

الگوریتمی جدید در تشخیص قالب و مرکزیابی دقیق ستارگان تصاویر آسمان شب

محمّدولی ارباب‌میر^۱، سید محمد محمدی^۲، محمّدصادق سلحشور^۳ و فرشاد سمیه‌ئی^۴

^۱ دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ گروه مخابرات، دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

^۳ گروه الکترونیک دیجیتال، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

^۴ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله الگوریتمی جدید در تشخیص قالب و مرکزیابی دقیق ستارگان تصاویر آسمان شب، ارائه شده است. در فضاییهایی که از تصاویر ستارگان آسمان شب برای تعیین وضعیت خود استفاده می‌کنند، دقت و سرعت عملیات پردازش تصویر نقشی بسیار تعیین‌کننده دارند. عملیات تشخیص قالب و مرکزیابی ستارگان، جزء مهم‌ترین مراحل فرآیند پردازش تصویر در این روش‌های تعیین وضعیت به‌شمار می‌روند. در اینجا، با هدف افزایش سرعت و دقت این عملیات، الگوریتمی جدید در تشخیص قالب، متشکل از دو مرحله آستانه‌گذاری و خوشه‌بندی و همچنین مرکزیابی دقیق ستارگان، ارائه شده است. نتایج پیاده‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش آستانه‌گذاری پیشنهادی، توانسته است در شرایط عدم توزیع یکنواخت درخشندگی، بهتر از سایر روش‌های متداول عمل کند. حجم محاسباتی بسیار پایین و خطای متوسط مرکزیابی به‌دست‌آمده کمتر از ۰/۰۴۵٪ پیکسل در ۱۰۰ تصویر شبیه‌سازی‌شده، نشان‌دهنده کارایی بالای الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله است.

واژگان کلیدی: آستانه‌گذاری، دودویی‌کردن، تصاویر ستارگان آسمان شب، فضاپیما، مرکزیابی.

۱- مقدمه

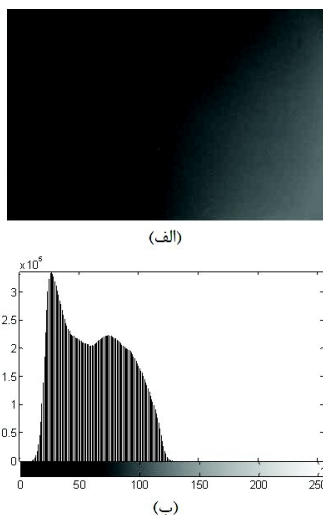
نیاز به اطلاع از وضعیت فضاپیماها، پایه اصلی ابداع ابزارها و الگوریتم‌های فراوانی از جمله فرآیند خودکار شناسایی ستارگان بوده است. در این فرآیند از یک دوربین ستاره، شامل یک حس‌گر تصویربرداری و یک الگوریتم به‌منظور تطبیق ستارگان موجود در تصویر با کاتالوگ ستارگان استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها به‌طور معمول از زوایای بین ستاره‌ای (زاویه بین خط دید دو ستاره از منظر یک دوربین)، روشنایی ستاره‌ها و برخی محاسبات دیگر به‌منظور تشخیص ستارگان استفاده می‌کنند. یکی از مراحل مهم و حساس در همه این الگوریتم‌ها، مرحله پردازش تصویر است. پردازش تصویر فرآیندی است که طی آن، تغییرات، درون تصاویر توسط نرم‌افزارهای رایانه‌ای با هدف بهبود آنها انجام می‌شود.

با استفاده از این علم، این امکان وجود دارد که تصاویر CCD^۱ را با روش‌های متفاوت بهبود بخشیده و ارتقا داد. تصاویر CCD یا ابزار با بار تزویج‌شده شامل تمامی تصاویر تک‌رنگ^۲ و یا رنگی می‌شوند که توسط دوربین‌هایی با آشکارساز CCD (Howell, 2006) تهیه شده‌اند. تاکنون نرم‌افزارهای پردازش تصویر گوناگونی با اهداف نجومی طراحی شده‌اند. از جمله نرم‌افزارهای نجومی تجاری موجود می‌توان به Mira, CCDsoft, Canopus, AIP4WIN, MaxImDL و ... اشاره کرد؛ هم‌چنین نرم‌افزارهای رایگانی همانند IRIS, JRAF, EzPhot و Munidos برای کاربردهای تحقیقاتی، در دسترس عموم قرار گرفته‌اند.

^۱ Charge-Couple Device

^۲ Monochrome

عمومی آستانه‌گذاری (Berry and Burnell, 2005; Gonzalez and Woods, 2008) که جزء روش‌های متداول آستانه‌گذاری هستند، مناسب نخواهد بود؛ زیرا در این روش‌ها تنها از یک آستانه برای تفکیک پس‌زمینه از ستارگان استفاده می‌شود. برای حل این مشکل، روش‌های آستانه‌گذاری محلی تطبیقی ارائه شده‌اند (Bradley and Roth, 2007; Cristo et al., 2008).



(شکل - 1): (الف) تصویر آسمان شب که به علت نزدیکی ماه به FOV دچار عدم یکنواختی درخشندگی شده است؛ (ب) هیستوگرام همان تصویر

در روش (Cristo et al., 2008) یک الگوریتم برای شناسایی خودکار ستارگان آسمان ارائه شده است. این الگوریتم که مبتنی بر روش آستانه‌گذاری با استفاده از هیستوگرام تصاویر است به منظور مقابله با اثرات نوفه و رفع مشکل عدم یکنواختی درخشندگی معرفی شده است. این الگوریتم دقت بالایی دارد، ولی طبق گفته مؤلفان مقاله مشکل اصلی آن پیچیدگی و بار محاسباتی یا به عبارتی زمان اجرای بالای آن نسبت به سایر الگوریتم‌های استاندارد آشکارسازی است.

در (Bradley and Roth, 2007) نیز یک روش آستانه‌گذاری تطبیقی نیمه‌خودکار معرفی شده است. در این روش که برگرفته از روش Wellner است (Bradley and Roth, 2007) برای افزایش سرعت از تصاویر مجموع^۲ بهره‌برده شده است.

مراحل پردازش تصاویر ستارگان آسمان شب را می‌توان به کالیبراسیون تصویر، حذف نوفه، تشخیص قالب ستارگان، مرکزابی و درنهایت شناسایی ستارگان^۱ تقسیم کرد. در این مقاله، تمرکز بر روی مراحل حذف نوفه، تشخیص قالب و مرکزابی ستارگان قرار گرفته است. لازم به ذکر است که هرچه دقت این مراحل افزایش یابد، صحت و دقت مرحله شناسایی ستارگان که مرحله نهایی تعیین وضعیت فضاپیماست افزایش می‌یابد.

تاکنون الگوریتم‌های متعددی برای این مراحل ارائه شده است (Howell, 2006; Berry and Burnell, 2005; Gonzalez and Woods, 2008; Li Y. et al., 2009; Quine et al., 2007; Winick, 1986; Huffman, 2006; Udomkesmalee et al., 1994; Samaan, 2003; Merline and Howell, 1995; Fosu et al., 2004; Vyas et al., 2009; Baker and Moallem, 2007; Hao and Xiao yu, 2011; Sun et al., 2012) که هر یک در شرایط گوناگون دارای نقاط ضعف و کاستی‌هایی هستند که منجر به افزایش خطای سیستم تعیین وضعیت خواهند شد.

در مراجع (Howell, 2006; Berry and Burnell, 2005; Huffman, 2006) از فیلترهای گوسی و میانگین‌گیر برای کاهش نوفه بهره‌برده شده است. این فیلترها با نرم‌کردن مقادیر پیکسل‌ها، موجب کاهش نوفه می‌شوند. با اعمال این فیلترها نه تنها مقادیر پیکسل‌های پس‌زمینه بلکه مقادیر پیکسل‌های ستارگان نیز نرم شده که حاصل این عمل تغییر شکل ستاره و جابه‌جایی مرکز ثقل آن و یا به عبارت دیگر تغییر توزیع درخشندگی پیکسل‌های ستاره است. بنابراین استفاده از این فیلترها موجب کاهش دقت مرکزابی خواهد شد.

آستانه‌گذاری تصاویر آسمان شب که به ظاهر بسیار ساده و امکان‌پذیر می‌نماید، در عمل به دلیل وجود عوامل تأثیرگذاری چون نوفه و نورهای ناخواسته ناشی از منابع گوناگون از قبیل خورشید، ماه، ماهواره‌ها و غیره به امری پیچیده تبدیل شده است. بنابراین در تصاویر آسمان شب، آستانه را باید به‌گونه‌ای انتخاب کرد که ورود احتمالی عوامل مخرب عنوان‌شده، تأثیری در آستانه‌گذاری و در نهایت مرکزابی و تعیین وضعیت دقیق نداشته باشد.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، هیستوگرام یک تصویر آسمان شب که به علت وجود ماه در نزدیکی میدان دید (FOV) دچار عدم توزیع یکنواخت درخشندگی شده است، قابلیت تفکیک‌پذیری خود را تا حد فراوانی از دست داده است. بنابراین استفاده از روش‌های

² Integral image

¹ Star Identification

روش‌های مبتنی بر وزن (Howell, 2006; Vyas et al., 2009; Baker and Moallem, 2007) نیز با وجود مقاومت به‌نسبه بالا در برابر نوفه، نسبت به روش‌های زیرپیکسلی دقت بالایی ندارند.

در این مقاله تک‌تک این روش‌ها بررسی شده و با توجه به محدودیت‌های به‌وجود آمده توسط هر یک از آنها و مقایسه کارایی آنها از نظر دقت، سرعت و مقاومت در برابر نوفه، یک الگوریتم جدید برای تشخیص قالب و مرکزبایی ستارگان پیشنهاد شده است.

چیدمان مقاله به این ترتیب است که در بخش دوم، مرحله حذف نوفه از تصاویر آسمان شب توضیح داده شده است. در بخش سوم، مرحله تشخیص قالب ستارگان معرفی شده که خود متشکل از دو مرحله آستانه‌گذاری و خوشه‌بندی ستارگان است. در بخش چهارم روش‌های متداول مرکزبایی به همراه روش مرکزبایی پیشنهادی معرفی شده‌اند. در بخش پنجم نتایج پیاده‌سازی روش‌های متداول موجود و روش پیشنهادی به همراه مقایسه آنها آورده شده و در نهایت بخش ششم به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از کل کار اختصاص یافته است.

۲- حذف نوفه

در پردازش تصاویر ستارگان آسمان شب، پیش از هر چیز نوفه تصویر را باید حذف کرد. برای تفکیک سیگنال‌های ستاره‌ای از نوفه، نوفه‌های موجود در تصاویر ستارگان آسمان شب که با حسگر تصویربرداری CCD گرفته شده‌اند، باید شناسایی شوند. از جمله نوفه‌هایی که باید اندازه‌گیری شوند تا سطح آستانه و در نهایت مرکزبایی دقیق یک ستاره در تصاویر نجومی حاصل شود، عبارتند از: بایاس، نوفه جریان تاریک، عدم یکنواختی پاسخدهی پیکسل‌ها، نوفه بازخوانی و عوامل دیگر که در (Wu et al., 2009) معرفی شده‌اند.

بیشتر دوربین‌های CCD به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که زمانی که سیگنال خروجی آشکارساز صفر است، مقداری بالاتر از صفر در خروجی CCD ظاهر می‌شود. به این مقدار ثابت، بایاس گفته می‌شود. همچنین حرارت سبب تحریک اتم‌ها در بستر سیلیکونی CCD شده که در نتیجه، سبب آزاد شدن الکترون‌ها می‌شود. فرآیند تولید الکترون‌های آزاد، حتی در اتاق به‌طور کامل تاریک نیز رخ می‌دهد. از این‌رو جریانی که ناشی از این فرآیند است، جریان تاریک نامیده

در روش‌های خوشه‌بندی، هدف، یافتن مؤلفه‌ها و یا همان نقاط سفید به‌هم‌پیوسته است که در مرحله آستانه‌گذاری به عنوان پیکسل‌های ستارگان مشخص شده‌اند.

پرکاربردترین روش‌های خوشه‌بندی، روش‌های برچسب‌گذاری هستند. مشکل اصلی الگوریتم‌های برچسب‌گذاری از قبیل روش‌های چندگذره، دوگذره، تک‌گذره، پردازش موازی و ردیابی کانتور (Ma et al., 2008; Walczyk et al., 2010) که جزو روش‌های متداول یافتن مؤلفه‌های به‌هم‌پیوسته هستند، تأثیر اندازه تصویر در سرعت محاسبات و همچنین نیاز به حافظه اضافی برای ذخیره تصویر برچسب‌گذاری شده است. همچنین یک مشکل عمده در اکثر روش‌های موجود، یافتن اشیای U شکل در تصویر است که منجر به افزایش حجم محاسبات آنها خواهد شد (Ma et al., 2008).

تاکنون الگوریتم‌های مختلفی نیز برای مرکزبایی ستارگان معرفی شده‌اند، ولی همچنان یافتن الگوریتمی برای مرکزبایی سریع، دقیق و پایدار، از بزرگترین چالش‌های پیش رو برای تعیین وضعیت به کمک ستارگان است. این درحالی است که اکثر الگوریتم‌های موجود کارایی خود را در مواجهه با تصاویر نوفه‌ای از دست می‌دهند.

به‌عنوان نمونه در روش‌هایی که مبتنی بر الگوی مرکزبایی زیرپیکسلی هستند (Li Y. et al., 2009; Quine et al., 2011; Sun et al., 2007) انتخاب درخشان‌ترین پیکسل به‌عنوان مرکز اولیه برای آغاز مرکزبایی، خطاهای فراوانی را در تصاویر نوفه‌ای ایجاد خواهد کرد.

روش‌هایی که بنیان ریاضیات احتمالاتی دارند (Winick, 1986; Huffman, 2006; Udomkesmalee et al., 1994) نیز با وجود دارا بودن دقت قابل توجه، پیچیدگی و حجم محاسباتی را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهند.

روش‌های مبتنی بر مدل یا توزیع ستارگان نیز با توجه به تصادفی بودن شکل هر ستاره به‌دلیل وجود نوفه و سایر عوامل تأثیرگذار از قبیل کشیدگی ستارگان که به‌علت زمان بالای نوردهی، اعوجاجات لنز و یا سرریز پیکسل‌های CCD ایجاد می‌شود، قابلیت کافی نداشته و عمومیت نخواهند داشت؛ زیرا در این روش‌ها برای ستارگان یک مدل ثابت در نظر گرفت شده است. (Samaan, 2003; Merline and Howell, 1995; Fosu et al., 2004; Hao and Xiaoyu, 2012; Sun et al., 2011).

شده و به میزان شدتی که به پیکسل‌ها در اثر این پدیده افزوده می‌شود، نوفه جریان تاریک گفته می‌شود.

عدم یکنواختی پاسخ‌دهی پیکسل‌ها عبارت از تفاوت در حساسیت هر یک از آنها به فوتونهای برخوردی است. نوفه بازخوانی ناشی از تبدیل مقدار فوتون‌های هر پیکسل توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال بوده و ماهیت تصادفی دارد.

پس از تعیین نوفه‌های نام‌برده در مراحل کالیبراسیون، یک سطح نوفه به‌دست می‌آید و در این صورت، فقط پیکسل‌هایی که مجموع الکترون‌های آنها از این مقدار سطح نوفه بزرگ‌تر باشند به‌عنوان پیکسل‌های ستاره‌ای در نظر گرفته می‌شوند.

در این مقاله به‌منظور حذف نوفه تصادفی موجود بر روی تصویر اصلی از روش انتشار ناهمسان‌گرد^۱ استفاده شده است.

در پردازش تصویر و بینایی ماشین، انتشار ناهمسان‌گرد یا انتشار پرونا-مالیک (Perona and Malik, 1990; Mohammadi et al., 2012)، یک تکنیک کاهش نوفه تصویر است، بدون آن که بخش‌ها و قسمت‌های مهم محتوای تصویر را از قبیل لبه‌ها، خطوط یا سایر جزئیاتی که برای تعبیر و تفسیر تصویر با اهمیت هستند، حذف کند.

انتشار ناهمسان‌گرد، در اصل یک تبدیل غیر خطی و وابسته به موقعیت مکانی تصویر اصلی است. در فرمولاسیون اصلی که توسط پرونا و مالیک در سال ۱۹۹۰ ارائه شد، فیلتر وابسته به موقعیت مکانی، همگراست درحالی‌که به محتوای تصویر نیز وابسته است.

این هر دو حالت می‌توانند از طریق تعمیم معادله انتشاری معمولی توصیف شوند به‌طوری‌که ضریب انتشار، به‌جای این‌که یک ثابت باشد، تابعی از موقعیت مکانی تصویر بوده و به‌صورت یک ماتریس فرض می‌شود. به‌صورت تفصیلی اگر $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ معرف یک زیر مجموعه از یک صفحه باشد و $I(\cdot, t): \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ یک خانواده از تصاویر سطح خاکستری، انتشار ناهمسان‌گرد به‌صورت زیر تعریف می‌شود؛

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}(c(x, y, t)\nabla I) = \nabla c \cdot \nabla I + c(x, y, t)\Delta I \quad (1)$$

به‌طوری‌که Δ معرف لاپلاسیان، ∇ معرف گرادیان، $\text{div}(\cdot)$ عملگر دیورژانس و $c(x, y, t)$ ضریب انتشار است.

^۱ Anisotropic diffusion

$c(x, y, t)$ نرخ انتشار را کنترل کرده و به‌طور معمول به‌صورت تابعی از گرادیان تصویر جهت حفظ لبه‌ها انتخاب می‌شود.

پرونا و مالیک دو تابع زیر را برای ضریب انتشار پیشنهاد کردند:

$$c(\|\nabla I\|) = e^{-\left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (2)$$

$$c(\|\nabla I\|) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (3)$$

که در آن ثابت K حساسیت به لبه را کنترل کرده و به‌طور معمول به‌صورت تجربی و یا تابعی از نوفه تصویر انتخاب می‌شود.

این روش، نقاط با شدت درخشندگی بالای تصویر که همان پیکسل‌های ستاره هستند را به‌طور تقریبی بدون تغییر باقی گذاشته و سایر نقاط تصویر را نرم می‌کند. با این عمل قالب اصلی ستاره حفظ شده و تنها نقاط پس‌زمینه فیلتر می‌شوند.

۳- تشخیص قالب ستاره

به‌منظور تشخیص قالب ستارگان درون تصاویر آسمان شب، پیش از هر چیز باید تصاویر از سطح خاکستری به دودویی تبدیل شوند. پس از این کار نقاط سفید را می‌توان به‌عنوان ستاره و نقاط سیاه را به‌عنوان پس‌زمینه در نظر گرفت. در مرحله دوم تشخیص قالب ستاره، باید نقاط سفید به‌دست آمده، خوشه‌بندی شوند که در ادامه، این مراحل توضیح داده شده‌اند.

۳-۱- دودویی کردن تصویر

دودویی کردن تصویر فرآیندی است که پس از انجام آن، می‌توان تصویر را به دو بخش پس‌زمینه و اجرام موجود در آن، دسته‌بندی کرد. این تکنیک به‌طور معمول در تصاویر نجومی برای مجزا کردن اجرامی چون ستارگان و سیارات از پس‌زمینه کاربرد زیادی دارد.

به‌طور کلی، آستانه‌گذاری تصاویر به‌صورت عمومی انجام می‌شود که طی این فرآیند یک تصویر با سطوح خاکستری متفاوت با استفاده از یک سطح آستانه مشخص، تبدیل به یک تصویر دودویی می‌شود. در این بخش، علاوه‌بر

ج) محاسبه میانگین هر دو قسمت و میانگین گیری از این دو میانگین،

$$\begin{aligned} T_1 &= \text{mean}(I(i, j) > T) \\ T_2 &= \text{mean}(I(i, j) < T) \\ T_3 &= \text{mean}(T_1, T_2) \end{aligned} \quad (6)$$

د) مقایسه این میانگین (T_3) با مقدار آستانه،

$$T = \begin{cases} T_3 & \text{if } |T_3 - T| < 25 \\ T & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

ه) تکرار مراحل از مرحله (ب) اگر شرط $|T_3 - T| < 25$ برقرار شود و در غیر این صورت عدم تغییر آستانه اولیه. لازم به ذکر است که مقدار آستانه ۲۵ به صورت تجربی برای این دسته از تصاویر سطح خاکستری (۲۵۵~۰) بدست آمده است.

۳-۱-۲- روش‌های آستانه‌گذاری محلی

در روش‌های آستانه‌گذاری عمومی، تنظیم سطح آستانه بالا موجب می‌شود تا احتمال آشکارسازی ستاره‌های نادرست و نوفه ناشی از مقادیر جریان تاریک، کم شود. درحالی‌که این عمل موجب می‌شود تا بر روی صفحه تصویر، ستاره‌های کم‌نور و ستاره‌هایی که شدت نور آنها از این سطح آستانه کم‌تر است، حذف شوند. همچنین، تنظیم سطح آستانه پایین، موجب پردازش ستاره‌های کم‌نور می‌شود، ولی نمی‌تواند بین ستاره‌های واقعی و پیکسل‌های نوفه‌ای تفکیکی قائل شود.

از طرف دیگر، در برخی تصاویر آسمان شب به‌علت وجود نور ماه یا منابع نوری دیگر، روشنایی در کل تصویر به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود که این امر روش‌های آستانه‌گذاری عمومی را با مشکل اساسی مواجه خواهد ساخت.

برای از میان برداشتن مشکلات اشاره‌شده، روش‌های آستانه‌گذاری محلی ارائه شده‌اند که در ادامه به معرفی آنها پرداخته شده است.

۳-۱-۲-۱- روش آستانه‌گذاری محلی تطبیقی (Cristo et al., 2008)

در این روش به‌منظور رفع مشکل عدم یکنواختی درخشندگی و همچنین غلبه بر نوفه موجود در تصویر از یک روش آستانه‌گذاری تطبیقی استفاده شده که مبتنی بر هیستوگرام بهبود یافته تصویر است. در این روش که به

روش آستانه‌گذاری عمومی، روش‌های آستانه‌گذاری محلی تطبیقی و همچنین روش پیشنهادی معرفی شده‌اند.

۳-۱-۱- روش‌های آستانه‌گذاری عمومی

یک راه‌کار ساده برای فرآیند دودویی کردن، استفاده از الگوریتم آستانه‌گذاری عمومی است. در این روش کلیه پیکسل‌های بزرگ‌تر از یک آستانه مشخص، تبدیل به یک و پیکسل‌های زیر حد آستانه تبدیل به صفر می‌شوند.

۳-۱-۱-۱- روش آستانه‌گذاری دستی

در این مرحله از روش همسان‌سازی که در رابطه ۴ نشان داده شده، استفاده شده است. اگر $I(i, j)$ موقعیت پیکسل تصویر حذف نوفه شده باشد، معادله همسان‌سازی عبارت است از (Mohammadi et al., 2012):

$$J(i, j) = \begin{cases} m + \left(\sqrt{\frac{v}{v_0}} \times (I(i, j) - m_0)\right) & \text{if } I(i, j) > m \\ m - \left(\sqrt{\frac{v}{v_0}} \times (I(i, j) - m_0)\right) & \text{if } I(i, j) < m \end{cases} \quad (4)$$

به‌طوری‌که m_0 و v_0 مقادیر اولیه و m و v به ترتیب مقادیر دلخواه میانگین و واریانس بوده و $J(i, j)$ تصویر همسان‌سازی شده خروجی است. در این روش که از آستانه‌گذاری دستی استفاده شده است، یک مقدار آستانه تجربی برای کل تصویر انتخاب شده و به آن اعمال می‌شود. از آنجایی که تمام تصاویر در مرحله پیش‌پردازش همسان‌سازی می‌شوند استفاده از یک آستانه ثابت برای تمام تصاویر راه حل مناسبی خواهد بود.

۳-۱-۱-۲- روش آستانه‌گذاری خودکار

در این روش مقدار آستانه کل تصویر I با استفاده از الگوریتم زیر تعیین می‌شود (Gonzalez and Woods, 2008):

الف) انتخاب یک آستانه اولیه طبق رابطه ۵،

$$T = \frac{\min(I) + \max(I)}{2} \quad (5)$$

ب) تقسیم تصویر به دو ناحیه مقادیر بزرگ‌تر و کوچک‌تر از مقدار T ،



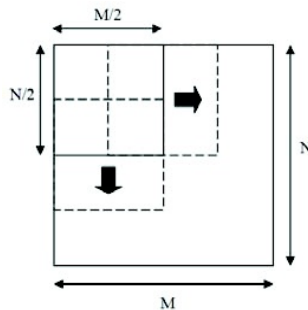
4	5	7	9	4	1	2	2
4	9	12	17	0	4	1	3
7	13	16	25	3	1	0	4
9	16	22	33	2	1	3	2

(الف) (ب)
 (شکل-۲): الف) نمایش مقادیر بخشی از یک تصویر،
 ب) تصویر مجموع آن بخش مورد نظر.

ج) مقایسه میانگین به دست آمده در مرحله (ب) با یک آستانه دلخواه،
 د) اگر میانگین به دست آمده برای پیکسل مورد نظر t درصد از مقدار آستانه مطلوب بیش تر باشد، به پیکسل معادل در تصویر دودویی مقدار 1 و در غیر این صورت مقدار 0 اختصاص می یابد.

۳-۲-۱-۳- روش آستانه گذاری پیشنهادی
 مراحل روش آستانه گذاری پیشنهادی به شرح زیر است؛
 الف) تقسیم بندی تصویر به ۹ زیر تصویر

تصویر اولیه همانند شکل (۳)، به ۹ زیر تصویر مساوی تقسیم می شود. تعداد زیر تصاویر متناسب با ابعاد تصویر ورودی انتخاب می شود که در اینجا با توجه به اندازه تصویر آزمایشی، تعداد آنها ۹ در نظر گرفته شده است.



(شکل-۳): تقسیم بندی تصویر به ۹ زیر تصویر

افزایش تعداد زیر تصاویر معادل با کاهش ابعاد آنهاست که در برخی موارد این کاهش ابعاد موجب در بر گرفتن قسمتهایی از تصویر آسمان خواهد شد که فاقد ستاره هستند.

نتیجه این امر انتخاب یک آستانه محلی در زیر تصویر مزبور با توجه به اندازه پیکسل های پس زمینه و مقادیر نوفه آنها بوده و حاصل آستانه گذاری آن زیر تصویر، انتخاب

صورت یک جعبه سیاه طراحی شده است، پس از ورود تصویر آسمان شب و اعمال پی در پی تعدادی فیلتر، اطلاعات مربوط به هر شیء در خروجی تولید می شود. مراحل این روش به صورت خلاصه عبارتند از؛

الف) تبدیل تصویر RGB (سه کاناله) به تک کاناله از طریق جمع کردن سه کانال و ذخیره آنها در یک ماتریس کمکی؛

ب) اعمال یک فیلتر بالاگذر 3×3 به منظور گسترده تر کردن اشیای روشن و فشرده تر کردن اشیای پخش شده؛

ج) تخمین مقدار بهینه هیستوگرام به منظور فراهم کردن امکان تشخیص تعلق یک پیکسل به پس زمینه یا ستاره؛

د) استخراج هر شیء پس از شناسایی و سپس استخراج اطلاعات مربوط به آن تا حد امکان؛

ه) اعمال فیلتری به منظور حذف پیکسل های اضافی از اشیای پخش شده ای که به عنوان ستاره شناسایی شده اند؛

و) اعمال معیاری برای آنالیز هر شیء آشکار شده با هدف یافتن اجرام آسمانی کوچک درون مجموعه ای بزرگ (کهکشان ها و سحابی ها)؛

ز) اعمال معیاری برای تشخیص اشیاء تیره تر.

۳-۲-۲- روش آستانه گذاری تطبیقی محلی (Bradley and Roth, 2007)

این روش که بهبود یافته روش آستانه گذاری Wellner (Bradley and Roth, 2007) است به منظور از بین بردن اثرات عدم یکنواختی درخشندگی در تصاویر و نیز افزایش سرعت عملیات آستانه گذاری طراحی شده است که مراحل آن عبارتند از؛

الف) محاسبه تصویر مجموع در اولین مرور از تصویر؛

تصویر مجموع طبق شکل ۲، از جمع هر پیکسل تصویر اصلی با مقادیر تمام پیکسل های قبل از خودش به دست می آید.

ب) محاسبه میانگین اندازه پیکسل های درون یک پنجره با ابعاد $s \times s$ به مرکزیت هر پیکسل با استفاده از تصویر مجموع به دست آمده در مرحله (الف)،

۳-۲-۲- خوشه‌بندی پیکسل‌های ستارگان

الگوریتم خوشه‌بندی یا یافتن اجزای متصل به هم، برای یافتن اشیای موجود در تصویر به کار گرفته می‌شود. در این الگوریتم تمامی پیکسل‌های سفیدرنگ متصل به هم در تصویر، یک خوشه را تشکیل می‌دهند.

تاکنون روش‌های متعددی برای تعیین نقاط متصل به هم معرفی شده است (Gonzalez and Woods, 2008; Bouman, 2012) که در ادامه پرکاربردترین آنها به همراه یک روش پیشنهادی معرفی شده‌اند.

۳-۲-۱- روش‌های برچسب‌گذاری

در روش‌های برچسب‌گذاری، تمام مؤلفه‌های به‌هم‌پیوسته درون تصویر یافته شده و به همه پیکسل‌های درون هر مؤلفه یک برچسب اختصاص می‌یابد.

تاکنون تکنیک‌های گوناگونی برای برچسب‌گذاری معرفی شده‌اند که برخی از آنها عبارتند از روش چندگذره، روش دوگذره، روش تک‌گذره، روش ردیابی کانطور و روش پردازش موازی (Ma et al., 2008; Walczyk et al., 2010).

۳-۲-۲- روش تجمع همسایگی

در این روش هر پیکسلی که مقدارش از سطح آستانه عمومی بیشتر باشد، به‌عنوان بخشی از یک ستاره در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب هشت پیکسل احاطه‌کننده آن، آزمایش شده (این آزمایش برای پیکسل‌های همسایه نیز ادامه می‌یابد) و پیکسل‌های دور هم گرد آمده‌ای که مقادیر آنها از سطح نوبه بالاتر باشد به‌عنوان قالب‌های ستاره در نظر گرفته می‌شوند. وقتی که یک پیکسل خاص به‌عنوان بخشی از یک ستاره مشخص، تعیین شود، آن پیکسل از لیست پیکسل‌های آزمایش‌شونده خارج می‌شود. ردیاب‌های ستاره LIST و FAR-MST، از روش فوق استفاده می‌کنند (Samaan, 2003).

۳-۲-۳- روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی خوشه‌بندی، مختصات تمام نقاط سفید که در مرحله آستانه‌گذاری مشخص شده‌اند در یک ماتریس $2 \times M'$ تعداد نقاط سفید است و ۲ برای ذخیره مختصات در راستای x و y به نام ماتریس سفید جمع‌آوری می‌شوند. تفکیک این نقاط و تشخیص مؤلفه‌های به‌هم‌پیوسته در مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شود:

تعدادی از پیکسل‌های نوبه‌ای پس‌زمینه به‌عنوان ستاره خواهد بود.

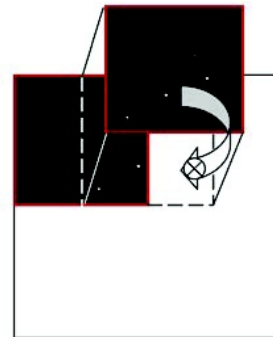
در این مقاله برای جلوگیری از ایجاد این مشکل، ابعاد زیرتصاویر به‌طور تجربی معادل $1/4$ ابعاد تصویر اصلی در نظر گرفته شده‌اند.

ب) تعیین آستانه برای هر زیر تصویر و تشکیل تصویر دودویی

برای هر زیر تصویر در این مرحله یک آستانه مجزا با استفاده از روش ۳-۱-۱-۲ انتخاب می‌شود. پس از تعیین مقدار آستانه و اعمال آن به زیرتصاویر سطح خاکستری، تصویر باینری تولید می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، نکته قابل توجه در مورد این روش پیشنهادی این است که زیرتصاویر دودویی حاصل از آستانه‌گذاری محلی، در موقعیت متناظر خود در یک تصویر خالی جانشانی شده و بخش‌های دارای هم‌پوشانی در هم ضرب می‌شوند.

حاصل این ضرب، تأثیر آستانه بالاتر به بخش‌های دارای هم‌پوشانی است؛ زیرا هر زیر تصویر که آستانه بالاتری داشته باشد حاوی نوبه کمتری است و این به معنی تعداد نقاط صفر بیشتر در آن ناحیه است. از آنجایی که ضرب دودویی به معنای غلبه نقاط صفر به یک است، این عمل خودبه‌خود نقاط نوبه‌ای احتمالی در مناطق هم‌پوشان را از بین می‌برد.



(شکل - ۴): تشکیل تصویر دودویی نهایی با ضرب هر زیر تصویر در تصویر سفید

به همین علت استفاده از زیرتصاویر دارای هم‌پوشانی تا حد زیادی به کاهش نوبه کمک کرده و از طرف دیگر اثر پیکسل‌های مرزی را نیز که در زیرتصاویر غیرهمپوشان محاسبه نمی‌شوند از بین می‌برد.

$$(x_c, y_c) = \frac{\sum_i \sum_j X(i, j) I(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j)} \quad (8)$$

به طوری که (x_c, y_c) مرکز ثقل محاسبه شده است.

۴-۱-۲- روش مرکز ثقل وزن دار تکرار شونده^۲ (IWC_{oG})

یک لکه ستاره به طور ایده آل مانند یک الگوی توده ای است که به سادگی قابل تقریب زدن به یک تابع گوسی دوبعدی است. با بهره گیری از شکل این لکه، می توانیم رابطه تخمین مرکز ثقل را با یک تابع وزنی و وزن دهی کنیم (Vyas et al., 2009):

$$(x_c, y_c) = \frac{\sum_i \sum_j X(i, j) I(i, j) W(i, j)}{\sum_i \sum_j I(i, j) W(i, j)} \quad (9)$$

به طوری که $W(x, y)$ تابع وزنی گوسی با توزیع σ به صورت زیر است:

$$W(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y-y_c)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (10)$$

از آنجایی که تابع وزن دهی رابطه ۱۰ بستگی به موقعیت مرکز ثقل و اندازه ستاره دارد که هیچ کدام تحت کنترل ما نیستند، یک روش تکرار شونده ارائه می شود.

به عنوان حدس اولیه، مرکز تصویر به عنوان تخمین مرکز ثقل و 1/4 طول تصویر به عنوان توزیع (عرض) ستاره در نظر گرفته می شود. توزیع ستاره و موقعیت مرکز ثقل در پایان هر تکرار به طور موفقیت آمیز اصلاح می شوند.

۴-۱-۳- روش مرکز یابی وزن دهی شده با شدت درخشندگی (IWC)

روش مرکز یابی وزن دهی شده با شدت درخشندگی^۳ یا IWC (Vyas et al., 2009)، یک روش مرکز ثقل ارائه شده در رابطه ۹ است با این تفاوت که در اینجا تابع وزنی، وابسته به شدت درخشندگی است.

$$W(x, y) = I^P(x, y) \quad (11)$$

الف) انتخاب اولین پیکسل ماتریس سفید به عنوان پیکسل مرجع؛

ب) حذف مختصات پیکسل مرجع از ماتریس سفید و ذخیره آن در یک خوشه مجزا؛

ج) جستجو برای یافتن همسایه های ۸ گانه پیکسل مرجع درون ماتریس سفید (نقاطی که فاصله اقلیدسی آنها از پیکسل مرجع کمتر یا مساوی $\sqrt{2}$ است)؛

د) حذف مختصات این همسایگی های یافته شده از ماتریس سفید و افزودن آنها به خوشه؛

ه) جستجوی ماتریس سفید برای یافتن همسایگی های هشت گانه همسایگی هایی که به تازگی وارد خوشه شدند؛

و) تکرار مراحل (د) و (ه) تا جایی که دیگر همسایگی برای پیکسل های خوشه، در ماتریس سفید باقی نماند؛

ز) آغاز مجدد فرایند خوشه بندی برای پیکسل های باقیمانده درون ماتریس سفید یا توقف عملیات در صورت باقی نماندن هیچ پیکسل.

۴- روش های مرکز یابی

به منظور بررسی روش های مرکز یابی، روش های مبتنی بر وزن، مبتنی بر مدل ستاره، احتمالاتی، زیر پیکسلی و روش پیشنهادی پیاده سازی شده اند. در این بخش تک تک این الگوریتم ها معرفی شده و در نهایت با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

۴-۱- روش های مبتنی بر وزن

روش های وزنی، پر کاربردترین الگوریتم های مرکز یابی در تصاویر ستارگان آسمان شب هستند که در ادامه معرفی خواهند شد.

۴-۱-۱ روش مرکز ثقل (CoG)

روش مرکز ثقل^۱ یا CoG (Vyas et al., 2009)، روشی است که مرکز هندسی یک شیء را از طریق میانگین گیری سراسری به دست می آورد. اگر $I(x, y)$ یک تصویر دوبعدی با ابعاد $M \times M$ و مقادیر گسسته شدت روشنایی در موقعیت های CoG باشد، $X_{ij} = (x_i, y_j)$ ، $i, j = 1, 2, \dots, M$ عبارت خواهد بود از:

¹ Center of Gravity

² Iterative Center of Gravity

³ Intensity Weighted Centroiding

۴-۲- تکنیک تخمین گر حداکثر شباهت (MLE)

ایده تخمین گر حداکثر شباهت^۲ (MLE) برگرفته از مشتق مربع کرامر-راو^۳ دوبعدی کران پایین (Winick, 1986; Huffman, 2006) است که به ایجاد کران پایین برای خطای میانگین یک تخمین گر موقعیت بایاس نشده کمک می‌کند.

اندازه لکه ستاره با تغییر فاصله کانونی زیرسیستم نوری قابل تنظیم است که معادل با تغییر عرض PSF در تصویر شبیه‌سازی شده است. وینیک به بحث درباره اینکه یک نسبت خاص بین اندازه لکه تصویر و اندازه پیکسل وجود دارد که خطای تخمین موقعیت را حداقل می‌کند، پرداخته است.

اندازه‌های لکه تصویری خیلی بزرگ به این معنی هستند که تصویر بر روی تعداد پیکسل‌های زیادی پخش شده و این بدان معناست که تعداد الکترون‌های کمتری به هر پیکسل اختصاص یافته است. بنابراین تشخیص این که کدام پیکسل‌ها حاوی نوفه خالص هستند، دشوار می‌شود. از طرفی اندازه‌های لکه تصویری که بسیار کوچک هستند ممکن است حاوی اکثریت الکترون‌های تنها درون یک پیکسل باشند که این امر دقت زیرپیکسلی را غیر ممکن می‌سازد. هدف وینیک تعیین بهترین نسبت اندازه لکه تصویر به اندازه پیکسل بوده است.

۴-۳- روش تابع توزیع نقطه‌ای PSF

اساس این تکنیک بر این اصل استوار است که تمامی ستاره‌های یک فریم CCD، توزیع نقاط یکسانی دارند که به اپتیک دوربین وابسته است و فقط در میزان شدت نور، اندازه و موقعیت‌هایشان با هم تفاوت دارند. به همین منظور در این روش سعی می‌شود تا یک مدل برای ستاره به‌دست آورده شود تا با انطباق آن با قالب ستاره، پارامترهایی همچون نسبت اندازه و موقعیت ستاره را استخراج کرد.

در این راستا الگوریتم‌های بسیاری از جمله MLE و الگوریتم‌های ژنتیک پیاده‌سازی و استفاده شده‌اند. معروف‌ترین معادله ریاضی مورد استفاده برای توصیف یک ستاره، تابع گوسین است که توسط Buil در سال ۱۹۹۱ ارائه شد (Samaan, 2003; Fosu et al., 2004; Sun et al., 2011).

به‌طوری که p هر مقدار مثبت حقیقی بزرگ‌تر از یک را می‌تواند اختیار کند. از نظر ریاضیاتی، مرکزبانی وزن‌دهی شده با شدت درخشندگی با $p=1$ بهینه‌ترین روش در حضور نوفه است (Vyas et al., 2009).

۴-۱-۴- روش گشتاور وزنی

ساده‌ترین و پرکاربردترین تخمین مرکزبانی برای یک تابع توزیع نقطه‌ای، مجموع حاشیه‌ای یا توزیع‌های گشتاور اول هستند. با آغاز از یک مرکز ستاره نه چندان دقیق، مقدار شدت روشنایی تمام پیکسل‌های درون یک کادر کوچک درون تصویر I با مرکزیت مرکز تصویر و ابعاد $2L+1 \times 2L+1$ در راستای x و y با یکدیگر جمع می‌شوند. محاسبه مرکز x و y به روش (Howell, 2006) در ادامه توضیح داده شده است. نخست توزیع‌های حاشیه‌ای تابع توزیع نقطه‌ای (PSF)^۱ به‌صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_i = \sum_{j=-L}^L I(i, j) \quad (12)$$

$$J_j = \sum_{i=-L}^L I(i, j) \quad (13)$$

و سپس متوسط شدت به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{I} = \frac{1}{2L+1} \sum_{i=-L}^L I_i \quad (14)$$

$$\bar{J} = \frac{1}{2L+1} \sum_{j=-L}^L J_j \quad (15)$$

در نهایت مرکز ثقل وزن‌دهی شده شدت از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$x_c = \frac{\sum_{i=-L}^L (I_i - \bar{I})x_i}{\sum_{i=-L}^L (I_i - \bar{I})}, \quad I_i - \bar{I} > 0 \quad (16)$$

$$y_c = \frac{\sum_{j=-L}^L (J_j - \bar{J})y_j}{\sum_{j=-L}^L (J_j - \bar{J})}, \quad J_j - \bar{J} > 0 \quad (17)$$

به‌طوری که $I(i, j)$ اندازه درایه (i, j) ام و x_i و y_j به ترتیب سطر و ستون درایه (i, j) ام هستند. در نهایت x_c و y_c تعیین‌کننده مرکز ثقل این مقادیر هستند.

² Maximum Likelihood Estimator

³ Cramer-Rao

¹ Point Spread Function



۴-۴- روش زیر پیکسلی

در (Quine et al., 2007) برای یافتن مراکز با دقت زیر پیکسلی در جهت x شدت دو پیکسل همسایه یا ردیفها با هم مقایسه می شوند.

در این روش یک تقریب غیر خطی برای محاسبه مرکز بر اساس مرزهای پیکسل، انحراف معیار نقاط روشن و نسبت شدت پیکسل های همسایه به دست می آید.

۴-۵- روش پیشنهادی: مرکز یابی ستارگان با

استفاده از روش درون یابی مرحله ای

همسایگی ۸ تایی

مراحل الگوریتم مرکز یابی پیشنهادی به ترتیب زیر است:

الف) ابتدا مرکز اولیه با استفاده از روش IWC انتخاب می شود (مقادیر غیر صحیح مختصات مرکز به دست آمده باید به مقدار صحیح گرد شوند).

ب) پیکسل مرکزی (O) و همسایه های هشت تایی آن ($a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$) همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است به دست آمده و مقدار زیر پیکسل های پیکسل مرکزی ($sp_1 \sim sp_4$) با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} sp_1 &= \frac{a_1 + a_2 + 2O}{4} \\ sp_2 &= \frac{a_2 + a_3 + 2O}{4} \\ sp_3 &= \frac{a_3 + a_4 + 2O}{4} \\ sp_4 &= \frac{a_4 + a_1 + 2O}{4} \end{aligned} \quad (18)$$

b_1	a_2	b_2
b_{1N}	a_{2N}	b_{2N}
a_{1N}	O_N	a_{3N}
a_1	O	a_3
b_{4N}	a_{4N}	b_{3N}
b_4	a_4	b_3

(شکل-۵): استفاده از همسایگی های ۸ تایی در محاسبه

زیر پیکسل مرکزی: $(a_1 \sim a_4)$ و همسایگی های ۸ تایی پیکسل مرکزی O و $(a_{1N} \sim a_{4N})$ و همسایگی های ۸ تایی زیر پیکسل مرکزی جدید O_N

ج) مقدار بیشینه ($sp_1 \sim sp_4$) به عنوان پیکسل مرکزی جدید در نظر گرفته شده و با توجه به پیکسل مرکزی جدید، مختصات مرکز ستاره به روز می شود؛

$$O_N = \max \{sp_1, \dots, sp_4\} \quad (19)$$

به طوری که O_N مرکز ثقل جدید است.

د) با توجه به مرکز جدید، همسایگی هشت تایی و مختصات مرکز ستاره به صورت زیر به روز می شوند؛

اگر $O_N = sp_1$ آنگاه $x = x - ad$ و $y = y - ad$ ؛

اگر $O_N = sp_2$ آنگاه $x = x - ad$ و $y = y + ad$ ؛

اگر $O_N = sp_3$ آنگاه $x = x + ad$ و $y = y + ad$ ؛

اگر $O_N = sp_4$ آنگاه $x = x + ad$ و $y = y - ad$ ؛

به طوری که $ad = 2^{-(i+1)}$ و i تعداد تکرارهاست.

زیر پیکسل ها مشابه شکل (۵) به روز می شوند (این شکل برای حالتی است که $O_N = sp_1$) در این حالت اندازه هر زیر پیکسل از حاصل جمع اندازه دو پیکسل مجاور با دو برابر پیکسلی که زیر پیکسل در آن قرار دارد به دست می آید. برای مثال در شکل (۵) داریم:

اگر $O_N = sp_1$ آنگاه $a_{4N} = sp_4$, $a_{3N} = sp_2$, $a_{2N} = (b_1 + O + 2a_2) / 4$ و $a_{1N} = (b_1 + O + 2a_1) / 4$ به طوری که

$$\begin{aligned} b_{1N} &= \frac{a_1 + a_2 + 2b_1}{4} \\ b_{2N} &= \frac{O + b_2 + 2a_2}{4} \\ b_{3N} &= sp_3 \\ b_{4N} &= \frac{b_4 + O + 2a_1}{4} \end{aligned} \quad (20)$$

ه) پیکسل مرکزی پیشنهادی با پیکسل مرکزی جدید جایگزین شده

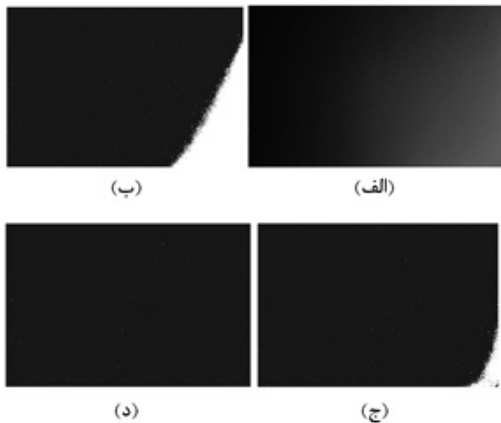
$$O = O_N \quad (21)$$

و برای رسیدن به دقت مطلوب، الگوریتم از مرحله (ج) مجدداً تکرار می شود. دقت مطلوب به طور کامل اختیاری است و با توجه به مقدار نرخ ad تعیین می شود. به طور مثال دقت مرکز یابی در تکرار اول به $1/4$ پیکسل، در تکرار دوم به $1/8$ پیکسل و در تکرار سوم به $1/16$ پیکسل افزایش یافته و با افزایش تکرارها دقت مرکز یابی با نرخ $2^{-(i+1)}$ افزایش می یابد. نکته قابل توجه اینجاست که افزایش دقت به معنی افزایش تکرارها و افزایش تکرارها به معنای زمان بیشتر است.

۵-۲- آستانه‌گذاری

به منظور بررسی کامل قابلیت روش آستانه‌گذاری پیشنهادی، به مقایسه نحوه عملکرد و سرعت اجرای آن توأمان پرداخته شده است.

همان‌طور که در تصاویر شکل (۷) نشان داده شده است، روش آستانه‌گذاری محلی پیشنهادی توانسته است به خوبی بر مشکل عدم یکنواختی توزیع درخشندگی غلبه کند و آستانه‌ای مناسب برای آشکارسازی ستارگان فراهم آورد.



(شکل - ۷): (الف) تصویر اصلی (ب) تصویر دودویی شده با روش آستانه‌گذاری عمومی دستی (ج) تصویر دودویی شده با روش آستانه‌گذاری عمومی خودکار (د) تصویر دودویی شده با روش محلی پیشنهادی

در اینجا ذکر این نکته ضروری است روش‌های عمومی در صورت دارا بودن سرعتی معادل یا حتی بهتر از سرعت روش پیشنهادی در این مقاله، جایگزینی مناسب برای روش پیشنهادی یا به‌طور کلی روش‌های تطبیقی نخواهند بود. علت آن است که تصویر خروجی حاصل از آنها، همان‌طور که در شکل (۷-ب) و (۷-ج) نشان داده شده است، در مرحله خوشه‌بندی، الگوریتم پردازش تصویر را با مشکل بسیار بزرگی مواجه خواهد کرد؛ زیرا همان‌طور که اشاره شد، خوشه‌بندی توده سفید گوشه تصویر با چنین ابعادی بسیار زمان‌بر خواهد بود.

روش‌های آستانه‌گذاری تطبیقی (Bradley and Roth, 2007; Cristo et al., 2008) نیز اگرچه از نظر عملکرد ممکن است به توانایی روش پیشنهادی در این مقاله باشند ولی نکته تعیین‌کننده در تمام مراحل الگوریتم پردازش

پس همواره باید در یک حد متعادل، دقت و سرعت را در کنار هم داشت.

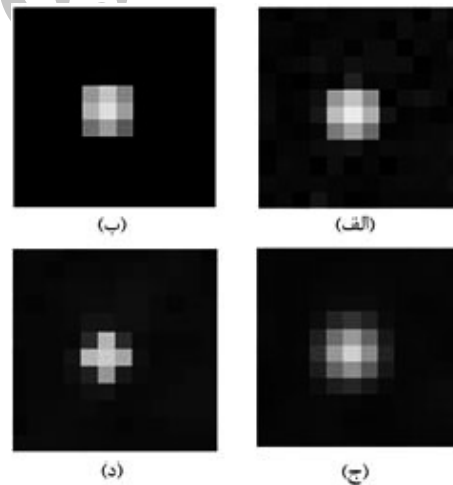
۵- نتایج پیاده‌سازی

این بخش، به مقایسه روش‌های الگوریتم پردازش تصاویر آسمان شب پیشنهادی در این مقاله و روش‌های متداول موجود اختصاص یافته است. به همین منظور، از تصاویر واقعی و شبیه‌سازی شده معین برای مقایسه عملکرد تمام روش‌ها به‌طور یکسان بهره برده شده است.

برای مقایسه روش‌های حذف نوفه و آستانه‌گذاری، از یک تصویر واقعی آسمان شب که با دوربین Canon EOS 5D Mark II و با ابعاد 3744×5616 تهیه شده و دارای عدم توزیع یکنواخت درخشندگی است، استفاده شده است.

۵-۱- حذف نوفه

نتیجه اعمال فیلترهای حذف نوفه گوسی و میانگین‌گیر به همراه روش انتشار ناهمسان‌گرد در شکل (۶) نشان داده شده است.



(شکل - ۶): نتایج اعمال روش‌های حذف نوفه؛ (الف) تصویر اصلی نوفه‌ای، (ب) پس از اعمال روش انتشار ناهمسان‌گرد، (ج) پس از اعمال فیلتر میانگین‌گیر و (د) پس از اعمال فیلتر گوسی.

با توجه به شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که روش انتشار ناهمسان‌گرد در تصاویر آسمان شب نوفه‌ای، به خوبی قادر به حذف نوفه با حفظ محتویات مهم تصویر یعنی ستارگان خواهد بود.

۵-۳- خوشه‌بندی

به‌منظور ارزیابی روش خوشه‌بندی پیشنهادی، در این زیربخش به مقایسه آن با روش‌های متداول دیگر پرداخته شده است.

روش‌های برجسب‌گذاری که به‌منظور خوشه‌بندی یا یافتن مؤلفه‌های بهم‌پیوسته به کار می‌روند، چهار نقطه‌ضعف کلی دارند که روش خوشه‌بندی پیشنهادی آنها را ندارند. این نقاط ضعف عبارتند از (Ma et al., 2008; Walczyk et al., 2010):

(الف) نیاز به بیش از یک مرتبه مرور یا گذر از کل تصویر برای برجسب‌گذاری؛

(ب) نیاز به یک حافظه اضافی برای ذخیره تصویر برجسب‌گذاری‌شده؛

(ج) نیاز به مرور یا گذر اضافی به‌منظور تشخیص اشیای U شکل در تصویر؛

(د) وابسته بودن حجم محاسباتی عملیات به اندازه تصویر. هرچند روش تک‌گذره، مشکلات قسمت‌های الف تا ج را ندارد، اما سرعت آن به‌شدت وابسته به اندازه تصویر بوده و نیاز به حافظه آن در بدترین حالت، ممکن است از حالت دوگذره نیز بیشتر شود (Walczyk et al., 2010).

از طرف دیگر، روش ارائه شده در زیربخش ۳-۲-۲ تحت عنوان روش تجمع همسایگی، دارای تفاوتی مشهود با روش پیشنهادی در این مقاله است. در روش تجمع همسایگی، همسایگی‌های هشت‌تایی هر پیکسل درون خوشه، پس از مقایسه با یک آستانه عمومی و به شرط بزرگ‌تر بودن از آن به مجموعه اضافه می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، آستانه‌گذاری عمومی در تصاویری که عدم یکنواختی درخشندگی دارند، قابلیت کافی نخواهد داشت.

درمجموع مزایای روش خوشه‌بندی پیشنهادی را می‌توان به‌طور خلاصه به‌ترتیب زیر بیان کرد:

(۱) بهینه‌سازی زمان جستجو برای تشکیل خوشه؛

در این روش کل تصویر تنها یک‌بار مرور شده و برای یافتن پیکسل‌های همسایگی هر پیکسل در هر خوشه، تنها درون مجموعه پیکسل‌های سفید جستجو صورت می‌پذیرد.

(۲) عدم نیاز به حافظه ذخیره‌سازی بالا؛

در این روش به دو دلیل نیاز به حافظه اضافی از میان می‌رود:

تصاویر ستارگان آسمان شب، دارا بودن دقت و سرعت به‌طور هم‌زمان است.

به‌طور معمول در روش‌های آستانه‌گذاری تطبیقی مانند (Cristo et al., 2008) سرعت، قربانی دقت و کارایی آن روش می‌شود. این روش طبق گفته مؤلفان و با توجه به نتایج پیاده‌سازی، پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای بالایی نسبت به روش‌های استاندارد از قبیل روش آستانه‌گذاری Otsu (Cristo et al., 2008) دارد.

در این مقاله، برای بررسی و مقایسه سرعت پیاده‌سازی، الگوریتم Otsu، که جزو روش‌های استاندارد و متداول آستانه‌گذاری است، به‌عنوان مرجعی برای مقایسه، بر روی تصویر شکل (۷-الف) پیاده‌سازی و نتایج زمانی آن با روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شد. نتایج پیاده‌سازی، بیان‌گر برتری زمانی روش پیشنهادی در این مقاله بوده است.

روش تطبیقی اشاره شده در (Bradley and Roth, 2007) نیز با وجود استفاده از تصویر مجموع به‌منظور ایجاد بهبود در روش Wellner از نظر زمانی، نسبت به روش پیشنهادی در این مقاله سرعت پایین‌تری دارد.

نتایج مقایسه زمانی روش آستانه‌گذاری پیشنهادی با سایر روش‌ها پس از اعمال بر روی تصویر آزمایش با ابعاد 3744×5616 در جدول (۱) نشان داده شده است.

(جدول - ۱): مقایسه زمانی پیاده‌سازی روش‌های آستانه‌گذاری عمومی، تطبیقی و روش پیشنهادی بر روی تصویر با ابعاد 3744×5616

روش‌های آستانه‌گذاری	زمان (ثانیه)
روش دستی (عمومی)	۵/۵۶
روش خودکار (عمومی)	۲/۱۴
روش Otsu (عمومی)	۴/۶۹
روش (Cristo et al. 2008) (تطبیقی)	۶/۶۷
روش پیشنهادی در این مقاله	۳/۳۲

همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده است، زمان پیاده‌سازی روش پیشنهادی این مقاله نسبت به سایر روش‌ها به‌جز روش عمومی خودکار بهتر بوده و همان‌طور که ذکر شد، با توجه به شکل (۷)، این زمان بهتر، دلیل برتری روش عمومی خودکار به روش پیشنهادی نخواهد بود.

که نتایج پیاده‌سازی آنها در جدول (۲) نشان داده شده است. به‌منظور محاسبه دقت روش‌های پیاده‌سازی شده، فاصله اقلیدسی مراکز به‌دست آمده توسط هر روش از مراکز واقعی ستارگان محاسبه شده و سپس از این فاصله‌ها میانگین‌گیری شده است تا به این ترتیب خطای مربع میانگین محاسبه شود. در اینجا برای هر نوفه، ۲۵ تصویر، شبیه‌سازی شده است که در مجموع یکصد تصویر شبیه‌سازی شده ایجاد شده‌اند و برای به‌دست آوردن دقت هر روش، از خطای مرکزبایی هر یک از این دسته تصاویر ۲۵ تایی، میانگین‌گیری شده است.



(شکل - ۸): نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی شده آسمان شب با انحراف معیار نوفه ۴

(جدول - ۲): متوسط خطای روش‌های مرکزبایی برای ۴ دسته تصویر ۲۵ تایی شبیه‌سازی شده با نوفه‌های مختلف

روش‌های مرکزبایی	خطای مرکزبایی در واحد پیکسل برای نوفه‌های گوسی با انحراف معیار:			
	$\sigma = 0.5$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$	$\sigma = 4$
CoG	۰/۱۱۰۳	۰/۱۱۸۲	۰/۱۲۵	۰/۱۳۰۲
IWCoG	۰/۱۰۶۱	۰/۰۷۰۱	۰/۱۲	۰/۱۲۵
IWC	۰/۰۶۵۸	۰/۱۱۳۶	۰/۰۷۳۹	۰/۰۷۶۹
گشتاور وزنی	۰/۰۹۰۲	۰/۰۸۴۱	۰/۰۸۲۸	۰/۰۸۱۵
MLE	۰/۱۰۹۹	۰/۱۱۷۸	۰/۱۲۴۵	۰/۱۲۶۹
PSF	۰/۱۲۹۸	۰/۱۲۱۲	۰/۱۱۷۳	۰/۱۱۷۱
روش (Quine et al., 2007)	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵۲۷	۰/۳۵۷۲
روش پیشنهادی	۰/۰۴۱۴	۰/۰۴۱۴	۰/۰۴۱۷	۰/۰۴۱۳

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها از دقت زیرپیکسلی بالاتری برخوردار بوده و در برابر افزایش نوفه نیز مقاومت قابل قبولی از خود نشان داده است. در جدول (۳) نیز زمان مرکزبایی هر یک از روش‌های فوق نشان داده شده است.

نخست: پس از مرور اولیه تصویر و یافتن موقعیت پیکسل‌های سفید، این موقعیت‌ها درون ماتریس سفید ذخیره می‌شوند. سپس عملیات یافتن مؤلفه‌های بهم‌پیوسته (ستارگان)، درون این مجموعه که ابعاد آن بسیار کوچک‌تر از ابعاد کل تصویر است، آغاز می‌شود.

به عبارت دیگر، در طی مدت مرکزبایی به جای کل تصویر، تنها موقعیت و اندازه سطح خاکستری پیکسل‌های درون ماتریس سفید ذخیره می‌شوند.

در صورتی که در روش تجمع همسایگی در کل طول زمان یافتن ستارگان و مرکزبایی، تمام تصویر، فضای حافظه را اشغال می‌کند (Samaan, 2003) و در روش‌های برچسب‌گذاری نیز یک حافظه اضافی به ذخیره تصویر برچسب‌زده شده اختصاص می‌یابد (Ma et al., 2008; Walczyk et al., 2010).

دوم: در این روش هر خوشه یا ستاره شناسایی شده بلافاصله به خروجی رفته و مرکزبایی شده و پس از مرکزبایی، حافظه مربوط به ذخیره‌سازی آن پاک شده تا پیکسل‌های ستاره بعدی در آن ذخیره شوند.

(۳) تشخیص اشیا و اجرام آسمانی با هر نوع شکل هندسی (مانند اشیا U شکل) بدون نیاز به عملیات اضافی،

(۴) عدم وابستگی حجم محاسباتی عملیات به اندازه تصویر؛

(۵) افزایش سرعت محاسبات به مرور زمان پس از یافتن هر ستاره؛

زیرا در این روش با حذف ستارگان از درون ماتریس سفید اندازه ماتریس به تدریج کاهش یافته و در نتیجه سرعت جستجو افزایش می‌یابد.

۴-۵- مرکزبایی

برای ارزیابی روش‌های مرکزبایی، از تصاویر شبیه‌سازی شده با ابعاد 1024×1024 پیکسل با نوفه‌های مختلف استفاده شده است. نمونه‌ای از این تصاویر شبیه‌سازی شده که با توجه به معیارهای شبیه‌سازی تصاویر آسمان شب (Huffman, 2006) تهیه شدند در شکل (۸) نشان داده شده است.

شکل (۸) یک نمونه از تصاویر شبیه‌سازی شده از تصاویر آسمان شب با نوفه‌ای با انحراف معیار ۴ را نشان می‌دهد.

در این مرحله، انواع روش‌های مرکزبایی بر روی یکصد تصویر شبیه‌سازی شده با نوفه‌های رندوم گوسی با انحراف معیارهای به ترتیب ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ پیاده‌سازی شدند

(جدول - ۳): زمان اجرای روش‌های مرکزبایی بر روی تصویر

شبه‌سازی شده با ابعاد ۱۰۲۴×۱۰۲۴

روش‌های مرکزبایی	زمان مرکزبایی (ثانیه)
CoG	۰/۲۹۲
IWCoG	۰/۳۱۵
IWC	۰/۲۹۵
گشتاور وزنی	۰/۳۲
MLE	۲۱۱
PSF	۰/۴۵۸
روش (Quine et al., 2007)	۰/۵۱۷
روش پیشنهادی	۰/۳۱۷

برتری الگوریتم پیشنهادی را با توجه به نتایج پیاده‌سازی می‌توان به‌طور خلاصه به‌صورت زیر بیان کرد: (الف) روش حذف نوفه به‌کار رفته در این مقاله با نام انتشار ناهمسان‌گرد، برای نخستین‌بار در این مقاله و با هدف حذف نوفه این دسته از تصاویر استفاده شده است. مزیت این روش نسبت به فیلتر گوسین و فیلترهای میانگین‌گیر، که فیلترهای حذف نوفه رایج در این کاربرد هستند، این است که نقاط اصلی تصویر را که همان پیکسل‌های ستاره هستند، بدون تغییر حفظ کرده و سایر نقاط تصویر را نرم می‌کند. با این عمل قالب اصلی ستاره حفظ شده و تنها نقاط پس‌زمینه فیلتر می‌شوند.

(ب) برتری قابل توجه روش آستانه‌گذاری محلی پیشنهاد شده در این مقاله، این است که در شرایط عدم توزیع یکنواخت درخشندگی بر خلاف سایر روش‌های مرسوم، به‌خوبی عمل می‌کند. از طرف دیگر زمان اجرای آن نسبت به روش‌های محلی تطبیقی مشابه مناسب‌تر است.

(ج) روش خوشه‌بندی ستارگان نیز که اولین‌بار در این مقاله معرفی شده است، در مقایسه با سایر روش‌ها قابلیت بالاتری دارد. نیاز به حافظه اندک و سرعت بالا از ویژگی‌های برجسته این روش آستانه‌گذاری پیشنهادی است.

(د) با توجه به جدول (۲) و مقایسه با سایر روش‌های متداول مرکزبایی، نکته قابل توجه درباره روش پیشنهادی مرکزبایی آن است که علاوه بر خطای بسیار پایین نسبت به سایر روش‌ها، نسبت به افزایش نوفه مقاومت بالایی دارد؛ زیرا برخلاف سایر روش‌های زیرپیکسلی که بنیان مرکزبایی آنها بر درخشان‌ترین پیکسل استوار است، در این روش، مرکز اولیه با استفاده از مرکزبایی وزنی تعیین شده و سپس روش زیرپیکسلی پیشنهادی، بر روی آن پیکسل انجام می‌شود.

مزیت این عمل آن است که اگر در صورت بالابودن نوفه، مرکز واقعی جایه‌جا شود، مرکزبایی وزنی، پیکسل مرکزی واقعی را به‌عنوان مرکز اولیه ستاره انتخاب می‌کند. با این انتخاب، خللی در مرکزبایی دقیق ستاره وارد نمی‌شود؛ درحالی‌که در روش‌های مرکزبایی زیرپیکسلی دیگر که درخشان‌ترین پیکسل به‌عنوان مرکز اولیه انتخاب می‌شود، با جابه‌جاشدن درخشان‌ترین پیکسل، دقت این روش‌ها نیز به‌شدت کاهش می‌یابد.

همان‌طور که نتایج جدول (۳) نشان می‌دهند، زمان پیاده‌سازی روش پیشنهادی نسبت به اکثر روش‌ها بهتر بوده و نسبت به بقیه نیز دارای اختلاف بسیار اندکی است.

دقت بالا (خطای کم) به همراه زمان اجرای پایین نسبت به سایر روش‌ها، نشان‌دهنده برتری روش مرکزبایی پیشنهادی در این مقاله است. از طرف دیگر در این روش برخلاف روش‌های مبتنی بر نحوه توزیع ستارگان، شکل ستاره و یا نحوه توزیع آن اهمیتی نداشته و تأثیری بر نتیجه مرکزبایی نخواهد داشت.

پیاده‌سازی تمام الگوریتم‌های بالا با نرم‌افزار MATLAB (r2009b) و در یک سیستم با مشخصات Core2Duo CPU 2.93 GHz و RAM 4GB انجام شده است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در آن دسته از روش‌های کمک‌ناوبری که برای تعیین وضعیت فضاپیما از موقعیت ستارگان درون آسمان شب بهره می‌برند، فرایند پردازش تصویر اهمیت و حساسیت بسیار بالایی دارد. هرچه دقت و سرعت این فرایند بالاتر باشد، کارایی و صحت روش‌های کمک‌ناوبری نیز به‌طور چشم‌گیری افزایش خواهند یافت.

مراحل حذف نوفه، آستانه‌گذاری، خوشه‌بندی و درنهایت مرکزبایی ستارگان، از بخش‌های اساسی فرایند پردازش تصویر در این دسته از روش‌های کمک‌ناوبری هستند.

هدف این مقاله، معرفی الگوریتمی جدید، کارا و مؤثر است که در مقایسه با سایر روش‌ها از برتری قابل ملاحظه‌ای برخوردار باشد.

Kuhl Christopher T.F. "Combined Earth-/Star Sensor for Attitude and orbit determination of Geostationary Satellites", Ph.D. thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2005.

Li Y. et al., "Subpixel centroiding algorithm for EMCCD star tracker", International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications, Proceedings of SPIE, Beijing, China, 2009.

Ma Ni, Bailey Donald G., Johnston Christopher T., "Optimised Single Pass Connected Components Analysis", IEEE international conference on field programmable technology, Taipei, 2008.

Merline W.J. and Howell Steve B., "A realistic model for point-sources imaged on array detectors: the model and initial results", Experimental Astronomy, 1995, Vol. 6, No. 1, pp. 163-210.

Mohammadi S. M. et al., "Novel shape-texture feature extraction for medical x-ray image classification", International Journal of Innovative Computing Information and Control, Japan, 2012, Vol. 8, No. 1(B), pp.659-676.

Perona P. and Malik J., "Scale-space and edge detection-n using anisotropic diffusion", IEEE Trans., PAMI, 1990, Vol. 12, No. 7, pp. 629-639.

Quine B. M. et al., "Determining star-image location-n:A new sub-pixel interpolation technique to process image centroids", 2007, Computer Physics Communications, Vol. 177, No. 9, pp. 700-706.

Samaan M. A., "Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification", Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, TX, 2003.

Sun J et al., "A sub pixel centroid algorithm for star image based on Gaussian distribution", Transaction of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2011, Vol. 53, No. 182, pp. 307-310.

Udomkesmalee S. et al, "Stochastic star identification", Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, Vol. 17, No. 6, pp. 1283-1286.

Vyas A. et al., "Performance of centroiding algorithms at low light level conditions in adaptive optics", International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, Kottayam, Kerala, India, 2009.

Walczyk R., Armitage A. and Binnie T.D., "Comparative Study on Connected Component Labeling Algorithms for Embedded Video Processing Systems", IPCV' 10, CSREA press, Las Vegas, USA, Vol. 2, 2010.

از طرف دیگر برخلاف روش‌های مبتنی بر مدل توزیع ستارگان، شکل ستاره اهمیتی نداشته و تأثیری بر نتیجه مرکزبازی نخواهد داشت.

در آینده با پیشرفت علم و تکنولوژی‌های تصویربرداری، سخت‌افزارهای دقیق‌تر، از قبیل دروین‌هایی با لنزهای بسیار دقیق با اعوجاجات بسیار اندک و حس‌گرهای بسیار کم خطا، جایگزین نرم‌افزارهای پیچیده خواهند شد؛ ولی در حال حاضر، با تکنولوژی‌های موجود، الگوریتم‌های پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها توانایی بالاتری دارد.

۷- مراجع

Baker K.L. and Moallem M.M., "Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors", Journal of the Optical Society of America, Opt. Express, 2007, Vol. 15, No. 8, pp. 5147-5159.

Berry R. and Burnell J., "The handbook of astronomical image processing", 2nd Ed., XXVIII, Richmond, VA: Willmann-Bell, Inc., 2005.

Bouman C. A., "Connected component analysis", Digital Image Processing, 2012, Purdue University.

Bradley D. and Roth G., "Adaptive Thresholding Using the Integral Image", Journal of Graphics Tools, 2007, Vol. 12, No. 2, pp. 13-21.

Cristo A. et al., "A novel thresholding method for automatically detecting stars in astronomical images", IEEE international symposium on signal processing and information technology, ISSPIT, Sarajevo, 2008.

Fosu C. et al., "Determination of centroid of CCD star images", International Archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences, 2004, Vol. 35, No. 3, pp. 612-617.

Gonzalez Rafael. C. and Woods Richard. E., "Digital image processing", 3rd Ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, Inc., 2008.

Hao J. and Xiaoyu Fan., "Centroid locating for star image object by FPGA", Advanced Materials research, Trans. Tech publications, Switzerland, 2012, Vols. 403-408, pp. 1379-1383.

Howell Steve B., "Handbook of CCD astronomy", Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University press, 2006.

Huffman K. M., "Designing star trackers to meet micro-satellite requirements", Master thesis of aeronautics and astronautics at the Massachusetts Institute of Technology, 2006.



فرشاد سمیه‌ئی مدرک کارشناسی ارشد خود در سال ۱۳۸۰ در رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش ژئودزی از دانشگاه تهران و مدرک کارشناسی خود را در سال ۱۳۷۶ در رشته مهندسی عمران گرایش نقشه‌برداری

از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرده است. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شناسایی ستاره، تعیین وضعیت دورانی، تطبیق عوارض ژئوفیزیکی زمین، پردازش تصویر و تعیین مدار دقیق ماهواره است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

somayhee@kntu.ac.ir

Winick, K. "Cramer-Rao bounds on the performance of charge-coupled-device optical position estimators," Journal of the Optical Society of America, 1986, Vol. 3, No. 11, pp. 1809-1815.

Wu F., Shen W., Zhou J. and Chen X., "Design and simulation of a novel APS star tracker", International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Optoelectronic Instruments, 2009.



محمدولی ارباب‌میر مدرک

کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۸۹

در رشته مهندسی الکترونیک از

دانشگاه صنعتی مالک اشتر و مدرک

کارشناسی خود را در رشته مهندسی

الکترونیک از دانشگاه صنعتی مالک اشتر دریافت کرده و زمینه‌های تحقیقاتی ایشان ناوبری و بینایی ماشین است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

moh_mza@yahoo.com



سید محمد محمدی مدرک

کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۸۹

در رشته مخابرات گرایش سیستم از

دانشگاه صنعتی شیراز و مدرک

کارشناسی خود را در رشته الکترونیک

در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت کرده است. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان الگوریتم‌های

کمک ناوبری، پردازش تصویر و بینایی ماشین است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

sm.mohammadi@sutech.ac.ir



محمد صادق سلحشور متقی مدرک

کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۹۰

در رشته مهندسی برق گرایش

الکترونیک دیجیتال از دانشگاه صنعتی

امیرکبیر و مدرک کارشناسی خود را در

سال ۱۳۸۷ در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان دریافت کرده و

زمینه‌های تحقیقاتی ایشان پردازش تصویر، بینایی ماشین، شناسایی آماری الگو و داده کاوی است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

s.salahshoor@aut.ac.ir

فصلنامه علمی
دو ساله

