

روشی جدید برای تطابق سریع و مقاوم تصاویر هوایی و ماهواره‌ای بر مبنای زاویه انتخابی و مقیاس

محسن صفدری، پیمان معلم و مهران ستاری

قسم روش‌های مبتنی بر ناحیه و روش‌های مبتنی بر ویژه تقسیم‌بندی می‌گردند. در روش‌های مبتنی بر ناحیه در واقع هیچ ویژه آشکار نمی‌گردد و بیشترین تمرکز در بخش تطابق می‌باشد [۱]. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های همبستگی مکانی، همبستگی فاز و اطلاعات دوطرفه اشاره نمود که به صورت جستجوی پنجره‌ای به دنبال شبیه‌ترین پنجره می‌گردد. در صورتی که بین تصویر هدف و مرجع تبدیلات پیچیده‌ای انجام شده باشد، دیگر این روش‌ها قادر به بازیابی و پیدا کردن تصویر هدف در مرجع نخواهند بود. در روش‌های مبتنی بر ویژه، ساختارهای مهم تصویری، ویژه‌های ناحیه‌ای مانند عوارض طبیعی (جنگل، دریا و خشکی)، خطوط (لبه‌ها، جاده‌ها و رودخانه‌ها) و نقاط (گوشه‌ها، تلاقی خطوط، خمس بالا) به عنوان ویژه انتخاب می‌گردند. پایداری نقاط ویژه یعنی توزیع مناسب نقاط ویژه در تصویر و قابلیت آشکارسازی در هر دو تصویر مرجع و هدف در شرایط مختلف یا به عبارت دیگر نقاط ویژه پایدار تحت شرایط مختلف تصویری (تغییرات هندسی و تغییرات کیفی) در دو تصویر، می‌توانند آشکار، توصیف و تطابق داده شوند. روش‌های مبتنی بر ویژه بر خلاف روش‌های مبتنی بر ناحیه به طور مستقیم از خصوصیات سطح روشنایی تصویر استفاده نمی‌کنند که باعث پایداری بیشتر تطابق‌ها خواهد شد. روش‌های مبتنی بر ویژه نیز به سه دسته ویژه‌های ناحیه‌ای، خطی و نقطه‌ای تقسیم‌بندی می‌گردند.

ویژه‌های ناحیه‌ای، نواحی بسته با وضوح بالا و اندازه مناسب مانند دریاچه‌ها، ساختمان‌ها، جنگل‌ها و مکان‌های شهری می‌باشند که می‌توانند به عنوان ویژه‌هایی جهت تطابق و تثبیت تصویری مورد استفاده قرار گیرند. ویژه‌های محلی می‌توانند با استفاده از روش‌های قطعه‌بندی و تطابق قطعات جدا شده یعنی بررسی پارامترهای قطعه‌بندی انجام شود. ویژه‌های خطی، قطعات خطی، کانتور، خطوط ساحلی، جاده‌ها و نواحی اعضای آناتومی بدن انسان در تصاویر پزشکی می‌باشند که تطابق تصویری با توجه به شباهت این ویژه‌ها از طریق مشخصه خطوط آشکار شده انجام می‌شود. روش‌های استخراج لبه مانند روش‌های Canny و LOG از کاربردی‌ترین روش‌های استخراج لبه می‌باشند. ویژه‌های نقطه‌ای روش‌هایی برای استخراج تلاقی خطوط و جاده‌ها، مرکز ثقل، نقاط وارینانس بالا، تقطیع انحنای محلی توسط روش تبدیل موجک گابریل، انحنای شدید و اکستریم‌های محلی در تبدیل موجک و گوشه‌ها می‌باشند. با توجه به این که جزئیات متعددی در تصاویر هوایی و ماهواره‌ای وجود دارد، روش‌های استخراج نقاط ویژه یا تطابق نقاط ویژه برای تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای پیشنهاد می‌گردند. پس از استخراج نقاط ویژه برای تطابق نقاط ویژه از روش‌های ارتباط مکانی، روش‌های مبتنی بر گراف، روش‌های مبتنی بر دسته‌بندی، تطابق چامبری، روش سه‌بعدی نزدیک‌ترین نقطه تکراری و ایجاد توصیف‌گرهای پایدار مانند توصیف‌گرهای مبتنی بر روشنایی، ویژه‌های ناحیه‌ای، توزیع مکانی نقاط ویژه همسایه، میانگین زوایای خطوط وابسته، توصیف‌گر

چکیده: به منظور غلبه بر مشکلات تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای از جمله تغییرات مقیاسی، دوران، شدت روشنایی و شکل هندسی از روش SIFT برای استخراج نقاط ویژه استفاده شده است ولی این روش نقاط ویژه متعددی را از تصاویر هوایی و ماهواره‌ای به دلیل اغتشاشات و عوامل محیطی استخراج می‌کند که تعداد زیاد نقاط ویژه، باعث افزایش زمان ایجاد بردار توصیف‌گر و تطابق‌های نامطلوب خواهد شد. برای ارتقای کیفیت نقاط ویژه استخراج شده و افزایش سرعت اجرای الگوریتم، ابتدا لبه‌های اصلی تصاویر توسط عملگر سبل و آستانه‌گذاری استخراج گردیده و سپس نقاط ویژه از روی تصویر لبه‌ها با استفاده از روش SIFT استخراج می‌گردند. بعد از استخراج نقاط ویژه، با استفاده از روش rBRIEF که پایداری مطلوبی در برابر دوران و اغتشاشات جوی دارد، توصیف‌گرهایی برای هر یک از نقاط ویژه ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از روش تطابق دوطرفه و حذف تطابق‌های نامطلوب با استفاده از روش RANSAC تطابق‌های صحیح بین تصاویر هوایی و ماهواره‌ای توسط روش پیشنهادی ایجاد می‌گردد. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی تصاویر تهیه شده، نشان‌دهنده برتری این روش از لحاظ صحت تطابق‌ها و سرعت این روش نسبت به روش‌های قبلی از جمله روش SIFT می‌باشد.

کلیدواژه: نقاط ویژه، بردار توصیف‌گر، عملگر سبل، SIFT، rBRIEF، تطابق دوطرفه، RANSAC.

۱- مقدمه

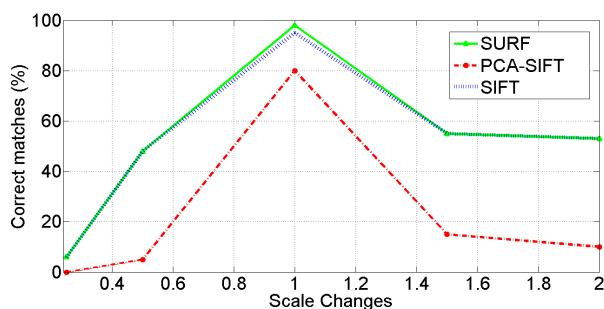
تطابق تصویر، عبارتست از فرایندی که در آن ارتباط یا همپوشانی دو تصویر یا چند تصویر از طریق یک رابطه هندسی به دست می‌آید. فرایند تطابق تصاویر می‌تواند به طور وسیع در سنجش از راه دور، تغییرات داده‌های مکانی، بازسازی سه‌بعدی تصاویر، شناخت هدف و تلفیق تصاویر استفاده گردد [۱]. از کاربردهای مهم تطابق تصاویر، تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای در فتوگرامتری و ناوبری هوایی می‌باشد که در این تحقیق ما قصد داریم روشی جدید را برای تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای ارائه دهیم. محدودیت‌هایی همچون تغییرات آب و هوا، روشنایی، مقیاس، دوران و زاویه در تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای از موضوعات مهم و چالش برانگیز در ماشین بینایی و پردازش تصویر می‌باشد که باعث ارائه تحقیقات متعدد برای کاهش این محدودیت‌ها در سال‌های اخیر شده است. روش‌هایی که هم‌اکنون برای تطابق تصاویر استفاده می‌گردند بر دو

این مقاله در تاریخ ۲۷ مرداد ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۱۸ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

محسن صفدری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: moh.safdari@eng.ui.ac.ir).

پیمان معلم، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: p.moallem@eng.ui.ac.ir).

مهران ستاری، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: sattari@eng.ui.ac.ir).



شکل ۲: درصد تطابق‌های صحیح سه روش SURF، SIFT و PCA-SIFT بر حسب مقیاس‌های مختلف.

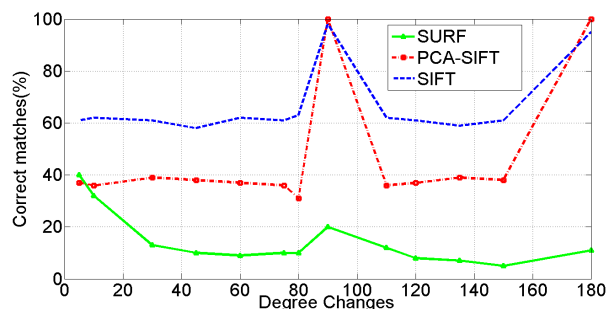
توصیف‌گر SURF نسبت به جهت غالب با اتصال جهت‌گردان این همسایگی‌ها (یک فضای 4×4 در اطراف نقطه ویژه) ایجاد می‌گردد. با بررسی‌های انجام‌شده دیده شد که روش‌های SURF و PCA-SIFT دارای پیچیدگی‌های کمتری نسبت به روش SIFT خواهند بود ولی همه این روش‌ها دارای کیفیتی به مراتب پایین‌تر از روش SIFT می‌باشند. در شکل ۱ پایداری روش‌های مختلف در برابر تغییرات دوران برای دو تصویر که به صورت اولیه نسبت به هم اختلاف درجه 180° را دارند رسم گردیده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقاومت روش SIFT نسبت به دو روش SURF و PCA-SIFT بیشتر می‌باشد. البته در دو زاویه 90° (اختلاف 90° درجه بین تصویر هدف و مرجع) و درجه 180° (تصویر هدف و مرجع هم‌جهت و هم‌راستا) که اختلاف جهت نقاط ویژگی در تصویر مرجع کمتر شده است بیشترین درصد تطابق صحیح قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مقاومت تطابق‌های روش SIFT در برابر تغییرات مقیاس نسبت به روش‌های SURF و PCA-SIFT همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است بیشتر می‌باشد. در این تحقیق ما قصد داریم روش جدیدی را ارائه دهیم تا بتواند علاوه بر داشتن کیفیت روش SIFT، در زمان کمتر نقاط ویژه با صحت بالا به همراه توصیف‌گرهایی با قابلیت تمایز بالا را استخراج کند. نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی در این تحقیق بر روی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای نشان داد که با افزایش صحت نقاط ویژه و کاستن زمان بیهوده برای توصیف نقاط ویژه نامطلوب توسط روش پیشنهادی می‌توان تطابق‌هایی مطلوب‌تر از روش SIFT را ایجاد نمود.

۲- روش SIFT

روش SIFT در سال 2004 توسط David Lowe برای آشکارسازی و توصیف نقاط ویژه با پایداری در برابر تغییرات روشنایی، دوران، مقیاس و تبدیل Affine ارائه شد [۵]. برای پایداری نقاط ویژه در برابر تغییرات مقیاس از فضای هرمی استفاده کرد. برای ایجاد فضای هرمی ابتدا تصویر توسط فیلتر گوسی تا 5 مرحله توسط ضرایبی از متغیر σ در رابطه فیلتر گوسی (رابطه (۱)) نرم می‌شود. سپس اندازه هر یک از 5 تصویر نصف می‌گردد و دوباره این تصاویر تا 5 مرحله با فیلتر گوسی نرم می‌شوند و این عمل تا شش مرحله ادامه پیدا می‌کند (شکل ۳)

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

پس از تشکیل فضای هرمی که در شکل ۳ نشان داده شده است، نقاط ویژه بالقوه که شامل حباب‌ها و گوشه‌ها می‌باشند از طریق استخراج اکستریم‌های محلی تفاضل دو تصویر نرم‌شده متوالی در فضای هرمی که



شکل ۱: درصد تطابق‌های صحیح سه روش SURF، SIFT و PCA-SIFT بر حسب دوران‌های مختلف.

شکلی، توصیف‌گر گشتاوری، توصیف‌گر زوایای گردان، توصیف‌گر مبتنی بر هیستوگرام، توصیف‌گرهای گوشه‌ای و ایجاد توصیف‌گرهای هرمی و تبدیل موجکی می‌توان استفاده نمود [۲].

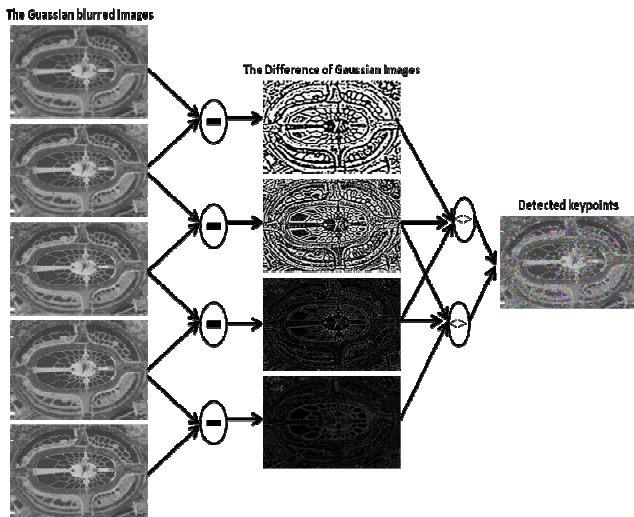
در تحقیقات اولیه برای استخراج نقاط ویژه بیشتر از روش‌هایی برای استخراج گوشه‌ها با تغییرات سطوح خاکستری در جهات مختلف به عنوان نقاط ویژه استفاده گردید که عبارتند از روش‌های SUSAN، Hariss و FAST [۲] تا [۴]. در این روش‌ها، نقاط ویژه استخراجی نسبت به تغییرات مقیاس، دوران، زاویه، تبدیل Affine و تغییرات روشنایی پایداری ندارند و در نتیجه صحت تطابق‌ها نیز به شدت افت پیدا می‌کند.

در سال 2004 David Lowe روش SIFT^۱ را ارائه کرد و نشان داد که دلیل استخراج نقاط ویژه از طریق ساختار هرمی، نقاط ویژه نسبت به تغییرات مقیاس، دوران، روشنایی و اغتشاشات پایدار می‌باشند ولی در روش SIFT تعداد نقاط ویژه نامطلوب، صرف زمان بسیار برای ایجاد بردار توصیف‌گر نقاط ویژه و شباهت بردارهای توصیف‌گر روش SIFT برای ویژگی‌های مشابه از مهم‌ترین مشکلات موجود در این روش به شمار می‌رود [۵].

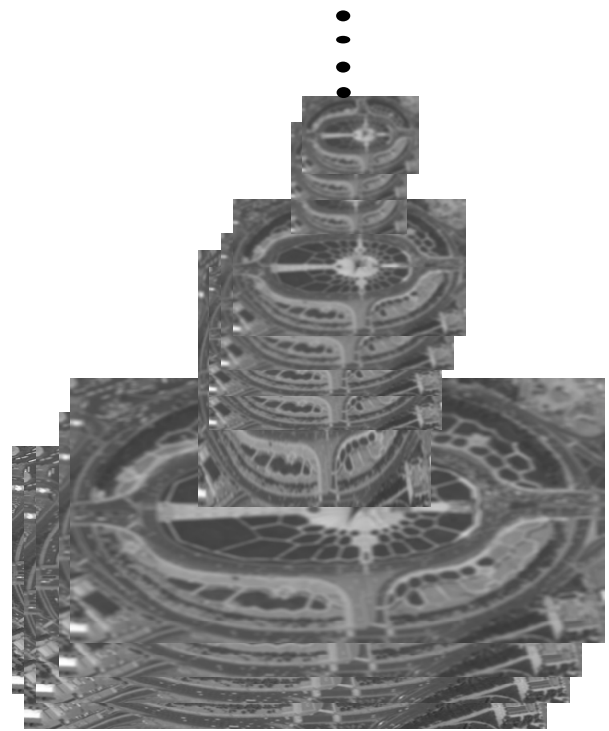
در سال 2004 Ke و همکاران روشی مبتنی بر روش SIFT را ارائه دادند که برای آشکارسازی نقاط ویژه از روش SIFT و برای توصیف آن از روش مبتنی بر PCA استفاده نمود [۶]. برای ایجاد ماتریس فضای ویژه ابتدا یک ناحیه با ابعاد 41×41 در اطراف همه نقاط ویژه در نظر گرفته می‌شود. بعد از آن، گردان‌های افقی و عمودی در این ناحیه محاسبه می‌شوند و با اتصال جهت‌گردان‌های افقی و عمودی، آرایه‌ای به طول $39 \times 39 \times 2$ ایجاد خواهد شد. در ادامه توسط روش PCA طول این بردار 3042 عضوی مثلاً به تعداد 36 عضو کاهش داده می‌شود که این کاهش بعد بردار توصیف‌گر باعث افزایش سرعت روش SIFT خواهد شد [۷].

روش SURF^۲ برای کاهش پیچیدگی‌های روش SIFT توسط Tuytelaars و همکارانش در سال 2006 برای استخراج و توصیف نقاط ویژه ارائه گردید [۸]. در قسمت آشکارسازی نقاط ویژه، برخلاف روش SIFT که از فیلترهای گوسی برای ساخت فضای هرمی استفاده می‌کرد در این روش از عملگر انتگرال‌گیر برای ساخت فضای هرمی استفاده شده است که باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی در قسمت آشکارسازی نقاط ویژه خواهد شد. پس از ساخت فضای مقیاس با استفاده از ماتریس Hessian در نهایت محاسبه مقادیر ویژه این ماتریس می‌توان نقاط ویژه را آشکار نمود. برای توصیف نقاط ویژه با ایجاد یک فضای همسایگی در اطراف نقاط ویژه و محاسبه جهت‌گرایان در راستاهای محور افق و عمود،

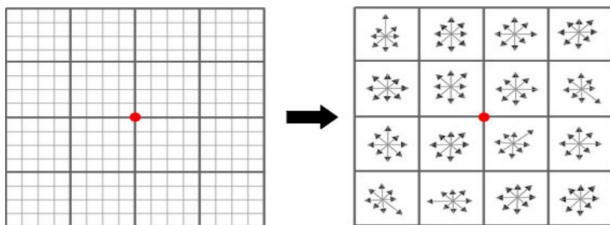
1. Scale Invariant Feature Transform
2. Speeded Up Robust Features



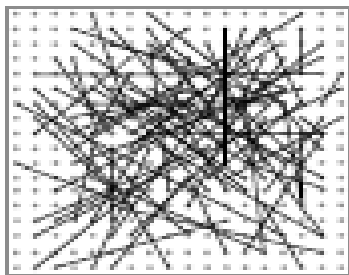
شکل ۴: طریقه محاسبه Laplacian of Gaussian با استفاده از دیفرانسیل دو تصویر نرم‌شده متوالی در فضای هرمی و استخراج نقاط ویژه از طریق محاسبه نقاط کمینه و بیشینه تصاویر لبه و گوشه و اعمال روش Harris.



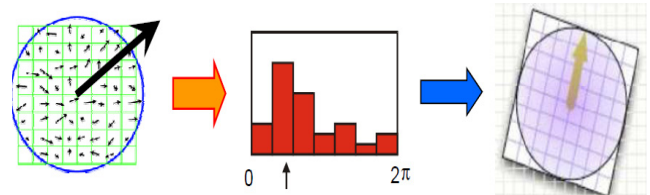
شکل ۳: فضای هرمی ایجادشده توسط روش SIFT بر روی تصویر هوایی از میدان آزادی در تهران.



شکل ۶: طریقه ایجاد بردار توصیف‌گر در روش SIFT.



شکل ۷: نمونه‌ای از مسیرهای تصادفی از جفت نقاط ویژه که برای محاسبه در (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵: طریقه استخراج جهت نقاط ویژه با استفاده از استخراج هیستوگرام اندازه گرادیان جهتی در اطراف نقطه ویژه.

۳- روش RBRIEF

توصیف نقاط ویژه توسط روش SIFT دارای تمایز خوبی می‌باشد ولی زمان و محاسبات بالا از مشکلات عمده توصیف‌گر SIFT است. برای حل این مشکل، روش BRIEF^۲ توسط Calonder ارائه گردید [۹] که در آن تابع τ برای جفت نقاط n (شکل ۷) در فضای $S \times S$ اطراف نقاط ویژه به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\tau(I(x, y), (x', y')) := \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) < I(x', y') \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

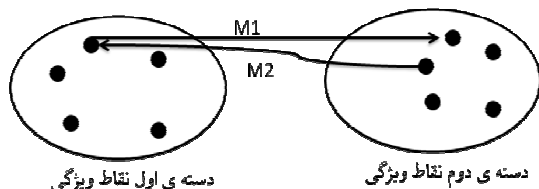
تابع τ یک تابع بیتی برای نشان دادن اختلاف روشنایی ابتدا و انتهای مسیرهای تعریف‌شده در فضای $S \times S$ می‌باشد تا در ادامه توصیف‌گر V_{BRIEF} به صورت رشته n بیتی زیر به دست می‌آید

$$V_{BRIEF} = \sum_{1 \leq i \leq n} 2^{i-1} \tau(I(x_i, y_i), I(x'_i, y'_i)) \quad (3)$$

تقریبی از عملگر LOG^1 می‌باشد استخراج می‌گردد. برای استخراج نقاط ویژه مقاوم، نقاط کمینه و بیشینه در تصاویر دیفرانسیلی از طریق مقایسه هر پیکسل با هشت همسایگی همان سطح و دو سطح بالایی و پایینی به عنوان نقاط ویژه انتخاب می‌گردد (شکل ۴). در ادامه پس از حذف پیکسل‌های با دامنه روشنایی کم و استفاده از روش Harris مکان نقاط ویژه در هر یک از سطوح فضای هرم توسط رابطه تیلور مشخص شده تا در انتها نقاط ویژه از طریق درون‌یابی با دقت بالا به دست آید.

پس از استخراج نقاط ویژه و تعیین مکانی آنها، یک بردار توصیف‌گر برای هر یک از نقاط ویژه ایجاد می‌گردد. David Low در روش SIFT برای پایدارسازی بردار توصیف‌گر نقاط ویژه نسبت به دوران از هیستوگرام دامنه گرادیان برای یکنواخت‌سازی نقاط ویژه نسبت به دوران استفاده نمود تا کلیه‌ی نقاط ویژه قبل از تطابق در یک جهت یکنواخت گردند. در شکل ۵ جهت نقطه ویژه مورد نظر نشان داده شده است.

پس از استخراج جهت نقاط ویژه جهت تمامی نقاط ویژه برای توصیف آنها بایاس می‌گردند. در ادامه همانند شکل ۶ گرادیان همسایگی نقاط ویژه در کنار یکدیگر به عنوان بردار توصیف‌گر آن نقطه ویژه در نظر گرفته می‌شود. پس از استخراج و توصیف نقاط ویژه از تصاویر هدف و مرجع و بررسی نزدیک‌ترین فاصله اقلیدسی بردارهای توصیف‌گر تطابق‌های روش SIFT ایجاد می‌گردد.



شکل ۹: انتخاب نزدیک‌ترین همسایگی با بررسی تطابق‌های دوطرفه (بررسی تطابق M1 و M2).

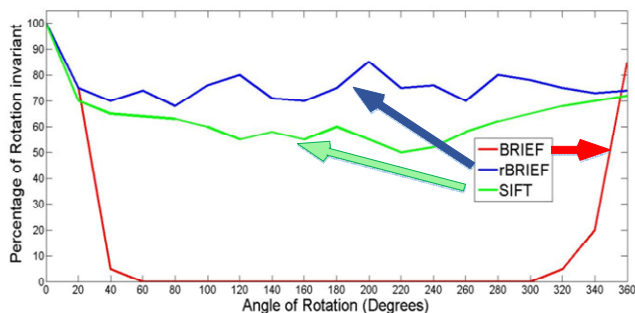
پس از استخراج نقاط ویژه از روی لبه‌های تصویر توسط روش SIFT، نقاط ویژه توسط روش rBRIEF که در بخش ۳ توضیح داده شد در قالب یک بردار توصیف می‌شوند. استفاده از روش rBRIEF برای توصیف نقاط ویژه باعث مقاوم‌شدن نقاط ویژه نسبت به دوران و کاهش زمان الگوریتم خواهد شد.

گام نهایی پس از استخراج و توصیف نقاط ویژه با استفاده از روش پیشنهادی، تطابق بردارهای توصیف‌گر دو تصویر هوایی و ماهواره‌ای می‌باشد. برای تطابق بردارهای توصیف‌گر در این تحقیق از روش نزدیک‌ترین همسایگی^۲ (KNN) استفاده شده است. در این روش ابتدا دسته‌ای از نزدیک‌ترین توصیف‌گرها از تصویر هوایی برای هر کدام از توصیف‌گرهای تصویر ماهواره‌ای استخراج می‌گردد. در ادامه دوباره دسته‌ای از نزدیک‌ترین توصیف‌گرها از تصویر ماهواره‌ای برای هر کدام از توصیف‌گرهای تصویر هوایی استخراج شده و سپس با بررسی تطابق‌های دوطرفه (شکل ۹)، نزدیک‌ترین تطابق برای هر نقطه ویژه انتخاب می‌گردد [۱۱]. پس از تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای تطابق‌های نامطلوب توسط روش RANSAC [۱۲] حذف و تطابق‌های نهایی به دست می‌آید. در روش RANSAC صحت تطابق‌ها با استفاده از استخراج صحیح‌ترین ماتریس تبدیل یا نگاشت که با انتخاب مکرر سه نقطه ویژه تصادفی در تصویر هوایی و ماهواره‌ای به دست می‌آید، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

وجود الگوهای ساختاری شبیه به هم باعث ایجاد برداری توصیف‌گر یکسان شده و تطابق‌های نامطلوبی را ایجاد خواهد نمود که روش هندسی RANSAC توانایی کاهش این تطابق‌ها را ندارد و به همین دلیل در روش پیشنهادی سعی شده است تطابق‌های مطلوب‌تری در برخورد با الگوهای مشابه و تکراری تصویری ایجاد گردد. در روش پیشنهادی در هر یک از تصاویر هدف و مرجع توسط معیار اقلیدسی دو به دو توصیف‌گر نقاط ویژه، نقاط ویژه مشابه از تصاویر هدف و مرجع حذف می‌گردند تا تطابق‌های مطلوب‌تری نسبت به الگوهای مشابه ایجاد گردد و همچنین طرح‌واره روش پیشنهادی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۵- نتایج پیاده‌سازی و بحث

برای بررسی روش پیشنهادی در این تحقیق، روش پیشنهادی بر روی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای از مناطق مختلف در مقیاس‌ها و چرخش‌های متفاوت بر روی یک سیستم کامپیوتری با پردازنده Corei۷ (۳٫۲GHz)، حافظه ۴ GB و سیستم عامل Windows ۷ در محیط Visual Studio توسط کتابخانه OpenCV ۲٫۴٫۹ اعمال گردید. همان طور که در بخش‌های قبلی بیان گردید، از محاسن روش پیشنهادی نسبت به روش SIFT سرعت و دقت بالاتر آن می‌باشد. همان طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، زمان اجرای روش پیشنهادی^۳ (SIBRIF) نسبت به سه



شکل ۸: عملکرد پایداری توصیف‌گرهای BRIEF، rBRIEF، SIFT و SIFT در برابر دوران.

توصیف‌گر BRIEF بر خلاف توصیف‌گرهای SIFT و SURF نمی‌تواند جهت نقاط ویژه را محاسبه کند و در نتیجه بردار توصیف‌گر BRIEF نسبت به دوران پایدار نمی‌باشد.

برای حل این موضوع با استفاده از روش rBRIEF^۱ گشتاور روشنایی جهات نقاط ویژه از (۴) محاسبه می‌گردد

$$\theta = \text{atan2}(m_{-1}, m_{+1}) \quad (4)$$

که گشتاور m_{pq} از (۵) به دست می‌آید

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y) \quad (5)$$

با فرض این که فضای $S \times S$ نقاط مورد بررسی به صورت (۶) تعریف شود

$$S = \left\{ (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n), (x'_1, y'_1), \dots, (x'_n, y'_n) \right\} \quad (6)$$

آن‌گاه بردار توصیف‌گر نقاط ویژه که نسبت به دوران پایدار می‌باشد از طریق (۷) به دست خواهد آمد [۱۰]. در (۷) نشان داده شده که توصیف‌گر BRIEF تنها برای مسیرهای در راستای زاویه نقطه ویژه محاسبه می‌گردد. در شکل ۸ عملکرد پایداری توصیف‌گرهای rBRIEF، BRIEF و SIFT در برابر دوران نشان داده شده است

$$V_{rBRIEF} := V_{BRIEF} | \left((x_i, y_i), (x'_i, y'_i) \right) \in S_\theta \quad (7)$$

۴- روش پیشنهادی

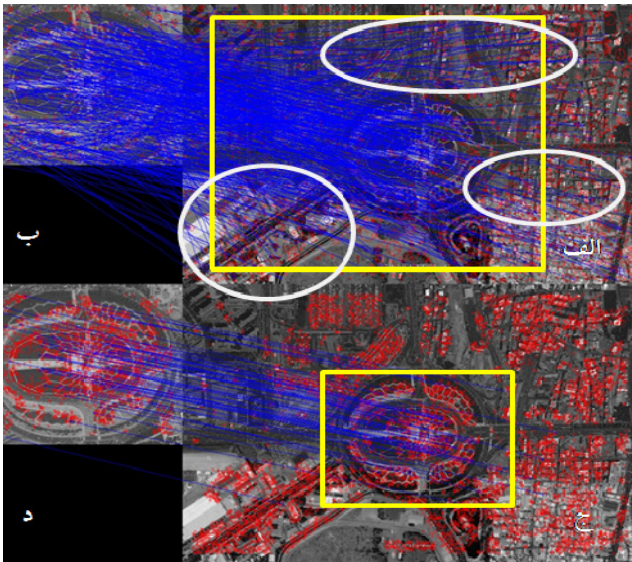
همان طور که در بخش ۲ توضیح داده شد، نقاط ویژه مقاوم در برابر تغییرات مقیاس توسط روش SIFT استخراج می‌گردد ولی هنگامی که تصویر بزرگ یا نقاط ویژه زیاد (تصاویر هوایی) باشد استفاده از روش SIFT برای استخراج نقاط ویژه باعث افزایش زمان پردازش خواهد شد. برای حل این مشکل و افزایش کیفیت نقاط ویژه (مقاوم‌بودن در برابر تغییرات جوی و اغتشاشات)، نقاط ویژه توسط روش SIFT از روی لبه‌های تصویر که توسط لبه‌یاب Sobel ایجاد شده، استخراج می‌گردد.

برای استخراج نقاط ویژه از روی لبه‌های تصویر، پس از اعمال لبه‌یاب Sobel، با استفاده از روش آستانه‌گذاری مقدار هر پیکسل در تصویر لبه با مقدار آستانه (T) مقایسه می‌گردد و در صورتی که مقدار هر پیکسل بیش از مقدار آستانه (T) باشد، مقدار پیکسل تغییر نخواهد کرد و در غیر این صورت مقدار پیکسل برابر صفر قرار داده می‌شود. استخراج نقاط ویژه از روی تصویر لبه‌ها باعث کاهش نقاط ویژه نامطلوب، افزایش سرعت اجرای الگوریتم و صحت تطابق‌ها خواهد شد.

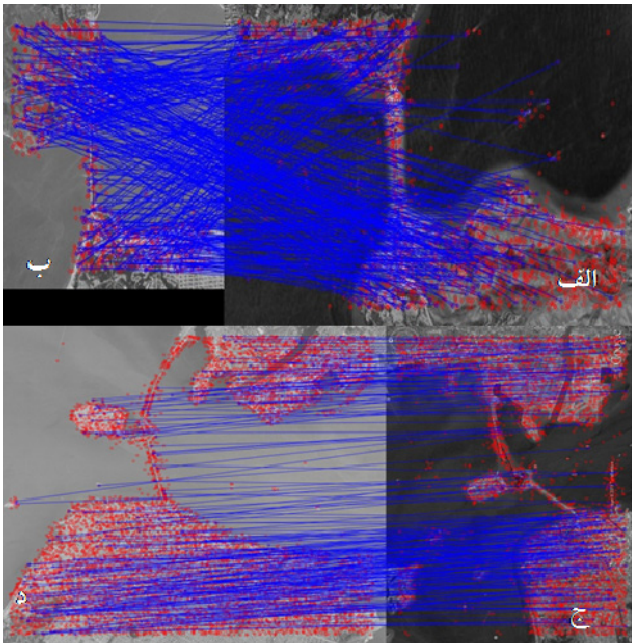
2. K-Nearest Neighbors

3. Scale Invariant and Binary Rotation Invariant Feature

1. Rotation Binary Robust Independent Elementary Features

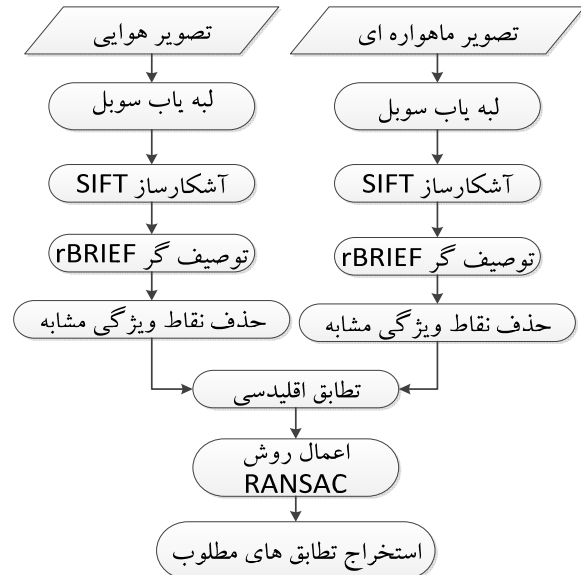


شکل ۱۱: ردیف اول: تطابق انجام شده توسط روش SIFT بین تصویر ماهواره‌ای در قسمت الف و تصویر هوایی در قسمت ب. ردیف دوم: تطابق انجام شده توسط روش پیشنهادی در این تحقیق بین تصویر ماهواره‌ای در قسمت ج و تصویر هوایی در قسمت د.



شکل ۱۲: ردیف اول: تطابق بین تصویر ماهواره‌ای در قسمت الف و تصویر هوایی با ۱۸۰ درجه دوران در قسمت ب نشان داده شده است. ردیف دوم: تطابق بین تصویر ماهواره‌ای در قسمت ج و تصویر هوایی تخریب شده توسط تبدیل Affine در قسمت ب نشان داده شده است.

تبدیل نگاشت هندسی یا همان تابع هموگرافی بین این نقاط را محاسبه می‌کنیم تا تابع تبدیل بین دو تصویر هوایی و ماهواره‌ای استخراج گردد. حال توسط این تابع تبدیل صحیح می‌توان تطابق‌های ایجاد شده توسط روش پیشنهادی با روش‌های دیگر را از لحاظ صحت و دقت مورد ارزیابی قرار داد. در نمودار شکل ۱۳ صحت تطابق‌های ایجاد شده توسط تابع هموگرافی، توسط نقاط کنترلی دستی برای یک جفت تصاویر هوایی و ماهواره‌ای از یک صحنه در هفت دوران مختلف نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود به دلیل توصیف نقاط ویژه توسط روش rBRIEF که در بخش ۳ به مقابله با این توصیف‌گر در مقابل دوران اشاره گردید، صحت تطابق‌های روش پیشنهادی نسبت به روش SIFT



شکل ۱۰: روند نامی روش پیشنهادی در این تحقیق برای تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای.

جدول ۱: زمان محاسبه بر حسب تعداد تطابق‌ها.

روش	SIFT	PCA-SIFT	SURF	روش پیشنهادی (SIBRIF)
تعداد تطابق‌ها	۱۸۲	۴۲	۱۴۰	۱۰۰
زمان (بر حسب ثانیه)	۱۲	۱۰	۵	۲

روش SIFT، PCA-SIFT و SURF کمتر و تعداد تطابق‌ها برای دو تصویر هوایی با ابعاد (۶۴۰×۴۸۰ پیکسل) و ماهواره‌ای با ابعاد (۱۴۰۰×۸۳۰ پیکسل) مطلوب و مطمئن می‌باشد.

در شکل ۱۱ تطابق دو تصویر هوایی و ماهواره‌ای از میدان آزادی تهران توسط روش‌های SIFT در ردیف اول و روش پیشنهادی در این مقاله در ردیف دوم با مقیاس‌های مختلف دیده می‌شود. همان طور که در این شکل نشان داده شده است تعداد نقاط ویژه استخراج شده توسط روش SIFT (ردیف بالای شکل ۱۱) بسیار بیشتر از روش پیشنهادی (ردیف پایین شکل ۱۱) می‌باشد و در نتیجه زمان محاسبه بردار توصیف‌گر برای نقاط ویژه افزایش پیدا خواهد کرد و همچنین تطابق‌های نامطلوب که در ناحیه سفید رنگ در ردیف بالای شکل ۱۱ نشان داده شده است به شدت افزایش پیدا خواهد کرد. ولی در تطابق‌های روش پیشنهادی دقت تطابق‌ها به شدت افزایش پیدا کرده به طوری که قسمت یا هدف مورد نظر با دقت بالایی شناسایی شده است. همچنین زمان اجرای روش پیشنهادی نیز به دلیل عدم توصیف نقاط ویژه نامطلوب و تطابق آنها کاهش یافته است. برای بررسی بیشتر روش پیشنهادی، دو تصویر هوایی و ماهواره‌ای که نسبت به هم دوران ۱۸۰ درجه‌ای دارند، مورد آزمایش قرار گرفت (ردیف اول شکل ۱۲) و دیده می‌شود تطابق‌های مطلوبی بین تصویر ماهواره‌ای در قسمت الف و تصویر هوایی در قسمت ب ایجاد شده است. همچنین تطابق‌های ایجاد شده توسط روش پیشنهادی روی یک تصویر ماهواره‌ای و یک تصویر هوایی که توسط تبدیل Affine در هنگام تصویربرداری تخریب شده است، مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که روش پیشنهادی نسبت به تبدیل Affine نیز پایداری مناسبی دارد.

برای بررسی صحت تطابق‌های ایجاد شده توسط روش پیشنهادی، ابتدا چهار نقطه کنترلی متناظر در دو تصویر هوایی و ماهواره‌ای را به صورت دستی انتخاب می‌کنیم. سپس با استفاده از این نقاط کنترلی متناظر، تابع

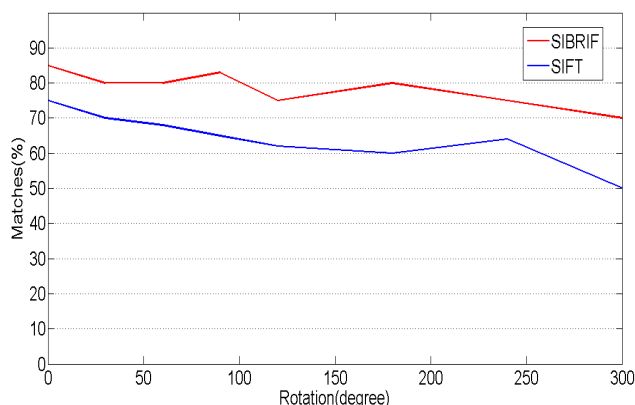
آزمایش‌های انجام شده دیده شد که روش‌های بررسی شده در این تحقیق نمی‌توانند تطابق‌های مطلوبی را برای تغییرات مقیاس بیش از پنج برابر ایجاد کنند. در تحقیقات آتی می‌توان بر روی ایجاد نقاط ویژه که نسبت به تغییرات مقیاس شدید، پایدار باشند تمرکز نمود و همچنین می‌توان برای پیاده‌سازی بلادرنگ، روش پیشنهادی را توسط سخت‌افزار کارت گرافیکی (GPU) توسط زبان برنامه‌نویسی CUDA یا زبان برنامه‌نویسی OpenCL پیاده‌سازی نمود.

مراجع

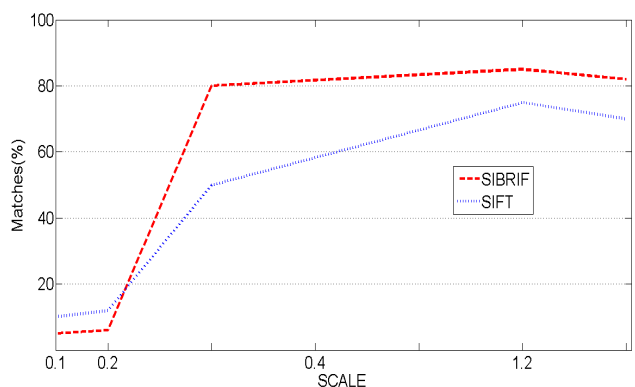
- [1] A. Nithya, et al., "Feature based automated aerial image to satellite image registration," *International J. of Computer Science & Engineering Technology*, vol. 3, no. 7, pp. 286-289, Jul. 2012.
- [2] M. Guerrero, *A Comparative Study of Three Image Matcing Algorithms: Sift, Surf, and Fast*, Ph.D. Thesis, Utah State University, 2011.
- [3] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," in *Proc. Fourth Alvey Vision Conf.*, pp. 147-151, 1988.
- [4] M. Trajковic and M. Hedley, "Fast corner detection," *Image and Vision Computing J.*, vol. 16, no. 6, pp. 75-87, Feb. 1998.
- [5] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *Proc. IEEE Computer Vision Conf.*, vol. 2, pp. 1150-1157, 20-25 Sep. 1999.
- [6] Y. Ke and R. Sukthankar, "PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors," in *Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conf.*, pp. 511-517, 27 Jun. - 2 Jul. 2004.
- [7] Y. Qing, B. Lin, and W. Fang, "An improved SIFT algorithm," *J. of Harbin Engineering University*, vol. 31, pp. 560-564, 2010.
- [8] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, "Speeded-up robust features (SURF)," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346-359, Jun. 2008.
- [9] M. Calonder, et al., "BRIEF: computing a local binary descriptor very fast," *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, no. 7, pp. 1287-1298, Jul. 2012.
- [10] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, "ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF," in *Proc. 13th IEEE Int. Conf. on Computer Vision, ICCV'11*, pp. 2564-2571, 6-13. Nov. 2011.
- [11] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale invariant keypoints," *International J. of Computer Vision, Springer*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, Nov. 2004.
- [12] X. Lu, S. Zhang, W. Yang, and Y. Chen, "SIFT and shape information incorporated into fluid model for non-rigid registration of ultrasound images," *J. of Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 100, no. 2, pp. 123-131, Nov. 2010.

محسن صفدری دانش آموخته کارشناسی مهندسی الکترونیک در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد و کارشناسی ارشد مهندسی بیوالکتریک در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه اصفهان می‌باشد. نام‌برده از سال ۱۳۹۱ در رشته‌ی مهندسی برق-الکترونیک در دانشگاه اصفهان در موضوع تطابق تصاویر هوایی و ماهواره‌ای دانشجوی دکتری می‌باشد. مهندس صفدری عضو گروه پژوهشی پردازش کاربردی تصویر و سیگنال دانشگاه اصفهان بوده و در زمینه پردازش تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، مسیریابی و سامانه‌های پلاک‌خوان فعالیت‌های متعددی داشته و توسعه چندین محصول کاربردی، در این حوزه‌ها، در کارنامه ایشان دیده می‌شود. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند پردازش تصاویر و ماشین بینایی، شبکه‌های عصبی و توسعه سیستم‌های پردازش موازی مبتنی بر پردازنده‌های گرافیکی می‌باشد.

پیمان معلم دانش آموخته کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک، به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۳۷۴ از دانشگاه صنعتی اصفهان و دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. نام‌برده در سال ۱۳۸۲ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. دکتر معلم از سال ۱۳۸۲ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه اصفهان مشغول خدمت گردید و هم‌اکنون استاد گروه مهندسی برق دانشکده فنی و مهندسی و عضو گروه پژوهشی پردازش کاربردی تصویر و سیگنال دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند پردازش تصاویر و ماشین بینایی، توسعه شبکه‌های عصبی و پردازش هوشمند سیگنال‌ها است. اجرای بیش از ۳۰ پروژه کاربردی، تألیف حدود ۳۰۰ عنوان مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی و ملی و نیز تألیف ۳ عنوان کتاب در فعالیت‌های پژوهشی ایشان دیده می‌شود. ایشان در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ عنوان پژوهشگر برتر استان اصفهان در حوزه



شکل ۱۳: درصد تطابق‌های صحیح روش پیشنهادی (SIBRIF) و روش SIFT بر حسب میزان دوران تصویر ماهواره‌ای.



شکل ۱۴: درصد تطابق‌های صحیح روش پیشنهادی (SIBRIF) و روش SIFT بر حسب میزان تغییرات مقیاس تصویر ماهواره‌ای.

در دوران‌های مختلف بیشتر می‌باشد و همچنین در پنج مقیاس متفاوت، صحت تطابق‌های روش پیشنهادی و روش SIFT مورد بررسی قرار گرفت که دیده شد به دلیل حذف نقاط نامطلوب توسط روش لبه‌یاب سوئل در هرم گوسی مقاوم به تغییرات مقیاس، صحت تطابق‌ها برای روش پیشنهادی در بازه تغییرات مقیاس از ۰/۳ تا ۱/۵ نسبت به روش SIFT بیشتر شده ولی درصد صحت تطابق‌ها برای تغییرات مقیاس بیشتر که شکل هندسی اشکال یعنی گوشه‌های تصویر یا شکل هندسی اطراف نقاط ویژه کاملاً عوض خواهند شد به شدت افت پیدا خواهد کرد (شکل ۱۴).

۶- نتیجه‌گیری

ما در این مقاله روشی مبتنی بر روش‌های SIFT و rBRIEF را پیشنهاد دادیم که در آن نقاط ویژه در فضای هرمی از روی تصویر لبه‌ها که به وسیله لبه‌یاب Sobel ایجاد شده، استخراج می‌گردد. همچنین برای افزایش صحت تطابق‌ها با حذف نقاط ویژه مشابه و با استفاده از روش تطابق دوطرفه بهترین تطابق‌ها انتخاب می‌گردند و سپس توسط روش RANSAC تطابق‌های نامطلوب حذف می‌شوند. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در این تحقیق دیده شد، اولاً نقاط ویژه استخراج شده نسبت به روش SIFT کمتر و مطلوب‌تر خواهند بود که این عامل باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی به یک‌سوم زمان لازم برای اجرای روش SIFT خواهد شد. ثانیاً افزایش صحت نقاط ویژه باعث افزایش صحت تطابق‌ها خواهد شد که این عامل باعث افزایش کیفی الگوریتم پیشنهادی خواهد بود. همچنین باید بیان نمود کیفیت پایین تصاویر می‌تواند صحت تطابق‌های روش پیشنهادی را به شدت کاهش دهد. با توجه به

مهندسی، در سال ۱۳۹۱ عنوان پژوهشگر برتر در دومین جشنواره بین‌المللی تحقیق و توسعه ایران، و در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ عنوان پژوهشگر برگزیده دانشگاه اصفهان را کسب کرده‌اند.

مهران ستاری دانش‌آموخته کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی نقشه برداری-فتوگرامتری، به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۷۸ از دانشگاه اصفهان و دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد. نام‌برده در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی نقشه برداری-فتوگرامتری از دانشگاه تهران گردید. دکتر ستاری از سال ۱۳۷۹ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه اصفهان مشغول خدمت گردید و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشکده عمران و مدیر گروه پژوهشی سنجش از دور دانشگاه اصفهان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند فتوگرامتری، سنجش از دور و پردازش تصاویر و ماشین بینایی، است. اجرای ۴ پروژه کاربردی، تألیف حدود ۳۰ عنوان مقاله در مجلات و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی و ملی در فعالیت‌های پژوهشی ایشان دیده می‌شود. ایشان در سال‌های ۱۳۹۱ عنوان پژوهشگر برتر دانشگاه اصفهان را کسب کرده‌اند.