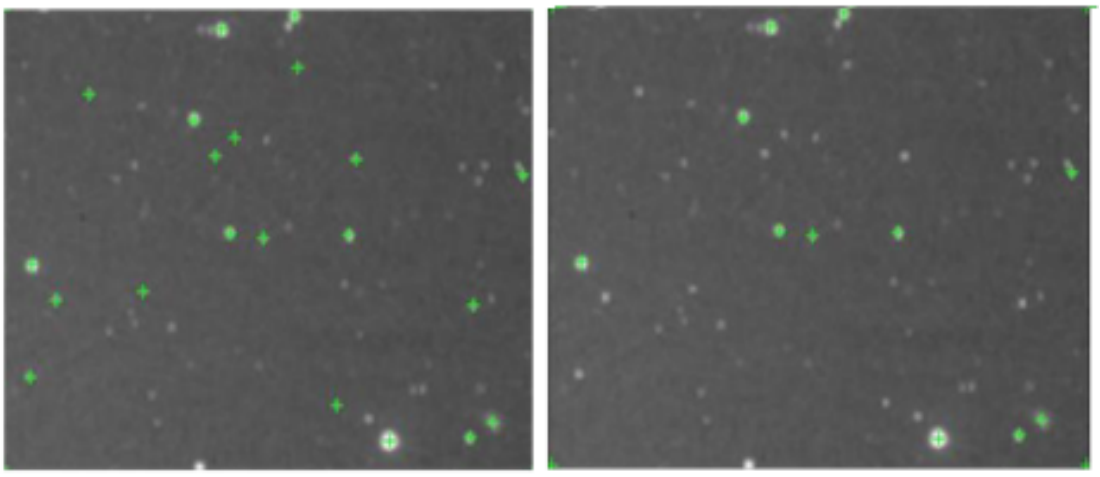
شکل ۸- اثر پارامتر تعداد تصویر در هر اکتاو

همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش مقدار حد تشخیص نقاط ماکزیمم تعداد ستارگان استخراج شده کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل (۹) مشاهده کرد (سطر دوم از جدول (۴)).

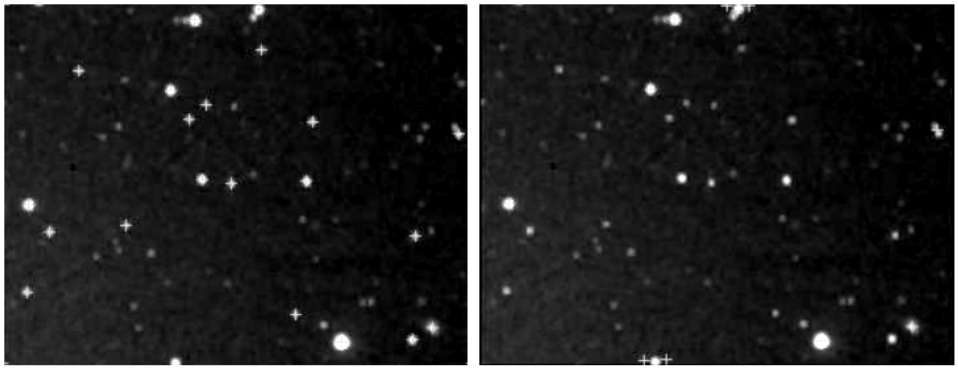
همچنین همان‌طورکه توضیح داده شد پارامتر سیگما در فیلتر گوسین در واقع به‌عنوان یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌نماید و هر چه مقدار آن بیشتر باشد میزان عارضه‌های استخراج شده کمتر خواهد بود. شکل (۱۰) تأثیر مقادیر مختلف سیگما را بر روی استخراج ستارگان نشان می‌دهد.

یکی از خصوصیات ارزنده و مفید الگوریتم پیشنهادی علاوه بر دقت بالای استخراج ستارگان مرتبط کردن پارامترهای آن به قدر ستارگان است. بدین معنی که با تنظیم این مقادیر می‌توان ستارگان با قدر مشخصی را از تصویر استخراج کرد.

اهمیت این موضوع در منطبق‌کردن ستارگان استخراج شده با کاتالوگ است چراکه با دانستن روشنایی ستاره می‌توان حجم محاسبات را به میزان زیادی کاهش داد. جدول (۵) نتایج حاصل را بر روی تصویر آزمایش شده نشان می‌دهد.



شکل ۹- با افزایش حد تشخیص نقاط ماکزیمم تعداد ستارگان کمتری استخراج می‌شود (تصویر سمت راست)

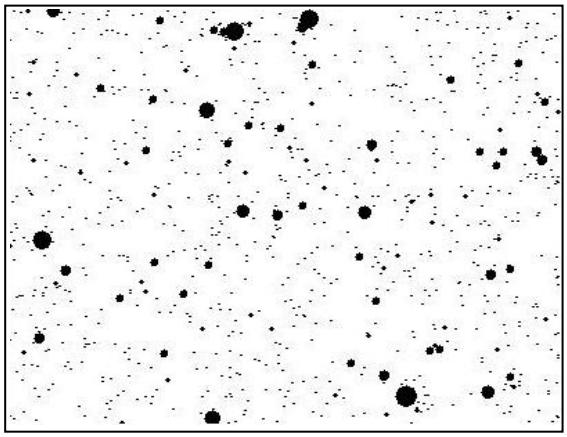


شکل ۱۰- با افزایش مقدار سیگما ستارگان کمتری استخراج می‌گردد (تصویر سمت راست)

جدول ۵- پارامترهای مؤثر در الگوریتم SIFT جهت استخراج ستارگان با قدر مختلف

مشخصات فیلتر گوسین		پارامتر سیگما در تشکیل هرم تصویری	پارامتر سیگما در فیلتر لاپلاسین	حد تشخیص ماکزیمم محلی	تعداد تصویر در هر اکتاو	قدر ستاره
ابعاد پنجره	سیگما					
۵×۵	۱۵	۱/۵	۱	۱۰	۶	۸،۹،۱۰
۵×۵	۱۵	۱/۵	۱	۱۱	۶	۱۱
۵×۵	۱۵	۱/۵	۱/۵	۵/۵	۶	۱۲
۳×۳	۱۵	۱/۵	۱	۶/۵	۵	۱۳
۳×۳	۱۵	۸/۵	۸/۵	۲	۶	۱۴

همان‌طورکه ذکر شد اولین مرحله در کلیهٔ روش‌های پیشین آستانه‌گیری و سپس تعیین دقیق مرکز ستاره است. بنابراین برای مقایسهٔ کارایی الگوریتم پیشنهادی، تصویر مورد آزمایش را وارد اولین مرحله از روش‌های پیشین می‌نماییم. شکل (۱۱) نتایج حاصل از استخراج پیکسل‌هـایی با شـدت بزرگ‌تر از شدت آستـانه بر روی

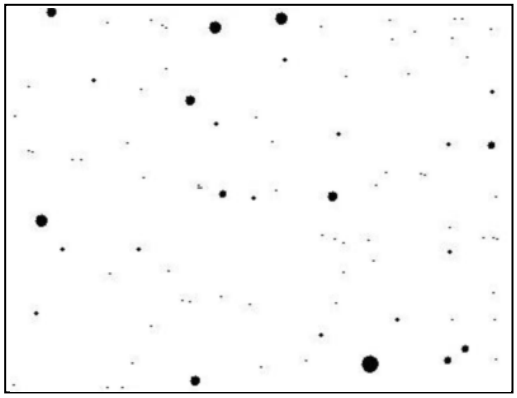


شکل ۱۱- نواحی کاندید استخراج شده بدون اعمال فیلتر گوسین

تصویر نمونه بدون اعمال فیلتر گوسین را نشان می‌دهد، همان‌طورکه می‌بینیم علاوه بر استخراج ستارگان نواحی بسیاری به‌عنوان ناحیهٔ کاندید برای ورود به الگوریتم تعیین مرکز دقیق ستارگان انتخاب شده است؛ درصورتی‌که تصویر را قبل از آستانه‌گیری با یک فیلتر گوسین با سیگمای ۱۵، مات نماییم شکل (۱۲) حاصل می‌شود. اگرچه بسیاری از نواحی اشتباه در مرحلهٔ قبل حذف شده است اما تعدادی از نواحی که به‌درستی بیانگر تصویر ستاره ثبت شده بودند نیز حذف شده است.

علاوه بر آن یکی از معایب بزرگ در کلیه روش‌های پیشین عدم توانایی تعیین مقدار دقیق روزنه جهت نورسنجی است. به‌عبارت دیگر در تعیین شعایی که باید از مرکز ستاره پیش رفت تمامی نور ستارگان اندازه‌گیری شود چراکه استفاده از روزنه اندازه‌گیری بزرگ بدین معنی است که مقدار بسیار زیادی از نور زمینه آسمان در فوتون‌های شمارشی ستاره شرکت می‌کند و درصورتی‌که قطر کوچک‌تر انتخاب شود تنها کسری از نور ستاره را در بر می‌گیرد که باعث بروز خطا در اندازه‌گیری دقیق مرکز ستاره می‌گردد.

علاوه بر مطالب ذکر شده تعیین دقیق تابع توزیع نقطه‌ای همان‌طور که ذکر شد بسیار پیچیده است.



شکل ۱۲- نواحی کاندید استخراج شده با اعمال فیلتر گوسین

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۱- نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این تحقیق بیانگر توانایی بالای آن در استخراج مراکز ستارگان در یک سیستم نجوم ژئودتیک بینایی- مبناست. عوامل مؤثر در کارایی روش فوق در عمل وابسته به پارامترهای مختلفی است که از اهم آنها می‌توان به تعیین دقیق پارامترهای الگوریتم پیشنهادی اشاره کرد. همان‌طور که ذکر شد روش پیشنهادی به‌طور مؤثر از مشکلات روش‌های پیشین (تعیین PSF و تعیین روزنه مشخص اطراف هر ستاره) عبور کرده است. پرداختن به مسئلهٔ وجود اشتباه در ستارگان استخراج شده بحث مفصلی است که در مرحلهٔ تشخیص ستاره (منطبق کردن آن با کاتالوگ) بدان پرداخته شده است [۱۹].

۲- مسئلهٔ اصلی و مهم در کلیه روش‌های پیشین، تعیین تابع توزیع نقطه‌ای و تعیین اندازه دقیق روزنه، جهت نورسنجی است؛ تعیین تابع توزیع نقطه‌ای نیاز به شناسایی کامل سیستم تصویربرداری خواهد داشت. فرض PSF به‌صورت گوسین نیز فرض ایده‌آلی است که مطابق جدول (۱) همواره صحیح نیست. همچنین در تعیین روزنه، یعنی شعاعی که باید از مرکز ستاره پیش رفت تا تمامی نور ستارگان اندازه‌گیری شود، باید دقت کرد چراکه استفاده از روزنه اندازه‌گیری بزرگ بدین معنی است که مقدار بسیار زیادی از نور زمینهٔ آسمان در فوتون‌های شمارشی ستاره شرکت می‌کند و درصورتی‌که قطر کوچک‌تر انتخاب شود تنها کسری از نور ستاره را در بر می‌گیرد که باعث بروز خطا در اندازه‌گیری دقیق مرکز ستاره می‌گردد. در صورتی‌که روش مذکور به‌دلیل استقاده از فضای مقیاس و دیگر خصوصیات ارائه شده در مقاله با این چالش‌ها روبه‌رو نیست. همچنین هرچند در روش‌های پیشین با تغییر مقدار آستانه تشخیص، می‌توان ستارگان با قدرهای مشخص را استخراج کرد اما تفاوت روش پیشنهادی در دقت بالای استخراج مراکز ستارگان همراه با تفکیک منظم ستارگان از نظر روشنایی است. به‌طوری‌که در روش‌های پیشین این نظم و دقت دیده نمی‌شود.

۳- نظم اتوماتیک پارامترهای فوق در تصاویر نیازمند تحقیقات بیشتری است که در کارهای تحقیقاتی آینده باید به منظور دستیابی به یک سیستم کاملاً اتوماتیک به آنها پرداخته شود.

مراجع

[1] Gottfried, G., "Vertical Deflection Monitoring and Azimuth Control CCD Geodesy for Precise Terrestrial Networks," TU Vienna, Inst. of Geodesy & Geophysics, 2003.

[2] Hirt, C. and Bürki, B., Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century, Universität Hannover Nr. 258, 2006, pages 81–99.

[3] Juang, J., Kim, H., Junkins, J. L., "An Efficient and Robust Singular Value Method for Star Pattern Recognition and Attitude Determination," the *John L. Junkins Astrodynamics Symposium (Advances in the Astronautical Sciences)*, Vol. 115, 2003

[4] Kudrys, J., "Automatic Determination of Vertical Deflection Omponents from GPS and Zenithal Star Observation" *Acta Geodyn. Geomater*., Vol, 4. No, 4, 2007, pages 169-172.

[5] Rousseau, L. A., Bostel, J. and Mazari, B., "Star Recognition Algorithm for APS Star Tracker: Oriented Triangles," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 20, No. 2, 2005, pages 27-31.

[6] Gottfried, G. and Helmut, P., "A Small CCD Zenith Camera (ZC-G1) - Developed for Rapid Geoid Monitoring in Difficult Projects" *Publ. Astron. Obs. Belgrade,* No. 75, 2003, Pages 221 – 228.

[7] Damljanovic, G., Cerstbach, G., De Biasi, M. S. and Pejovic, N., "CCD Technique for Longitude / Latitude Astronomy" *Astronomical Observatory Belgarde*, (*Poster*) No.75. 2003, pages 229-234.

[8] Howell, S. B., Handbook of CCD Astronomy, *Cambridge University Press*, 2006.

[9] Brown, M. and Lowe, D. G., "Invariant Features from Interest Point Groups',' *British Machine Vision Conference,* Cardiff, Wales, 2002, pages 656-665.

[10] Kuhl, C. Combined Earth/Star Sensor for Attitude and Orbit Determination of Geostationary Satellite, PhD. Thesis University of Stuttgart, 2005.

[11] Hroch, F. "The Robust Detection of Stars on CCD Images", *Experimental Astronomy*, Springer Vol, 9, No. 4, 1999, pages 251-259.

[12] Swanzy, M. J., Nalysis and Demonstration: A Proof-of-Concept Compass Star Tracker, Master of Science Thesis, Clifornia Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.

[13] Lowe, D. G., "Distictive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", *International Journal of Computer Vision,* Springer, Vol. 60, No. 2, 2004, Pages 91-110.

[14] Witkin, A. P., "Scale-Space Filtering", *In International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Germany, 1983, Pages 1019-1022.

[15] Koenderink, J. J., "The Structure of Images", *Biological Cybernetics*, Vol. 50, No. 5, 1984, pages 363-370.

[16] Lindeberg, T., "Scale-Space Theory: A Basic Tool for Analysing Structures at Different Scales", *Journal of Applied Statistics*, Vol. 21 No.1 and 2, 1994, Pages 225-270.

[17] Lowe, D. G., "Object recognition from local scale-invariant features', *In International Conference on Computer Vision,* Greece, Vol 2, 1999. pages 1150-1157.

[18] [on line], Available: http://www.perthobservatory.wa.gov.au/ information/ po _sky_camera.html

[۱۹] فرزانه، سعید. تشخیص اتوماتیک ستاره در یک سیستم نجوم ژئودتیکی بینایی مبنا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد [به راهنمایی استادان محمدعلی شریفی و فرهاد صمدزادگان]، دانشگاه تهران، دانشکدهٔ فنی، گروه نقشه‌برداری، ۱۳۸۸.