

بررسی تفصیلی الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت (SIFT)؛ مفاهیم، شاخص‌ها و کاربردها

زهرا حسین نژاد^{*}، حامد آگاهی^{*} و آذر محمودزاده^{*}

چکیده

الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت (SIFT)، یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در زمینه بینایی ماشین است که به صورت گسترده مورد توجه و مطالعه پژوهشگران قرار گرفته و بهبود داده شده است. SIFT یکی از شناساگرهای محلی رایج می‌باشد که در انطباق تصویر، موزاییک تصویر، جعل کپی و جابجایی کاربرد دارد. در این مقاله مروری، ضمن معرفی الگوریتم SIFT، به کاربردها، مزایا و معایب، اصلاحات، دسته‌بندی‌ها و رویکردهای تحقیقات جدید در این الگوریتم پرداخته شده است. علاوه بر این، به کمک چهار آزمایش، جنبه‌های مختلف الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقاله می‌تواند راهگشای پژوهشگران پردازش تصویر برای استفاده از الگوریتم SIFT باشد. اهتمام نویسندگان بر این بوده است که همه جنبه‌های این الگوریتم مورد کاوش قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها

نقاط کلیدی، شناساگر، توصیفگر، الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت (SIFT)، تطبیق.

تحلیل دسته‌بندی می‌شود [۱]. مرحله پیش پردازش شامل حذف نویز [۲، ۳] و بهبود کنتراست [۴، ۵] است. تحلیل تصویر عموماً مشتمل بر قدم‌های بخش بندی تصویر، نمایش و توصیف، و تشخیص و تعبیر می‌باشد. استخراج ویژگی‌ها یکی از مراحل اساسی در زمینه‌های مختلف بهبود پیش‌پردازش می‌باشد. به صورت کلی، ویژگی‌های قابل استخراج از تصاویر به دو دسته سراسری^۱ و محلی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. ویژگی‌های سراسری، یک تصویر را به صورت کلی توصیف می‌کنند؛ در مقابل ویژگی‌های محلی بخش‌هایی^۳ از تصویر را مورد بررسی قرار می‌دهند. ویژگی‌های سراسری در کاربردهای بازیابی تصاویر^۴، بازشناسی شیء^۵ و دسته‌بندی^۶ مورد استفاده قرار می‌گیرند در حالی که

۱ مقدمه

پردازش تصویر شاخه‌ای از دانش رایانه است که امروزه به طور گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله صنعت، هواشناسی، شهرسازی، کشاورزی، علوم نظامی و امنیتی، نجوم و فضانوردی، پزشکی، فناوری‌های علمی، باستان‌شناسی، تبلیغات، سینما، اقتصاد، روانشناسی و زمین‌شناسی کاربرد دارد.

عملیات پردازش تصویر به طور کلی به دو دسته پیش‌پردازش و

این مقاله در شهریورماه سال ۹۸ دریافت، در آبان‌ماه بازنگری و در بهمن‌ماه همان سال پذیرفته شد.

گروه مهندسی برق - واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی - شیراز - ایران.

¹ Global

² Local

³ Patches

⁴ Image Retrieval

⁵ Object Detection

⁶ Classification

رایانامه:

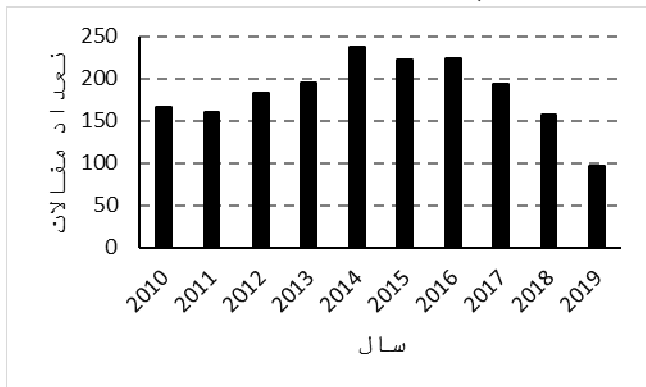
hoseinnejad.zahra@yahoo.com

Agahi@iaushiraz.ac.ir

azar_mahmoodzadeh@yahoo.com

نویسنده مسئول: حامد آگاهی

معتبر که در پایگاه‌های ScienceDirect و IEEE چاپ شده‌اند را برحسب سال چاپ نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمودار تعداد مقالات براساس کلمات کلیدی SIFT برحسب سال

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مقالات متعددی در سال‌های اخیر در زمینه استفاده از الگوریتم SIFT چاپ شده‌اند که این نشان دهنده اهمیت و توجه محققان به این موضوع می‌باشد. با این حال، تاکنون مقاله مروری به زبان فارسی که به بررسی مزایا و معایب این الگوریتم در کاربردهای مختلف پرداخته باشد ارائه نشده است. همچنین مقالات انگلیسی اندکی در این زمینه وجود دارد که عمدتاً به بررسی تعداد معدودی از نسخه‌های بهبود یافته SIFT پرداخته‌اند [۲۰، ۲۱]. از طرف دیگر مقالات مروری که اخیراً چاپ شده فقط به نوع خاصی از تغییرات در تصاویر طبیعی (برای مثال تغییر زاویه یا ابعاد) پرداخته‌اند [۲۲]. همچنین، در این مقالات به بررسی معایب این الگوریتم در تصاویر متفاوت (مانند سنجش از دور، پزشکی، تصاویر رادارهای روزنه مصنوعی SAR^{۱۸} و تصاویر طبیعی) پرداخته نشده است. اهمیت و کاربرد روز افزون الگوریتم SIFT نشان می‌دهد که هر پنج سال یکبار باید یک مقاله مروری در زمینه الگوریتم‌های جدید نوشته شود و به شرح مزایا و معایب آن الگوریتم و کاربرد آن در زمینه‌های مختلف بپردازد. چنین مقالاتی می‌توانند راهگشای محققان در انتخاب مناسب و بهره‌گیری از این الگوریتم‌ها در کاربردهای مورد علاقه‌شان باشد. موارد ذکر شده، انگیزه بخش نگارش این مقاله مروری در خصوص الگوریتم SIFT بوده است. هدف این مقاله، تشریح الگوریتم SIFT، بررسی مزایا و معایب الگوریتم با توجه به نوع تصاویر، بررسی اصلاحات انجام شده و کاربردهای این الگوریتم در زمینه‌های مختلف می‌باشد. علاوه بر آن، یک مجموعه آزمایش جهت بررسی عملکرد الگوریتم SIFT انجام شده است.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در بخش دوم به شرح الگوریتم SIFT، در بخش سوم به بررسی کاربردهای الگوریتم و در بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب، به بررسی مزایا و معایب الگوریتم SIFT و نسخه‌های اصلاح یافته پرداخته می‌شود. دسته‌بندی بهبودهای انجام شده، شاخص‌های لازم جهت انتخاب

ویژگی‌های محلی برای کاربردهای شناسایی^۱ و بازشناسی اشیاء به کار گرفته می‌شوند [۶]. مهمترین دسته‌بندی ویژگی‌های سراسری شامل نمایش کانتور^۲، توصیفگر شکل^۳ و ویژگی‌های بافتی^۴ است که از جمله آنها می‌توان به ماتریس‌های شکل^۵، گشتاورهای تغییر ناپذیر^۶ و گرادیان جهت دار هیستوگرام^۷ اشاره کرد. در مقابل، از مهمترین نمونه‌های ویژگی‌های محلی می‌توان SIFT^۸، SURF^۹ و LBP^{۱۰} را برشمرد [۷].

ویژگی‌ها می‌توانند ناحیه‌ای از تصویر، نقاط کلیدی^{۱۱} و برخی خصوصیات مشابه باشد. نقاط کلیدی، ویژگی‌های مهمی از یک تصویر هستند که در برابر اعوجاج‌های هندسی^{۱۲} پایدار می‌باشند [۸] [۹]. به عنوان نمونه، گوشه‌ها^{۱۳}، لبه‌ها و حباب‌ها^{۱۴} به عنوان نقاط کلیدی در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی‌ها به طور گسترده در کاربردهایی همچون بینایی کامپیوتر^{۱۵} [۱۰] و پردازش تصویر [۱۱] استفاده می‌شوند. به طور کلی، شناساگرها^{۱۶} به عنوان مهم‌ترین ابزار برای استخراج نقاط کلیدی شناخته شده‌اند. شناساگرها به دو دسته کلی محلی و فراگیر تقسیم می‌شود که شناساگرهای محلی دارای کاربردهای گسترده‌تر و عملکرد بهتری هستند [۱۲-۱۴].

الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن، یکی از معروف‌ترین دسته‌های شناساگرهای محلی است که در سال‌های اخیر به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۴ دیوید لائو^{۱۷} این الگوریتم را به عنوان یک شناساگر مقاوم نسبت به تغییرات مقیاس و چرخش و همچنین نسبت به نویز و شدت روشنایی پیشنهاد کرد [۱۵]. الگوریتم SIFT نه تنها یک شناساگر قوی، بلکه یک توصیفگر و تطبیق‌گر قوی هم می‌باشد [۱۵]. این الگوریتم و نسخه‌های بهبود یافته آن، در انطباق تصویر [۱۶]، موزاییک تصویر [۱۷]، جعل کپی-جابجایی [۱۸] و ردیابی تصویر [۱۹] کاربرد دارد. کاربردهای فراوان این الگوریتم، هر روزه توجه دانشمندان بیشتری را به خود جلب می‌کند. شکل ۱ نمودار تعداد مقالات براساس کلمات کلیدی SIFT مجلات علمی

¹ Identification

² Contour Representations

³ Shape Descriptors

⁴ Texture Features

⁵ Shape Matrices

⁶ Invariant Moments

⁷ Histogram Oriented Gradients (HOG)

⁸ Scale Invariant Feature Transform (SIFT)

⁹ Speeded-Up Robust Feature (SURF)

¹⁰ Local Binary Pattern (LBP)

¹¹ Keypoint

¹² Geometric Distortion

¹³ Corner

¹⁴ Blobs

¹⁵ Computer Vision

¹⁶ Detectors

¹⁷ Lowe

¹⁸ Synthetic Aperture Radar (SAR)

مختلف می‌باشد که در لایه‌های مختلفی تحت عنوان اکتاو^۳ مرتب مرتب شده‌اند. شکل ۳ فضای مقیاس ایجاد شده را نشان می‌دهد. در ابتدا، به منظور افزایش تعداد ویژگی‌های پایدار تصویر، ابعاد تصویر با استفاده از درون‌یابی دو خطی، دو برابر شده و به عنوان تصویر سطح اکتاو اول در نظر گرفته می‌شود. سپس تصویر سطح اول، در یک روند تکراری با کرنل گوسی پیچش داده^۴ می‌شود تا تصاویر گوسی فضای مقیاس در هر اکتاو ایجاد شود (تصاویر ستون چپ در شکل ۲). برای تصویر $I(x,y)$ ، تصاویر گوسی فضای مقیاس با استفاده از تابع کرنل گوسی $G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$ به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) \otimes I(x,y) \quad (1)$$

که در این رابطه پارامتر σ ، بیانگر مقیاس هر تصویر بوده و مقدار اولیه آن برابر $\sigma_0 = 1.6$ می‌باشد و با استفاده از یک پارامتر ثابت k ، در یک روند افزایش در سطوح مختلف هر اکتاو افزایش می‌یابد. تصاویر تفاضل گوسی با استفاده از تفاضل دو تصویر گوسی مجاور با توجه به رابطه (۲) محاسبه می‌شوند.

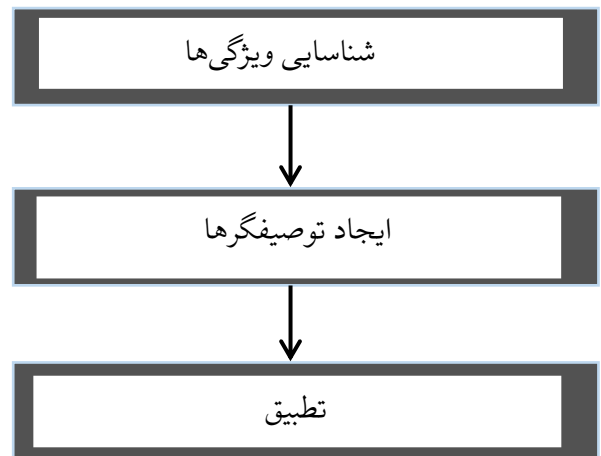
$$D(x,y,\sigma) = L(x,y,k\sigma) - L(x,y,\sigma) \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، مقیاس تصویر کوچک‌تر به عنوان مقیاس تصویر DOG حاصل در نظر گرفته می‌شود. بعد از ایجاد هر اکتاو، تصویر گوسی (که مقیاس آن دو برابر مقیاس اولیه می‌باشد)، انتخاب شده و ابعاد آن با نمونه‌برداری مجدد نصف شده و به عنوان تصویر ابتدایی اکتاو بعدی در نظر گرفته می‌شود و این فرآیند تکرار می‌شود. هدف از ایجاد فضای مقیاس، استخراج ویژگی‌هایی است که مستقل از مقیاس می‌باشند. بنابراین جهت استخراج موقعیت‌های پایدار میانی تصاویر DOG، در هر اکتاو هر پیکسل با هشت پیکسل همسایه خود و نه پیکسل در همسایگی تصویر DOG بالایی و پایینی مقایسه شده و در صورتی که اکستریم (بیشینه یا کمینه) باشد، به عنوان یک ویژگی کاندیدا^۵ ذخیره می‌شود (شکل ۴). قابل توجه است که تصاویر سطح اول و آخر در هر اکتاو بررسی نمی‌شوند. در نهایت، برای هر ویژگی استخراج شده بر اساس مقیاس تصویر DOG که از آن استخراج شده است، پارامتر مقیاس انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، باید اکستریم‌های ناپایدار حذف شوند.

شناساگر مناسب، نتایج آزمایشات به منظور ارزیابی الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن و رویکردهای جدید به ترتیب در بخش ششم، هفتم، هشتم و نهم و در نهایت به جمع‌بندی در بخش دهم پرداخته می‌شود.

۲ شرح الگوریتم SIFT

الگوریتم SIFT، یکی از الگوریتم‌های تطبیق مبتنی بر ویژگی است که جهت شناسایی الگو در تصاویر معرفی شد [۱۵]. این الگوریتم مطابق شکل ۲ از سه مرحله اصلی شامل شناسایی، توصیف و تطبیق تشکیل شده است که در ادامه به شرح هر یک از این مراحل پرداخته می‌شود.



شکل ۲ دیاگرام الگوریتم SIFT

۲-۱ شناسایی

استخراج ویژگی‌ها در الگوریتم SIFT توسط شناساگر انجام می‌شود. مرحله استخراج ویژگی در این الگوریتم خود شامل سه قدم می‌باشد: (۱) استخراج اکستریم‌های فضای مقیاس، (۲) بهبود دقت موقعیت و حذف اکستریم‌های ناپایدار، و (۳) تخصیص جهت به هر ویژگی. در ادامه، جزئیات هر یک از این مراحل شرح داده می‌شود.

• استخراج اکستریم‌های فضای مقیاس

اولین قدم در فرآیند استخراج ویژگی الگوریتم SIFT، شناسایی موقعیت‌هایی از تصویر است که مستقل از تغییر مقیاس هستند. برای این منظور، ویژگی‌های پایدار تصویر در مقیاس مختلف آن با استفاده از «فضای مقیاس»^۱ استخراج می‌شوند. فضای مقیاس، نمایش ساختارهای تصویر در مقیاس‌های مختلف بوده و متشکل از مجموعه‌ای از تصاویر گوسی و تفاضل گوسی^۲ در ابعاد مختلف

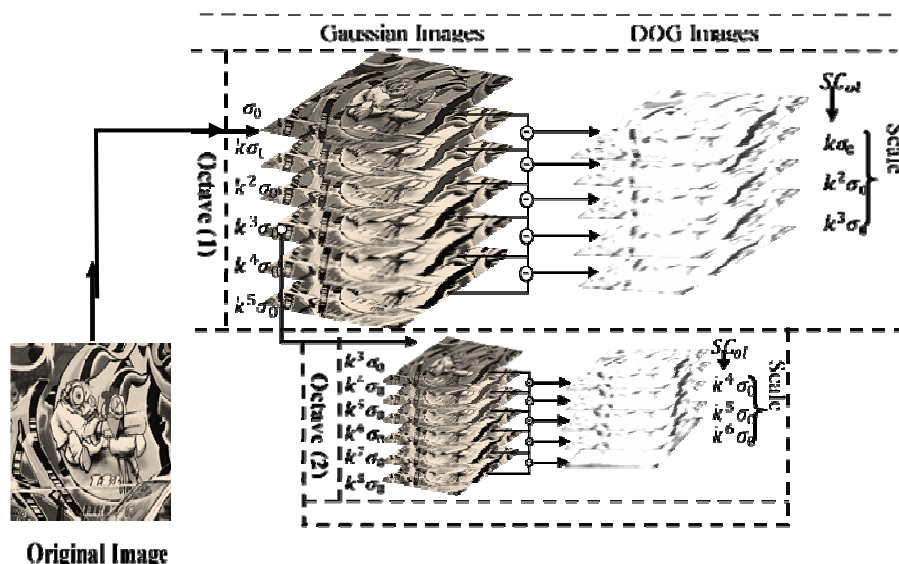
³ Octave

⁴ Convolve

⁵ Candidate

¹ Scale Space

² Difference Of Gaussian(DOG)



شکل ۳ فضای مقیاس [۱۸]

$$\hat{X} = -\frac{\partial^2 D^{-1}}{\partial X^2} \cdot \frac{\partial D}{\partial X} \quad (۴)$$

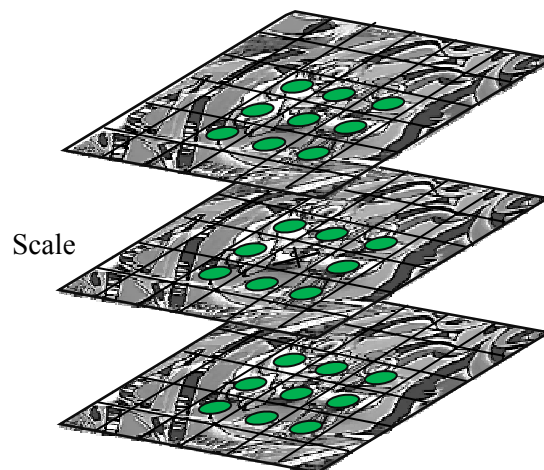
سپس به بررسی میزان مقدار ثابت \hat{X} پرداخته می‌شود که اگر بزرگتر از ۰/۵ باشد، موقعیت نقطه کلیدی کاندیدا تغییر می‌کند و درون‌یابی برای این نقطه انجام می‌شود و در غیر اینصورت مقدار ثابت به نقطه کلیدی کاندیدا اضافه شده و اندازه‌ی تابع نیز در این موقعیت اکسترم با استفاده از رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial D^T}{\partial X} \hat{X} \quad (۵)$$

بدین ترتیب، موقعیت مکانی ویژگی در حد زیر پیکسل محاسبه شده و میزان مقیاس دقیق آن نیز برآورد می‌شود. اندازه قدرمطلق تابع در موقعیت اکسترم، $|D(\hat{X})|$ به عنوان میزان کنتراست هر ویژگی در نظر گرفته شده و برای حذف ویژگی‌های ناپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطابق با پیشنهاد لاوو ویژگی‌های که میزان کنتراست آن‌ها از یک مقدار آستانه ($T_c=0.03$) کمتر باشد، ناپایدار و حساس به نویز بوده و حذف می‌شوند [۱۵]. در این مرحله، بعد از حذف ویژگی‌هایی که کنتراست پایینی دارند لازم است ویژگی‌هایی که بر روی لبه‌ها قرار دارند، حذف شوند، چون حساس به نویز و تغییرات کوچک در همسایگی خود بوده است [۱۵]. برای این منظور، مطابق با پیشنهاد لاوو و از نسبت میان مقادیر ویژه‌ی ماتریس هسیان^۱ برای تشخیص و حذف نقاط واقع بر روی لبه‌ها استفاده می‌شود. ماتریس هسیان، ماتریس مشتق‌های جزئی مرتبه دوم نسبت به x و y بوده و مطابق رابطه (۶) قابل برآورد می‌باشد.

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که در رابطه (۶)، D_{xx} مشتق دوم نقاط کاندیدا نسبت به x روی تصویر DOG، D_{yx} و D_{xy} مشتق دوم نقاط کاندیدا نسبت به x, y



شکل ۴ استخراج اکسترم تصاویر DOG با بررسی هر پیکسل (با علامت ×) در همسایگی ۲۶ تایی خود [۱۸]

• بهبود دقت موقعیت و حذف اکسترم‌های ناپایدار در این مرحله، ویژگی‌هایی که کنتراست پایینی داشته و بر روی لبه قرار دارند، حذف می‌شوند. الگوریتم با انجام درون‌یابی از داده مجاور هر نقطه کلیدی، محل دقیق آن‌ها را تعیین می‌کند. درون‌یابی با استفاده از بسط سری تیلور درجه دوم از تابع تفاضل گوسی فضای مقیاس $D(x, y, \sigma)$ با نقطه کلیدی کاندیدا انجام می‌شود. بسط تیلور مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$D(\hat{X}) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (۳)$$

که D و مشتقات آن در نقطه کلیدی ارزیابی می‌شود و $X(x, y, \sigma)$ مقدار ثابت این نقطه است. به منظور تعیین موقعیت اکسترم \hat{X} ، از رابطه (۳) نسبت به X مشتق گرفته شده و با صفر برابر قرار داده شده و مقدار \hat{X} مطابق با رابطه (۴) بدست می‌آید:

^۱ Hessian

یک ناحیه به صورت یک شبکه‌ی 4×4 در اطراف هر ویژگی در تصویر گوسی مربوط به آن، در نظر گرفته می‌شود. ابعاد این ناحیه، مطابق با مقیاس هر ویژگی و به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هر سلول^۲ به صورت مربعی با ضلع معادل با سه برابر مقیاس ویژگی باشد. سپس مختصات شبکه معادل با جهت اصلی ویژگی مورد نظر چرخانده می‌شود. آنگاه، مقادیر اندازه و جهت گرادیان پیکسل‌های درون ناحیه‌ای چرخیده، محاسبه و جهت گرادیان‌ها نیز معادل با جهت اصلی ویژگی مورد نظر چرخش داده می‌شود. در ادامه، یک تابع گوسی با مقیاس معادل نصف پهناى شبکه، به منظور وزن دهی مقادیر گرادیان‌ها استفاده می‌شود. سپس برای سلول در شبکه، یک هیستوگرام از جهت گرادیان‌های وزن دهی شده‌ی پیکسل‌های درون آن مشابه با هیستوگرام جهت ایجاد شده در مرحله‌ی تخصیص جهت، ایجاد می‌شود. به منظور اجتناب از اثرات مرزهای میان سلول‌ها و همچنین مرز میان محدوده‌های زوایا در هیستوگرام، یک درون‌یابی سه خطی^۳ برای توزیع مقدار گرادیان در ایجاد این هیستوگرام انجام می‌گیرد. در نهایت توصیفگر SIFT به صورت یک بردار با ۱۲۸ مؤلفه ایجاد می‌شود. به منظور کاهش اثرات تغییرات روشنایی، اندازه‌ی این توصیفگر نرمالیزه می‌شود. در ادامه، با هدف کاهش اثرات ناشی از تغییر زاویه تصویربرداری که به صورت مقادیری با گرادیان بالا ظاهر می‌شود، یک آستانه $0/2$ برای مقادیر توصیفگر در نظر گرفته شده و فرآیند نرمالیزه کردن توصیفگر مجدداً تکرار می‌شود [۱۵].

۲-۳ تطبیق

پس از ایجاد یک توصیفگر برای هر ویژگی، می‌بایست این توصیفگرها در دو تصویر با هم تطبیق داده شوند. معمولاً از فاصله اقلیدسی برای این هدف استفاده می‌شود. آنگاه از یک معیار مناسب برای تطبیق صحیح استفاده می‌شود. به طور کلی سه معیار برای تطبیق توصیفگرها در دو تصویر وجود دارد: (۱) تطبیق مبتنی بر آستانه، (۲) تطبیق مبتنی بر نزدیک‌ترین همسایه، و (۳) تطبیق مبتنی بر نسبت اولین و دومین نزدیک‌ترین همسایه که در ادامه، هر یک از این معیارها به طور مختصر بررسی می‌شوند.

- تطبیق مبتنی بر آستانه: اگر فاصله بین توصیفگرهای دو نقطه کلیدی کمتر از مقدار آستانه مورد نظر باشد، دو نقطه کلیدی تطبیق می‌یابند. مهمترین نقص این روش این است که یک توصیفگر ممکن است دارای چندین تطبیق باشد [۲۲].
- تطبیق مبتنی بر نزدیک‌ترین همسایه: دو ناحیه برای مثال A و B تطبیق می‌یابند اگر توصیفگر D_B نزدیک‌ترین همسایه به توصیفگر D_A باشد و فاصله بین این دو توصیفگر کمتر از آستانه مورد نظر باشد. با این روش یک توصیفگر تنها یک تطبیق دارد [۲۲].

روی تصویر DOG، مشتق دوم نقاط کاندیدا نسبت به y روی تصویر DOG می‌باشند. فرض شده است که α مقدار ویژه بزرگ و β مقدار ویژه کوچک ماتریس هسیان می‌باشد بنابراین نسبت این مقادیر ویژه مطابق رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$r = \frac{\alpha}{\beta} \quad (7)$$

مطابق با پیشنهاد لاوو، باید نقاطی که میزان r برای آن‌ها بیشتر از ۱۰ است، حذف شوند [۱۵]. بعد از حذف ویژگی‌های ناپایدار، باید به هر یک از ویژگی‌های پایدار باقیمانده یک جهت تخصیص داد که در ادامه به طور کامل شرح داده می‌شود.

• تخصیص جهت به هر ویژگی

در این مرحله، به منظور انجام عمل تطبیق، برای هر یک از ویژگی‌هایی که از مرحله قبل استخراج شده‌اند یک پارامتر جهت تعیین می‌شود. ابتدا یک پنجره دایره‌ای شکل در اطراف هر ویژگی در تصویر گوسی مربوط به آن انتخاب می‌شود. مقدار شعاع دایره، سه برابر مقیاس هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود. سپس مقادیر اندازه و جهت گرادیان برای پیکسل‌های درون ناحیه محاسبه شده و مقادیر اندازه آن‌ها با استفاده از یک تابع گوسی با انحراف معیار یک و نیم برابر مقیاس آن وزن‌دهی می‌شوند. اندازه گرادیان $m(x,y)$ و جهت گرادیان $\theta(x,y)$ برای هر پیکسل با استفاده از فاصله و زاویه پیکسل‌های همسایگی آن به ترتیب مطابق روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود.

(۸)

$$m(x,y) = \sqrt{\left((L(x+1,y) - L(x-1,y))^2 + (L(x,y+1) - L(x,y-1))^2 \right)}$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x,y+1) - L(x,y-1)}{L(x+1,y) - L(x-1,y)} \right) \quad (9)$$

سپس، یک نمودار به عنوان هیستوگرام جهت ایجاد می‌شود و جهت مربوط به بیشینه ستون هیستوگرام و جهت‌های که 80% جهت بیشینه هستند، به عنوان جهت مربوط به این ویژگی استخراج شده و با یک بردار با چهار مؤلفه $f_i(x_i, y_i, \sigma_i, \theta_i)$ نشان داده می‌شود که در آن (x_i, y_i) بیانگر موقعیت، σ بیانگر مقیاس و θ بیانگر جهت هر ویژگی می‌باشد.

۲-۲ توصیفگر

بعد از استخراج نقاط کلیدی، الگوریتم SIFT توصیفگر ویژگی‌ها را به عنوان ابزاری برای تطبیق میان تصاویر تولید می‌کند. با ایجاد توصیفگرها مطابق با مقیاس و جهت هر ویژگی، این توصیفگرها نسبت به تغییر مقیاس و چرخش مقاوم می‌شوند. همچنین، این توصیفگر در مقابل سایر تغییرات نظیر تغییرات روشنایی و تغییرات ناشی از زاویه دید^۱ تصویربرداری تا حد ممکن مقاوم است. برای ایجاد توصیفگر در الگوریتم استاندارد SIFT، در ابتدا

² Bin

³ Tri-Linear Interpolation

¹ Viewpoint

موارد مشابه کاربرد دارد [۱۶]. روش‌های انطباق تصویر را به طور کلی می‌توان به دو دسته روش‌های مبتنی بر ناحیه^۳ و روش‌های مبتنی بر ویژگی^۴ دسته‌بندی کرد. روش‌های مبتنی بر ناحیه، مستقیماً از توزیع سطوح خاکستری تصاویر درون پنجره‌هایی با ابعاد یکسان استفاده می‌کنند. بدین منظور، با استفاده از معیارهای مشابهت (یا تفاوت) مختلف، به طور آماری شدت روشنایی دو تصویر مقایسه و موقعیت بیشینه شباهت (یا کمینه تفاوت) را به عنوان موقعیت‌های مشابه تعیین می‌کنند. به طور کلی، روش‌های مبتنی بر ناحیه برای مواردی که کار می‌روند که تصاویر جزئیات مهم زیادی نداشته باشد. در روش‌های مبتنی بر ویژگی، ابتدا ویژگی‌های تصاویر شناسایی می‌شوند و سپس تطبیق میان آن‌ها انجام می‌شود. از روش‌های مبتنی بر ویژگی معمولاً زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات ساختار محلی مهم‌تر از اطلاعات شدت روشنایی باشد [۲۳]. روش‌های مبتنی بر ویژگی در مقایسه با روش‌های مبتنی بر ناحیه در برابر انحراف هندسی و رادیومتریکی عملکرد بهتری دارد [۲۴]. در ادامه به بررسی مقالاتی که در آنها از الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن برای انطباق تصویر استفاده شده پرداخته می‌شود.

در [۲۵] روش BP-SIFT برای انطباق تصویر پیشنهاد شد که در آن از الگوریتم انتشار باور^۵ [۲۶] برای افزایش تطبیق‌های درست استفاده گردید. این روش برای انطباق تصاویری که از صحنه‌های متفاوت گرفته شده‌اند، مناسب نیست. در [۲۷] از الگوریتم SIFT برای انطباق تصاویر سوپررزولوشن^۶ استفاده شده است. در [۲۸] از الگوریتم SIFT جهت شناسایی ویژگی‌ها و سپس از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات^۷ جهت انطباق تصاویر بُرد مدارهای چاپی استفاده می‌شود. این روش نسبت به روش‌های [۱۵، ۲۹] از نظر ریشه میانگین مربعات خطا عملکرد بهتری دارد و از سرعت مناسبی برخوردار است. در [۲۰] به مقایسه الگوریتم SIFT، PCA-SIFT، SURF پرداخته شد که نشان می‌دهد، الگوریتم SIFT نسبت به تغییرات مقیاس، انحرافات مستوی^۸ و محوشدگی نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد. الگوریتم SURF و PCA-SIFT نسبت به الگوریتم SIFT سریعتر می‌باشد که الگوریتم PCA-SIFT در برابر تغییرات چرخش و تغییرات روشنایی نسبت به دو الگوریتم دیگر عملکرد بهتری دارد. در [۳۰] به مقایسه الگوریتم SIFT و SURF جهت انطباق تصاویر پرداخته شد که نشان می‌دهد الگوریتم SIFT تعداد ویژگی‌های بیشتری نسبت به الگوریتم SURF استخراج می‌کند اما زمان اجرای الگوریتم SIFT

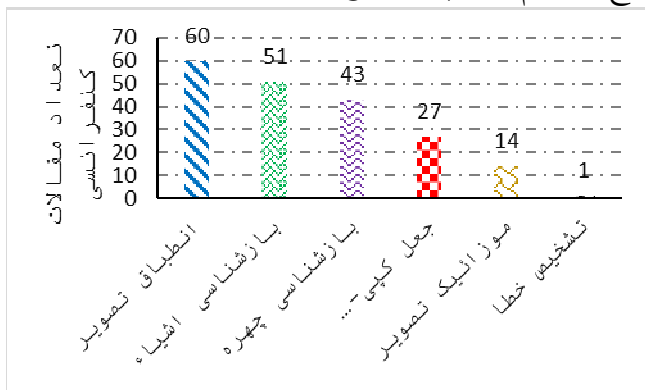
تطبیق مبتنی بر نسبت اولین و دومین نزدیک‌ترین همسایه: این روش تقریباً مشابه تطبیق مبتنی بر نزدیک‌ترین همسایه می‌باشد [۲۲]. در این روش دو نقطه کلیدی A و B تطبیق می‌یابند به شرطی که رابطه (۱۰) برقرار باشد.

$$\frac{\|D_A - D_B\|}{\|D_A - D_C\|} < t \quad (10)$$

در این رابطه، D_B توصیفگر اولین نزدیک‌ترین همسایه به توصیفگر D_A و D_C توصیفگر دومین نزدیک‌ترین همسایه به توصیفگر D_A می‌باشد. اگر فاصله بین اولین نزدیک‌ترین همسایه تا توصیفگر نسبت به فاصله دومین نزدیک‌ترین همسایه تا توصیفگر منظور، از حد آستانه کوچک‌تر باشد، عمل تطبیق انجام می‌شود. در الگوریتم SIFT معمولاً از روش تطبیق مبتنی بر نسبت اولین و دومین نزدیک‌ترین همسایه استفاده می‌شود و مقدار t برابر ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود.

۳ کاربردهای الگوریتم SIFT

الگوریتم SIFT به طور گسترده در حوزه پردازش تصویر به کار گرفته شده است. پایگاه IEEE کاربردهای الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن را در محدوده سال‌های (۲۰۱۵-۲۰۱۹) در شکل ۵ مورد بررسی قرار داده است. با توجه به این بررسی می‌توان نتیجه گرفت که نوع کاربرد در تعیین الگوریتم مناسب حائز اهمیت می‌باشد. در ادامه این بخش، به بررسی چند کاربرد مهم و رایج الگوریتم SIFT پرداخته می‌شود.



شکل ۵ نمودار کاربردهای مختلف الگوریتم SIFT برحسب تعداد مقالات در فاصله سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۹

۳-۱ انطباق تصویر

انطباق تصویر، از نظر هندسی، دو تصویر مرجع^۱ و حس شده^۲ را هم‌تراز می‌کند که در شناسایی تغییرات^۳، ترکیب تصاویر^۴ و برخی

^۱ تصویر مرجع: تصویری که به عنوان مبنا برای انطباق تصویر استفاده می‌شود.

^۲ تصویر حس شده: تصویری که اطلاعات آن به نوعی بر روی تصویر مرجع قرار داده شده و بر روی تصویر مرجع منطبق می‌شود.

^۳ Change Detection

^۴ Image Fusion

^۵ Area Based Methods

^۶ Feature Based Methods

^۷ Belief Propagation

^۸ Super Resolution

^۹ Particle Swarm Optimisation (PSO)

^{۱۰} Affine

دقت و سرعت بالاتری در انطباق تصاویر مرئی و هوایی برخوردار است. در [۴۶] از نسخه بهبودیافته الگوریتم SIFT جهت انطباق تصاویر استفاده شده است که این نسخه بهبودیافته نسبت به الگوریتم SIFT کلاسیک در مرحله تطبیق ارتقا داده شده است. در [۴۷] الگوریتم^{۱۱} PC-SIFT جهت انطباق تصاویر نوری و SAR پیشنهاد شد. در [۴۸] به مقایسه توصیفگر SIFT، SURF و LBP در تصاویر سنجش از دور پرداخته شد که نشان می‌دهد، توصیفگر SIFT نسبت به دیگر توصیفگرها بهترین عملکرد دارد. توصیفگر LBP نسبت به توصیفگر SURF عملکرد بهتری دارد اما نسبت به توصیفگر SIFT عملکرد بدتری دارد. توصیفگر SURF بدترین عملکرد در تصاویر سنجش از دور دارد. این الگوریتم نسبت به الگوریتم SIFT کلاسیک از دقت بالاتری در انطباق تصاویر چندمودی برخوردار است. در [۴۹] از الگوریتم SIFT و الگوریتم RANSAC برای انطباق تصاویر سونار دهانه مصنوعی^{۱۲} استفاده شده است. در [۵۰] از الگوریتم USAR-SIFT جهت انطباق در تصاویر SAR استفاده شده است که در این روش، ویژگی‌ها براساس دیاگرام ورونی^{۱۳} به طور یکنواخت توزیع می‌شوند. این روش نسبت به الگوریتم SAR-SIFT از تعداد تطبیق بیشتری برخوردار است. در [۵۱] ابتدا برای حذف نویز در تصاویر SAR از فیلتر والیس^{۱۴} و سپس از الگوریتم SIFT جهت استخراج ویژگی‌ها و تطبیق در انطباق تصاویر SAR استفاده می‌شود. در [۵۲] ابتدا از الگوریتم SIFT جهت استخراج اطلاعات سطح پایین (ویژگی‌های سطح پایین) و سپس از الگوریتم CNN^{۱۵} [۵۳] جهت استخراج اطلاعات سطح بالا (ویژگی‌های سطح بالا) در انطباق تصاویر سنجش از دور استفاده شده است که این روش نسبت به روش‌های کلاسیک از دقت هم‌ترازی و تعداد تطبیق‌های درست بهتری برخوردار است.

۲-۳- جعل کپی - جابجایی تصویر

در جعل کپی-جابجایی تصویر، بخش‌هایی از تصویر (مربوط به شیء یا فرد) کپی می‌شود و به منطقه دیگری از همان تصویر یا تصویر دیگر و با دستکاری یا بدون آن (تبدیل هندسی) منتقل می‌شود. این روش یکی از متداولترین و ساده‌ترین نوع جعل می‌باشد که تشخیص آن در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. به طور کلی روش‌های تشخیص جعل کپی-جابجایی به دو دسته روش‌های مبتنی بر بلوک و روش‌های مبتنی بر ویژگی تقسیم می‌شوند [۵۴]. در ادامه به بررسی مقالاتی که از الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن در جعل کپی - جابجایی استفاده شده پرداخته می‌شود.

نسبت به الگوریتم SURF بیشتر می‌باشد. در [۳۱] از الگوریتم زمینه شکل^۱ و SIFT برای انطباق تصاویر سی‌تی‌اسکن استفاده گردید که در این روش، ابتدا گوشه‌های سه بعدی با استفاده از شناساگر فرستر^۲ شناسایی می‌شوند، سپس از توصیفگر محلی^۳ SIFT استفاده می‌شود. با توجه به شباهت زیاد همسایه‌های محلی در تصاویر ریه از توصیفگر عمومی زمینه شکل استفاده شده و سپس برای تطبیق نقاط ویژگی از الگوریتم تطبیقی که تابع هزینه هر توصیفگر را کمینه کند بهره گرفته می‌شود. همچنین از تبدیل TPS^۴ برای انجام انطباق استفاده شده است. این روش عملکرد قابل قبولی در انطباق تصاویر بافت نرم دارد. در [۳۲] روش N-SIFT برای تطبیق تصاویر پزشکی N بعدی پیشنهاد شده که می‌تواند تصاویر چندمودی^۵ با ابعاد متفاوت (برای مثال تصویر پزشکی سه بعدی و چهاربعدی) را تطبیق دهد. در [۳۳] از الگوریتم SIFT جهت شناسایی ویژگی‌ها و تطبیق اولیه در تصاویر CT مغز استفاده می‌شود و سپس از روش خاکستری جهت حذف تطبیق‌های نادرست و ارتقای دقت انطباق استفاده می‌شود. در [۳۴] الگوریتم FSG-SIFT^۶ جهت انطباق تصاویر سنجش از دور پیشنهاد شد. این الگوریتم نسبت به روش‌های [۳۵-۳۸] در انطباق تصاویر چندطیفی سنجش از دور عملکرد مناسب‌تری از نظر دقت دارد. در [۳۹] ابتدا از الگوریتم SIFT جهت انطباق کلی در تصاویر سنجش از دور و سپس از همبستگی فازی جهت انطباق جزئی استفاده شد. این روش همزمان از مزایای روش‌های مبتنی بر ویژگی و روش‌های مبتنی بر ناحیه برخوردار است. در [۴۰] ابتدا از الگوریتم SIFT جهت پیش انطباق و سپس از الگوریتم اطلاعات مشترک نواحی ثابت به چرخش^۷ جهت انطباق جزئی در تصاویر چندمودی سنجش از دور استفاده شد. در [۴۱] از الگوریتم SIFT جهت شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها و از مدل ریاضی پیشنهادی جهت حذف تطبیق‌های نادرست در انطباق تصاویر سنجش از دور استفاده شده است. در [۴۲] از الگوریتم ASIFT^۸ جهت شناسایی ویژگی‌ها در انطباق تصاویر UAV^۹ استفاده شده است. این روش نسبت به روش SIFT عملکرد مناسب‌تری از نظر دقت تطبیق و ریشه میانگین مربعات خطا دارد. در [۴۳] ابتدا از روش گرادیان مورفولوژی جهت استخراج لبه‌ها و سپس از روش C-SIFT^{۱۰} جهت استخراج ویژگی‌ها در لبه‌های شناسایی شده برای انطباق تصاویر مرئی و مادون قرمز استفاده شده است. این روش نسبت به روش‌های [۴۴، ۴۵] از

¹ Shape Context

² Forester

³ Local

⁴ Thin-Plate Spline (TPS)

⁵ Multimodal

⁶ Feature Slope Grouping-SIFT (FSG-SIFT)

⁷ Rotationally Invariant Regional Mutual Information (RIRMI)

⁸ Affine Scale-Invariant Feature Transform (ASIFT)

⁹ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

¹⁰ Colored SIFT (C_SIFT)

¹¹ SIFT based on Phase Congruency (PC-SIFT)

¹² Synthetic Aperture Sonar (SAS) Image

¹³ Voronoi

¹⁴ Wallis

¹⁵ Convolutional Neural Network (CNN)

در [۵۵] از الگوریتم SIFT و خوشه بندی سلسله مرتبه ای^۱ به ترتیب جهت شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها برای شناسایی نواحی چندگانه جعل استفاده شده است. در [۵۶] از الگوریتم SIFT و SURF جهت شناسایی ویژگی‌ها و از فاصله اقلیدوسی برای تطبیق ویژگی‌ها بهره گرفته شد. در [۵۷] از الگوریتم SURF و رویکرد نزدیکترین همسایه^۲ جهت شناسایی نقاط کلیدی و تطبیق میان آنها استفاده می‌شود که این روش برای شناسایی نواحی جعل چندگانه با تغییرات چرخش و محوشدگی مناسب است. در [۵۸] ابتدا از الگوریتم SIFT جهت شناسایی ویژگی‌ها و سپس از روش تطبیق جدیدی بر اساس الگوریتم SIFT جهت تطبیق نواحی جعل استفاده شده است. این روش نسبت به روش‌های کلاسیک دیگر [۵۹، ۶۰] عملکرد مناسب‌تری از نظر زمان اجرا و نرخ مثبت درست^۳ و نرخ مثبت اشتباه^۴ دارد. در [۱۸] از الگوریتم RKEM-SIFT و خوشه بندی سلسله مرتبه‌ای به ترتیب جهت شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها استفاده شده که این روش برای شناسایی نواحی جعل به طور موثر عمل می‌کند. در [۶۱] از الگوریتم SIFT، گشتاور ثابت و الگوریتم رشد ناحیه به ترتیب جهت شناسایی، تطبیق ویژگی‌ها و شناسایی نواحی جعل کپی-جابجایی استفاده شده است. این روش نسبت به روش‌های [۵۸، ۶۲] دقت عملکرد مناسب‌تری دارد. در [۶۳] به مقایسه الگوریتم‌های SIFT، SURF و HOG^۵ در جعل کپی-جابجایی پرداخته شد که نشان می‌دهد الگوریتم SIFT نسبت به دو الگوریتم دیگر از دقت بالاتری برخوردار است.

۳-۳ موزاییک تصویر

موزاییک تصویر، فرآیند ترکیب دو یا چند تصویر با یکدیگر برای ایجاد یک تصویر یکپارچه بزرگ‌تر و پرمحتواتر است [۶۴]. این فرآیند یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در زمینه پردازش تصویر، بینایی ماشین و گرافیک کامپیوتری است که هم‌اکنون کاربردهای فراوانی در فشرده‌سازی تصاویر و نمایه‌گذاری آن‌ها دارد [۱۳، ۶۵]. به‌طور کلی، روش‌های موزاییک تصویر به دو دسته روش‌های مستقیم و روش‌های مبتنی بر ویژگی تقسیم می‌شوند [۱۴]. در روش‌های مستقیم از اطلاعات تمام پیکسل‌ها جهت موزاییک تصویر استفاده می‌شود. روش‌های مستقیم برای موزاییک تصاویر با هم‌پوشانی زیاد، انتقال‌ها و چرخش‌های کوچک مناسب است. در روش مبتنی بر ویژگی، ابتدا ویژگی‌های تصاویر شناسایی می‌شوند و سپس فرآیند تطبیق و هموگرافی^۶ بین نقاط ویژگی‌ها انجام می‌شود. علاوه بر کاربرد در موارد مذکور، روش‌های مبتنی بر تطبیق ویژگی‌ها و ترکیب برای موزاییک تصویر استفاده شد.

در [۶۷] از الگوریتم SIFT برای ایجاد تصاویر پاناروما استفاده شده است. این روش برای موزاییک بیش از دو تصویر هم مناسب می‌باشد. در [۶۸] جهت انطباق تصویر از الگوریتم SIFT برای موزاییک تصویر استفاده شد که این روش در برابر انحراف‌های هندسی عملکرد مناسبی دارد. در [۶۹] از الگوریتم SIFT و الگوریتم حداقل مربعات^۷ جهت موزاییک تصاویر هوایی بهره‌گرفته شد. از آنجایی که تصاویر هوایی با اعوجاج‌های هندسی روبرو هستند، الگوریتم SIFT عملکرد مناسبی در این تصاویر دارد. در [۷۰] از SIFT برای موزاییک تصویر کانونی چشم استفاده شده که در آن، برای حذف تطبیق‌های نادرست و بهبود دقت فرآیند موزاییک از الگوریتم MLESAC استفاده شد. در [۷۱] از الگوریتم SIFT جهت موزاییک تصاویر هوایی استفاده شده است. در [۷۲] از الگوریتم SIFT جهت استخراج ویژگی‌ها، از الگوریتم KD-tree و استراتژی جستجوی BBF برای تطبیق ویژگی‌ها و از الگوریتم RANSAC جهت حذف تطبیق نادرست و بهبود فرآیند موزاییک بهره گرفته شد. این روش جهت انجام موزاییک بیش از دو تصویر نیاز به زمان زیادی برای اجرای الگوریتم دارد. در [۷۳] از الگوریتم SIFT جهت انطباق تصویر و از الگوریتم PROSAC برای انجام فرآیند موزاییک استفاده شده است؛ این روش از دقت و عملکرد مناسبی برخوردار است. در [۲۵] از الگوریتم SIFT جهت تطبیق تصاویر و از الگوریتم RANSAC برای ارتقای دقت تطبیق و بهبود موزاییک تصویر استفاده شد. در [۷۴] از الگوریتم SIFT برای تطبیق در فرآیند موزاییک تصویر استفاده شد. در [۷۵] از الگوریتم SURF و RANSAC به ترتیب برای استخراج ویژگی‌ها و حذف تطبیق‌های نادرست در موزاییک تصویر استفاده شد. این روش نسبت به الگوریتم‌های Harris و SIFT زمان اجرای کمتری دارد. در [۷۶] از الگوریتم‌های SURF و BBF به ترتیب برای شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها جهت ترکیب تصاویر استفاده شد که این روش به دقت تطبیق مناسبی دست یافت. در [۷۷] الگوریتم SURF و RANSAC به ترتیب جهت شناسایی ویژگی‌ها و حذف تطبیق‌های نادرست برای موزاییک تصویر پیشنهاد شد. در [۳۲] از الگوریتم ASIFT جهت فرآیند ترکیب تصویر بهره گرفته شد. در [۷۸] از الگوریتم SIFT و روش میانگین وزن داده شده به ترتیب جهت تطبیق ویژگی‌ها و ترکیب برای موزاییک تصویر استفاده شد.

¹ Hierarchical Clustering

² Nearest Neighbor

³ True-Positive Rate

⁴ False-Positive Rate

⁵ Histogram Oriented Gradient

⁶ Homography

⁷ Least Squares Method

۳-۴ ردیابی تصویر

ردیابی اشیاء، دنبال کردن مسیر حرکت یک شیء یا اشیای متحرک در دنباله‌ای از تصاویر ورودی است. اشیای متحرک مورد ردیابی می‌تواند هر شیء متحرکی مانند ماهی درون آب، قایق درون دریا، عابر پیاده در پیاده‌رو، اتومبیل در بزرگراه‌ها باشد که بر اساس کاربرد، نیازمند به تعیین مکان آن هستیم. این فرآیند در سیستم‌های نظارتی، کنترل ترافیک، ناوبری خودکار، تعامل انسان با کامپیوتر و رباتیک کاربرد دارد. شناساگرهای گوناگونی برای استخراج و شناسایی ویژگی‌ها استفاده می‌شود که الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن نمونه‌هایی از آنها می‌باشد.

در [۷۹] از الگوریتم SIFT برای استخراج ویژگی‌ها در ردیابی اشیاء استفاده شده که این الگوریتم توانمند نسبت به تبدیل‌های هندسی، تغییرات روشنایی و انسدادهای جزئی موجود در این کاربرد مقاوم است. در [۸۰] از الگوریتم SIFT و SURF جهت استخراج ویژگی‌ها در ردیابی اشیاء استفاده شده و نشان داده شده که الگوریتم SURF نسبت به الگوریتم SIFT از دقت بالاتری برخوردار است. در [۸۱] ابتدا از الگوریتم جابجایی میانگین^۱ جهت یافتن موقعیت اشیاء و سپس از الگوریتم SIFT برای استخراج ویژگی‌ها استفاده شده است. در [۸۲] ابتدا از الگوریتم PCA-SIFT جهت استخراج ویژگی‌ها و سپس از روش جابجایی میانگین برای ردیابی اشیاء در حال حرکت استفاده شده است. در [۸۳] از الگوریتم SIFT برای استخراج ویژگی‌ها و تطبیق تصاویر در ردیابی اشیاء استفاده شده است. در [۸۴] الگوریتم Harris-SIFT جهت استخراج ویژگی‌ها پیشنهاد شده که این روش سرعت و دقت شناسایی اشیاء در کاربرد ردیابی را بهبود می‌دهد. در [۸۵] ابتدا از الگوریتم FAST جهت استخراج ویژگی‌ها و سپس از الگوریتم SIFT جهت توصیف ویژگی‌ها برای ردیابی اشیاء استفاده شده است. در [۸۶] از الگوریتم dense SIFT جهت شناسایی ویژگی‌ها در ردیابی اشیاء استفاده شده است. این روش نسبت به روش‌های [۸۷-۸۹] از عملکرد بهتری در ردیابی اشیاء برخوردار است. در [۹۰] ابتدا از الگوریتم SIFT جهت شناسایی ویژگی‌ها و سپس از الگوریتم K-means جهت دسته‌بندی کردن ویژگی‌ها و شناسایی اشیاء متحرک در فرآیند ردیابی اشیاء استفاده می‌شود. در [۹۱] از الگوریتم SIFT جهت استخراج ویژگی‌ها در ردیابی اشیاء در حال حرکت با پس‌زمینه متفاوت استفاده شده است. در [۹۲] از الگوریتم SIFT جهت شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها، سپس از الگوریتم K-NN^۲ جهت دسته‌بندی ویژگی‌ها و در نهایت از الگوریتم RANSC جهت برآورد تغییرات هموگرافی در ردیابی اشیاء استفاده شده است. در [۹۳] الگوریتم SIFT را جهت ردیابی اشیاء بهبود دادند. در [۹۴] نیز الگوریتم SIFT با هدف

کاهش ابعاد توصیفگر از ۱۲۸ به ۴۰ بهبود داده شده که سبب کاهش زمان اجرا و افزایش صحت می‌شود.

۴ بررسی مزایا و معایب الگوریتم SIFT

الگوریتم SIFT دارای مزایای مهمی می‌باشد که عبارتند از (۱) استفاده از تفاضل گوسی در مرحله استخراج ویژگی‌ها، این ویژگی باعث می‌شود که این الگوریتم نسبت به تغییرات مقیاس ثابت باشد. (۲) تخصیص جهت و ایجاد توصیفگرها سبب می‌شود که الگوریتم نسبت به تغییرات چرخش مستقل باشد. (۳) ایجاد توصیفگرها در این الگوریتم باعث می‌شود که نسبت به تغییرات روشنایی و تغییرات زاویه و انحراف‌های مستوی تا حد ممکن مستقل و پایدار باشد. (۴) الگوریتم SIFT یکی از موثرترین توصیفگرهای موجود است که در برابر تغییرات هندسی بهتر از سایر توصیفگرها عمل می‌کند. با وجود مزایای ذکر شده اما این الگوریتم در هر یک از مراحل آن دارای محدودیت‌هایی (با توجه به نوع تصاویر) نیز می‌باشد. محدودیت‌های الگوریتم SIFT از نظر نوع تصویر به پنج دسته شامل تصاویر سنجش از دور، تصاویر SAR، تصاویر پزشکی، تصاویر طبیعی و محدودیت‌های مشترک بین همه تصاویر قابل تقسیم می‌باشد که در ادامه به شرح مختصر هر یک از آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱ محدودیت استفاده از SIFT در تصاویر سنجش از دور

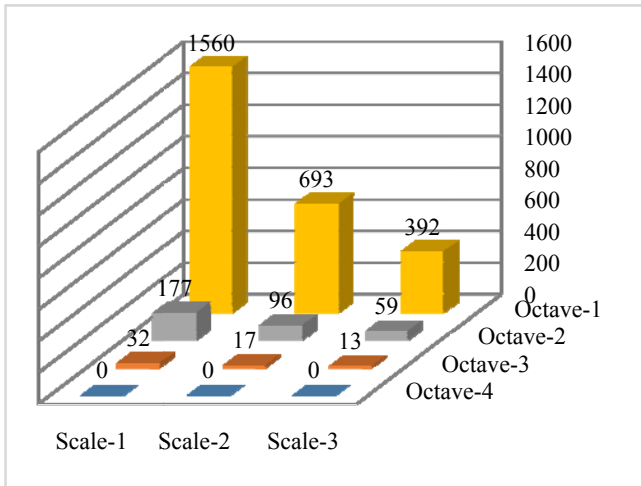
برای تصاویر سنجش از دور، الگوریتم SIFT در مرحله استخراج ویژگی‌ها دارای دو مشکل اصلی است: (۱) کنترل پذیری پایین آن در تعداد ویژگی‌ها، (۲) عدم توجه به کیفیت و توزیع ویژگی‌های استخراج شده. در ادامه به صورت مختصر به این موارد پرداخته می‌شود.

- کنترل پذیری پایین SIFT در تعداد ویژگی‌ها

در این الگوریتم، موثرترین پارامتر در کنترل تعداد ویژگی‌ها میزان آستانه کنتراست ویژگی‌ها (T_C) می‌باشد، به گونه‌ای که اگر از یک صحنه با ابعاد یکسان اما با سنسورهای متفاوت استفاده شود، تعداد ویژگی‌های استخراج شده متفاوت است. برای بررسی دقیق‌تر این مسأله، انواع مختلفی از سنسورهای ماهواره‌ای در نظر گرفته شده و از هر سنسور تعداد پنج تصویر با ابعاد 500×500 پیکسل و با محتوای مختلف، انتخاب و با تغییر میزان آستانه کنتراست در محدوده $[0/4, 10^{-6}]$ ، تعداد ویژگی‌های استخراج شده اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۵ میانگین تعداد ویژگی‌های استخراج شده برای تصاویر از هر سنسور، نسبت به تغییرات آستانه کنتراست مشاهده می‌شود [۹۵]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، انتخاب یک آستانه بهینه دشوار است. به عنوان نمونه، برای آستانه $0/05$ تقریباً ۶۰۰۰ ویژگی برای تصاویر با سنسور Landsat TM استخراج می‌گردد در حالی که با همین آستانه هیچ ویژگی در تصاویر با

^۱ Mean Shift Algorithm

^۲ K-Nearest Neighbors



شکل ۸ پراکندگی ویژگی‌ها در فضای مقیاس IRS [۹۵]

۴-۲ محدودیت استفاده از SIFT در تصاویر SAR

در تصاویر SAR به دلیل وجود نویز لکه‌ای^۴، الگوریتم SIFT در مرحله استخراج ویژگی و ایجاد توصیفگر دارای محدودیت‌های زیر می‌باشد [۹۷-۹۹]:

- فضای مقیاس گوسی مورد استفاده در SIFT اغلب لبه‌ها و جزئیات ظریف در تصویر را از بین می‌برد و تأثیر قابل توجهی بر تشخیص ویژگی‌ها دارد که در شکل ۹ نشان داده شده است [۹۷].



(الف)

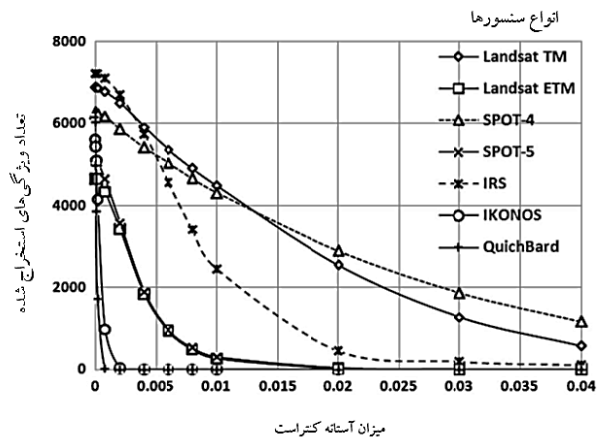


(ب)

شکل ۹ فضای مقیاس گوسی SIFT (الف) تصاویر SAR (ب) استفاده از فضای مقیاس گوسی SIFT [۹۷]

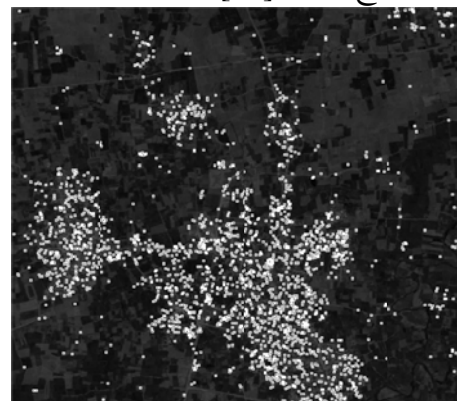
- برای شناسایی لبه‌ها در تصویر و برای تعیین جهت و ایجاد توصیفگرها در الگوریتم SIFT، اطلاعات گرادیان مورد نیاز است. به‌طور کلی برای محاسبه گرادیان هر پیکسل در تصویر گوسی می‌توان از روش‌های نسبت^۵ و تفاضل^۶ با توجه به پیکسل‌های همسایه استفاده کرد که هر کدام از این روش‌ها خود به چند دسته تقسیم می‌شوند. الگوریتم SIFT از روش تفاضل برای محاسبه گرادیان استفاده می‌کند که وجود نویز لکه‌ای در تصاویر SAR

سنسور IKONOS استخراج نمی‌شود. علاوه بر این، تغییرات اندک میزان آستانه در بعضی از موارد تأثیر قابل توجهی بر تعداد ویژگی‌های نهایی می‌گذارد. برای مثال در تصاویر با سنسور IRS در آستانه ۰/۲ حدود ۴۰۰ ویژگی استخراج می‌شود و با آستانه ۰/۰۱ حدود ۲۵۰۰ ویژگی استخراج می‌شود.



شکل ۶ بررسی میزان تأثیر آستانه‌ی کنتراست بر روی تعداد ویژگی‌های استخراج شده در الگوریتم SIFT [۹۵]

• کیفیت و توزیع ویژگی‌های استخراج شده موفقیت و قابلیت اطمینان^۱ انطباق به میزان زیادی وابسته به کیفیت و توزیع ویژگی‌های استخراج شده می‌باشد [۹۶]. عدم توجه این الگوریتم به مساله توزیع مکانی^۲ و سطوح مقیاس^۳ ویژگی‌ها سبب پراکندگی ویژگی‌ها می‌شود. شکل ۷ تصاویر با سنسور IRS با ابعاد ۸۲۵ × ۹۱۵ پیکسل را نشان می‌دهد [۹۵]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در بعضی از مناطق تصویر، تراکم ویژگی‌ها بسیار بالاست، اما در بعضی از مناطق دیگر هیچ ویژگی شناسایی نشده است. شکل ۸ توزیع ویژگی‌ها را در فضای مقیاس نشان می‌دهد که بیانگر تعداد بسیار کم (حتی صفر) ویژگی‌ها در مقیاس کم می‌باشد، در صورتی که تعداد بسیار زیادی ویژگی در مقیاس بالا استخراج شده اند [۹۵].



شکل ۷ پراکندگی ویژگی‌ها در تصویر با سنسور IRS [۹۵]

⁴ Speckle

⁵ Ratio

⁶ Difference

¹ Registration Success and Reliability

² Spatial Distribution

³ Scale Levels

۴-۵ محدودیت‌های مشترک در انواع تصاویر

برخی محدودیت‌ها در الگوریتم SIFT به نوع تصاویر بستگی ندارد که از آن جمله می‌توان به عدم توجه به کیفیت و توزیع ویژگی‌ها، کنترل پذیری پایین، عدم تناسب برای تصاویر رنگی و شناسایی و استخراج نقاط کلیدی زائد اشاره کرد [۸, ۱۵].

۵ اصلاحات الگوریتم SIFT

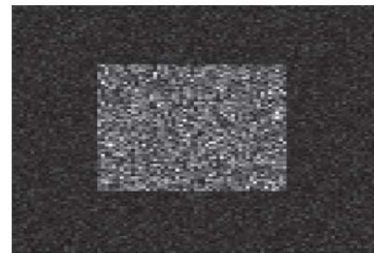
همان‌طور که در بخش ۴ بیان شد الگوریتم SIFT دارای نقایصی است که برای مرتفع کردن آنها و بهبود دقت تطبیق باید به نوع تصویر نیز توجه کرد. بدین منظور، برخی اصلاحات در الگوریتم SIFT صورت گرفته که از منظر نوع تصویر مورد استفاده می‌توان آنها را به پنج دسته تقسیم‌بندی کرد. در ادامه به این اصلاحات اشاره می‌شود.

۵-۱ اصلاحات برای تصاویر سنجش از دور

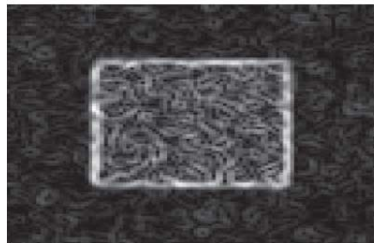
در [۱۰۱] روشی برای استخراج ویژگی‌های SIFT با توزیع مکانی پیشنهاد شده که در آن به جای استخراج اکستریم‌های تصویر DOG در همسایگی ۲۶ تایی هر پیکسل، همسایگی‌های بزرگ‌تری (۶۶ تایی) مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود مزایای این همسایگی بزرگ‌تر، این روش دارای معایبی نیز می‌باشد. یکی از این معایب این است که احتمال دارد برخی از ویژگی‌های با کیفیت ولی با ساختار کوچک تصویر حذف شوند. همچنین پیچیدگی محاسباتی این روش بیشتر از الگوریتم پایه است. همچنین، صداقت و همکاران در سال ۲۰۱۱ الگوریتم UR-SIFT را برای بهبود انطباق تصاویر سنجش‌ازدور اپتیکی پیشنهاد کردند [۹۵]. در الگوریتم UR-SIFT ویژگی‌های استخراج‌شده از نظر توزیع مکانی و مقیاس یکنواخت می‌شوند.

ماهیت پیچیده‌ی تصاویر چندمودی سنجش‌ازدور منجر به افت کارایی الگوریتم SIFT در استخراج یک مجموعه‌ی مناسب از ویژگی‌ها می‌شود. در بعضی موارد تعداد بالای ویژگی‌های استخراج‌شده باعث شباهت بسیاری از توصیفگرها به یکدیگر و در نتیجه افزایش تطبیق‌های نادرست می‌شود؛ ضمن اینکه فرآیند تطبیق بسیار زمان‌بر است. در مقابل، در بعضی موارد دیگر نیز به علت استخراج تعداد محدودی از ویژگی‌ها، عملاً تعداد تطبیق‌های صحیح بسیار کم است. از اینرو، فرآیند انطباق با شکست مواجه می‌شود [۱۰۲]. تحقیقات متعددی در زمینه اعمال الگوریتم SIFT به تصاویر چندمودی سنجش‌ازدور انجام شده است [۹۵, ۹۸, ۱۰۲]. مورینا و همکاران در [۱۰۳] از فیلترهای هموار کننده مشتق‌گیر مبتنی بر توابع فرد گابور جهت محاسبه‌ی مقادیر گرادیان‌ها به جای تفاضل پیکسل‌ها به منظور افزایش کارایی توصیفگر SIFT استفاده کردند. ونگ و همکاران [۱۰۴] از ترکیب خطی فاصله‌منهتن به جای فاصله اقلیدسی میان توصیفگرها برای فرآیند تطبیق استفاده کردند. این روش باعث کاهش زمان اجرای

سبب می‌شود مقادیر گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف، متفاوت باشد [۳۶]. در شکل ۱۰ این مساله نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ نمونه مستطیل خراب شده با نویز لکه‌ای و محاسبه گرادیان آن. (الف) مستطیل تخریب شده به وسیله نویز لکه‌ای. (ب) محاسبه گرادیان با روش تفاضل [۳۶].

دیگر محدودیت SIFT در تصاویر SAR این است که نویز لکه‌ای و کنترل‌پذیری پایین این الگوریتم در استخراج ویژگی‌ها منجر به ایجاد تعداد زیادی نقطه دور افتاده می‌شود.

۴-۳ محدودیت استفاده از SIFT در تصاویر پزشکی

در تصاویر پزشکی محدودیت‌های الگوریتم SIFT در مرحله استخراج ویژگی عبارتند از:

- عدم توجه به کیفیت و توزیع ویژگی‌ها و کنترل پذیری پایین این الگوریتم که منجر به ایجاد تعداد زیادی ویژگی در مناطق هموار می‌شود.
- در تصاویر پزشکی که تغییرات محتوا بین تصاویر وجود داشته باشد، این الگوریتم نمی‌تواند تعداد کافی نقطه کلیدی (ویژگی) را شناسایی کند.
- در تصاویر چندمودی یا تصاویر رنگی که تغییرات شدت روشنایی غیرخطی بین تصاویر وجود دارد، استفاده از الگوریتم SIFT برای شناسایی ویژگی‌ها مناسب نیست [۱۰۰].

۴-۴ محدودیت استفاده از SIFT در تصاویر طبیعی

مهمترین محدودیت‌های الگوریتم SIFT در مراحل استخراج ویژگی و ایجاد توصیفگر در تصاویر طبیعی، کنترل پذیری پایین در شناسایی ویژگی‌ها و عدم توجه به کیفیت و توزیع ویژگی‌ها است [۸]. علاوه بر این، توصیفگرهای SIFT برای تصاویر بافتی چندان مناسب نمی‌باشد [۳۱].

فضای مقیاس گوسی الگوریتم SIFT شده است. این روش منجر به کاهش اثر نویز لکه‌ای در انطباق تصویر می‌شود، اما در مقابل اجرا الگوریتم زمان بر است. فن و همکاران در سال ۲۰۱۴ روش تبدیل ویژگی مقیاس ثابت مبتنی بر انتشار غیرخطی و تجانس فاز^۱ را برای انطباق تصویر سنجنش‌ازدور SAR پیشنهاد کردند [۹۷]. در این روش از انتشار غیرخطی جهت حفظ جزئیات مهم و ظریف در تصویر و از عملگر نسبت میانگین وزن داده شده نمای برای محاسبه اطلاعات گرادیان و سپس از تجانس فاز برای حذف نقاط پرت استفاده می‌شود. از مزایای این روش، تفاوت اندک اندازه گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف است؛ اما معیار مناسبی برای تعیین جهت گرادیان وجود ندارد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴، روش تبدیل ویژگی مقیاس ثابت گوسی ناهمسانگرد و فقی^۲ را برای انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور SAR پیشنهاد کردند [۱۱۰]. در این روش، از فیلتر گوسی ناهمسانگرد در فضای مقیاس SIFT و تطبیق پایداری جهت‌گیری متعادل به ترتیب برای حفظ لبه‌ها و جزئیات مهم تصویر و حذف تطبیق‌های نادرست استفاده می‌شود. در این روش لبه‌ها در تصویر سنجنش‌ازدور SAR حفظ می‌شوند و در نهایت دقت انطباق تصویر بهبود می‌یابد. اما اندازه گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف، متفاوت است.

۳-۵ اصلاحات برای تصاویر پزشکی

چوینگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ از N-SIFT برای تطبیق تصاویر پزشکی N بعدی استفاده کردند [۱۱۱]. این روش می‌تواند تصاویر چندمعدی با ابعاد متفاوت (برای مثال تصویر پزشکی سه بعدی و چهاربعدی) را تطبیق دهد. قصابی و همکاران در سال ۲۰۱۳ از یک روش مؤثر برای انطباق تصویر شبکه بر اساس ویژگی UR-SIFT و توصیفگر PIIFD استفاده کردند [۱۱۲]. در این روش، نقاط ویژگی با استفاده از الگوریتم UR-SIFT [۹۵] استخراج می‌شوند. سپس از توصیفگر ویژگی شدت روشنایی ثابت جزئی هریس^۳ [۱۱۳] برای توصیف نقاط ویژگی استفاده می‌کند. آنگاه برای هر نقطه تطبیق، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه می‌شود و اگر مقدار آن بزرگتر از عدد شش باشد آن تطبیق حذف می‌شود. همچنین اگر فاصله بین ویژگی تطبیق یافته و نقاط ویژگی در تصویر اول برابر با فاصله‌ی بین ویژگی تطبیق یافته و نقاط ویژگی در تصویر دوم نباشد، تطبیق حذف می‌شود. این دو معیار منجر به حذف تطبیق‌های نادرست می‌شوند. پارامترهای مدل تبدیل با روش حداقل مربعات^۴ [۱۱۴] تخمین زده شده است. حسین نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۸ از الگوریتم SAR-

الگوریتم و بهبود دقت تناظریابی می‌شود اما در این روش تعداد کل تناظرها نسبت به الگوریتم SIFT پایه کاهش می‌یابد. بنی و همکاران [۱۰۵] یک الگوریتم جست‌وجوی مُد مؤثر بر پایه SIFT برای انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی پیشنهاد کردند. در این روش برای حذف نقاط دورافتاده، از جست‌وجوی نسبت به مقیاس، اختلاف چرخشی و شیفت‌های افقی و قائم بین همه‌ی نقاط کلیدی SIFT استفاده می‌شود. صداقت و همکاران [۹۸] توصیفگر AB-SIFT را برای بهبود تطبیق تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی پیشنهاد کردند. در این روش، ابتدا ویژگی‌ها با استفاده از الگوریتم هسین مستوی شناسایی می‌شوند و سپس برای هر نقطه ویژگی، بر اساس روش SIFT یک جهت در نظر گرفته می‌شود و در نهایت از توصیفگر پیشنهادی AB-SIFT برای تطبیق تصاویر استفاده می‌شود. این توصیفگر از نظر دقت و ریشه میانگین مربعات خطا نسبت به توصیفگرهای دیگر مانند GLOH [۲۲] و BRISK [۱۰۶] عملکرد بهتری دارد. لی و همکاران [۱۰۷] و یی و همکاران [۱۰۸] با استفاده از اصلاح جهت گرادیان نقاط کلیدی و معیار محدودیت مقیاس، تعدادی از تطبیق‌های نادرست را حذف کردند که این امر سبب بهبود عملکرد الگوریتم SIFT در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور شد. اگرچه این روش سبب افزایش نرخ تناظرهای درست و دقت انطباق می‌شود، اما پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد. لنگاؤ و همکاران روش خود-وقفی برای بهبود عملکرد SIFT در تصاویر هوایی پیشنهاد کردند [۱۰۷]. در این روش، ضریب بافت محلی برای هر ویژگی محاسبه می‌شود و سپس پنج مقدار آستانه تمایز در بازه (۰/۰۵، ۰/۰۱) در نظر گرفته می‌شود و بر اساس مقدار ضریب بافت محلی، یک مقدار آستانه متمایز برای هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود. برای هر نوع تصویر، تعداد و مقدار آستانه تمایز متفاوت است که از معایب این روش به شمار می‌رود.

۲-۵ اصلاحات برای تصاویر SAR

با هدف بهبود الگوریتم SIFT در تصاویر SAR، دلینگر و همکاران در سال ۲۰۱۵ روش SAR-SIFT را معرفی کردند [۳۶]. این روش از دو مرحله کلی تشکیل شده است: در ابتدا از روش "نسبت" به‌جای روش تفاضل برای محاسبه گرادیان استفاده می‌شود که این سبب می‌شود مقادیر گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف متفاوت نباشد. سپس برای تطبیق تصاویر از یک الگوریتم مشابه الگوریتم SIFT استفاده می‌شود که در آن، برای شناسایی نقاط کلیدی از فضای مقیاس لاپلاس گوسی و برای تعیین جهت و ایجاد توصیفگرها از یک پنجره‌ی مدور استفاده می‌کند. این روش جهت انطباق تصاویر با زاویه متفاوت مناسب نیست. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ روش BFSIFT را برای انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور SAR پیشنهاد کردند [۱۰۹]. در این روش، برای حفظ جزئیات در تصاویر، فضای مقیاس گوسی ناهمسانگرد ایجاد شده با استفاده از یک فیلتر دوطرفه جایگزین

¹ Nonlinear Diffusion Scale Space (NDSS) and Phase Congruency

² Adapted Anisotropic Gaussian SIFT

³ Harris-partial Intensity Invariant Feature Descriptor (PIIFD)

⁴ Least Square Method

عملکرد خوبی دارند. یکی از معایب این الگوریتم، پیچیدگی محاسباتی بالای آن می باشد که سبب شده از آن در هم ترازوی تصاویر با اندازه بزرگ استفاده نشود.

۶ نسخه‌های بهبود یافته الگوریتم SIFT

ارائه یک دسته‌بندی مناسب برای نسخه‌های بهبود یافته الگوریتم SIFT، از یک طرف می‌تواند ذهنیت و دیدگاه افراد مبتدی را به خوبی طبقه بندی کند و از طرف دیگر امکان انتخاب و توسعه الگوریتم‌ها با توجه به نقاط قوت و ضعف آنها را برای محققان فراهم نماید. شکل ۱۱ دسته بندی جدید الگوریتم SIFT براساس نوع تصاویر و بهبودهای انجام شده در هر یک از مراحل را نشان می‌دهد. در این بخش به بررسی چند نسخه بهبود یافته الگوریتم SIFT پرداخته می‌شود.

SIFT برای استخراج ویژگی‌ها و از الگوریتم RANSAC و فقی جهت حذف تطبیق‌های نادرست و بهبود دقت انطباق در تصاویر چند مودال^۱ شبکه استفاده کردند [۱۱۵]. حسین نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۹ از الگوریتم SIFT-RKEM-A^۲ جهت انطباق تصاویر شبکه استفاده کردند [۱۱۶].

۴-۵ اصلاحات برای تصاویر طبیعی

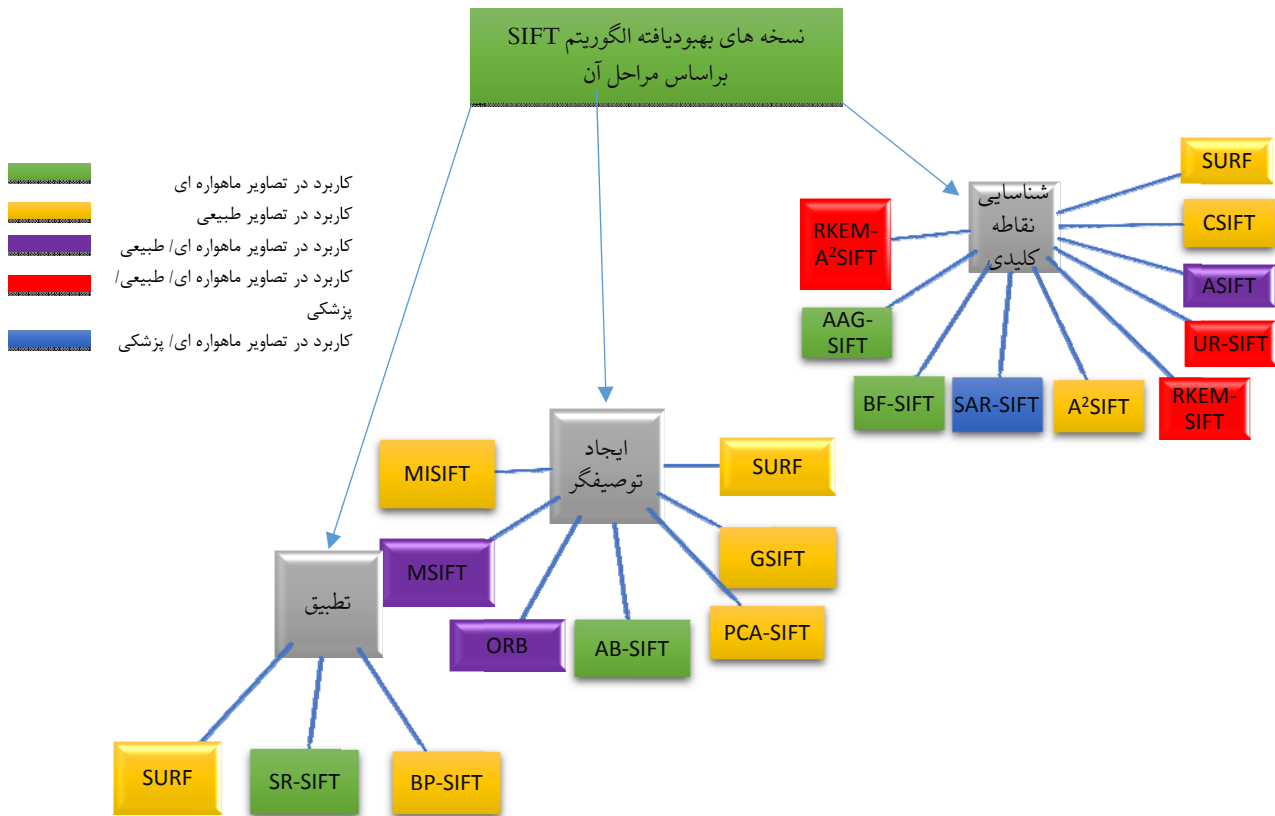
در [۱۱۷] روش SIFT تکرار شونده به منظور کاهش تعداد ویژگی‌های SIFT و همچنین کاهش زمان استخراج و تطبیق میان آنها، برای موقعیت‌یابی ربات‌های موبایل توسعه داده شده است. در این روش، ابتدا تعداد ویژگی‌های مورد نیاز در هر تصویر تعیین شده و با انجام یک استراتژی جستجو (به صورت مقیاس به مقیاس) ویژگی‌های مورد انتظار استخراج می‌شوند. بدین منظور، در ابتدا یک مجموعه از نمونه‌های تصادفی انتخاب شده و از میان آنها، ویژگی‌هایی که حباب هستند حفظ شده و سایرین حذف می‌شوند. در صورتی که ویژگی‌های باقی مانده اکسیرم باشند، به عنوان ویژگی SIFT انتخاب می‌شود. این فرآیند تا زمانی که تعداد ویژگی‌های مورد نظر استخراج شوند، در یک روند تکراری ادامه می‌یابد. اگرچه این روش می‌تواند باعث کاهش تعداد ویژگی‌ها و کنترل الگوریتم استخراج ویژگی SIFT شود، اما نقایصی نیز دارد؛ از جمله اینکه به دلیل تصادفی بودن استخراج نمونه‌های اولیه، فرآیند استخراج ویژگی ممکن است زمان‌بر شود. همچنین توزیع مکانی ویژگی‌ها، در نظر گرفته نشده و ممکن است ویژگی‌ها دارای پراکندگی مناسبی نباشند. لودا و همکاران در سال ۲۰۰۶ روش GSIFT را پیشنهاد کردند که از اطلاعات عمومی جهت توصیف بردار ویژگی‌ها استفاده می‌کند. در این روش علاوه بر اطلاعات محلی از اطلاعات عمومی نیز برای توصیف بردار ویژگی‌ها استفاده می‌شود. ابعاد توصیفگرها در این الگوریتم، ۱۸۸ است [۱۱۸]. حکیم و همکاران در سال ۲۰۰۶ روش CSIFT را پیشنهاد کردند که برای شناسایی ویژگی‌ها از اطلاعات رنگی به جای اطلاعات خاکستری استفاده می‌کند؛ به کمک این روش برخی از اطلاعات رنگی در تصاویر رنگی حذف نمی‌شوند [۱۱۹].

۵-۵ اصلاحات برای عموم تصاویر

حسین نژاد و همکاران [۸] با ارائه روش RKEM-SIFT اسباب حذف نقاط زائد و بهبود فرآیند انطباق تصویر را فراهم کردند. این روش در تصاویر طبیعی و تصاویر سنچس از دور مورد بررسی قرار گرفت. یکی از نقایص این روش این است که مقدار آستانه به صورت تجربی تعیین می‌شود. مورل و همکاران در سال ۲۰۰۹ توصیفگر ASIFT^۲ را پیشنهاد کردند [۱۲۰]. این الگوریتم نسبت به انحراف‌های مستوی کاملاً ثابت است و نسبت به تغییرات زاویه

^۱ Muti-Modal

^۲ Affine-SIFT



شکل ۱۱ دسته‌بندی الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن

۶-۱ الگوریتم A²SIFT

مقدار آستانه کنتراست^۱ در الگوریتم SIFT موثرترین پارامتر در کنترل تعداد ویژگی‌ها می‌باشد. در واقع تغییر مقدار این آستانه، حتی به میزان بسیار اندک، تعداد ویژگی‌های نهایی را به میزان قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این جهت لینگوا روش A²SIFT را پیشنهاد کرد [۱۰۷] که در ادامه به شرح این روش پرداخته می‌شود.

- مرحله اول: ویژگی‌های کاندیدا مطابق SIFT شناسایی می‌شوند.
 - مرحله دوم: برای هر ویژگی کاندیدا، ضریب بافت محلی^۲ از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.
- (۱۱)

$$T_x_coef = \frac{\sum_{i=m-rad}^{i=m+rad} \sum_{j=m-rad}^{j=m+rad} \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{k=i-\frac{(N-2)}{2}}^{k=i+\frac{(N-2)}{2}} \sum_{l=j-\frac{(N-2)}{2}}^{l=j+\frac{(N-2)}{2}} (x_{kl} - \bar{x}_N)^2)}}{4 \cdot rad^2}$$

که در آن، m و N مختصات ویژگی‌ها در تصویر و N برابر γ پیکسل است. همچنین مقدار شدت روشنایی^۳ پیکسل‌ها در فضای مقیاس DOG، میانگین مقدار شدت روشنایی و rad مقدار شعاع^۴ است که مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$rad = 4 \cdot \sigma_0 \cdot 2^{\left(\frac{S_i}{Scale} \right)} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)، S_i مقیاس i امین ویژگی، $Scale$ تعداد تصاویر DOG و σ_0 مقیاس اولیه است.

- مرحله سوم: برای هر ویژگی کاندیدا که ضریب بافت محلی آن، در بازه $[10^{-1}, 10^{-4}]$ است، یک مقدار آستانه کنتراست مناسب در نظر گرفته می‌شود که بازه آستانه کنتراست بین 0.01 تا 0.05 می‌باشد و ویژگی‌هایی که ضریب بافت محلی آنها در این بازه نباشند به عنوان ویژگی نهایی در نظر گرفته نمی‌شوند.
- مرحله چهارم: برای هر ویژگی مطابق با الگوریتم SIFT یک جهت تعیین می‌شود.

³ Intensity

⁴ Rad

¹ Contrast Value

² Local Texture Coefficient

۲-۶ الگوریتم SURF

الگوریتم ویژگی مقاوم سرعت یافته (SURF) یک آشکارساز ویژگی محلی مقاوم است که اولین بار توسط بای و همکارانش در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است [۲۹]. الگوریتم SURF از اندازه‌گیری سریع ماتریس هسیان برای آشکارساز و توصیف گر مبتنی بر توزیع استفاده می‌کند. اگرچه SURF عملکردی مشابه SIFT دارد، اما در یک زمان ثابت، SURF می‌تواند سریع‌تر عمل کند. در ادامه الگوریتم SURF به طور مختصر توضیح داده شده است.

• پیش پردازش: ابتدا تصویر رنگی مطابق رابطه (۱۳) به تصویر خاکستری تبدیل می‌شود.

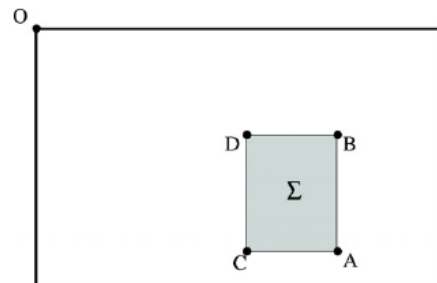
$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (13)$$

• تصویر یکپارچه: در این مرحله تصویر یکپارچه مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$I_{\Sigma}(X) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j) \quad (14)$$

که در آن، I تصویر ورودی و (x, y) مختصات یک نقطه در این تصویر می‌باشد. هنگامی که تصویر یکپارچه $I_{\Sigma}(X)$ تعیین شد، باید چهار حاصلجمع جهت یافتن مجموع شدت‌ها در یک منطقه مستطیلی محدود به رئوس A, B, C, D مطابق شکل ۱۲ و رابطه (۱۵) محاسبه شود.

$$\Sigma = A + D - (C + B) \quad (15)$$



شکل ۱۲ تصویر یکپارچه. با استفاده از تصاویر یکپارچه هزینه محاسباتی برای یک ناحیه مستطیلی تنها چهار جمع می‌باشد [۲۹]

• ماتریس هسیان مبتنی بر نقاط بهره: در این مرحله با داشتن نقطه $X(x, y)^T$ در تصویر I ، ماتریس هسیان $H(X, \sigma)$ به عنوان تابعی از فضا و مقیاس، در نقطه X و مقیاس σ مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

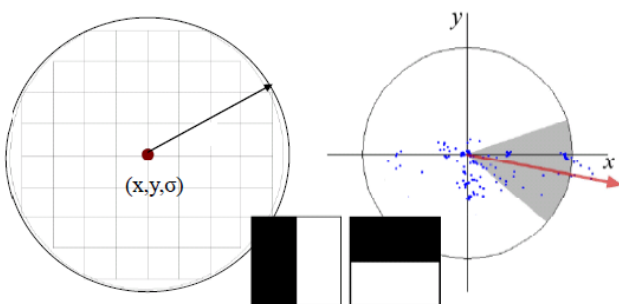
$$H(X, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(X, \sigma) & L_{xy}(X, \sigma) \\ L_{xy}(X, \sigma) & L_{yy}(X, \sigma) \end{bmatrix} \quad (16)$$

که در آن، $L_{xx}(X, \sigma)$ پیچش مشتق مرتبه دوم گوسی $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$ با تصویر I در نقطه x می‌باشد و برای $L_{xy}(X, \sigma)$

$L_{yy}(X, \sigma)$ به صورت مشابه تعریف می‌شود. این مشتقات به عنوان لاپلاس گوسی^۱ شناخته می‌شوند. با این عمل، درمیان هسیان برای هر پیکسل در تصویر محاسبه می‌شود و از این مقادیر برای یافتن نقاط بهره مورد استفاده قرار می‌گیرد.

• نمایش فضای مقیاس: نقاط بهره بایستی در مقیاس‌های مختلف یافت شوند. فضای مقیاس معمولاً به عنوان یک هرم تصویر پیاده‌سازی می‌شود. تصاویر به صورت مکرر با یک فیلتر گوسی هموار می‌شود و به منظور رسیدن به بالاترین سطح هرم، زیر نمونه برداری^۲ می‌شود. سپس لایه‌های این هرم را برای داشتن تصاویر DoG بایستی از هم کم کرد.

• توصیف گر SURF: برای یک تصویر این توصیف گر در دو مرحله استخراج می‌شود. در مرحله اول به منظور دستیابی به ثبات به چرخش تصویر، به هر نقطه بهره شناسایی شده یک جهت‌گیری واگذار می‌شود. جهت‌گیری با استفاده از پاسخ‌های موجک هار در هر دو جهت x و y تعیین می‌شود. این جهت‌گیری بر اساس اطلاعات یک ناحیه مدور با شعاع $6 \times s$ در اطراف نقاط بهره شناسایی شده، محاسبه می‌شود. پارامتر s مقیاس نقاط بهره شناسایی شده است. همچنین مرحله نمونه‌برداری وابسته به مقیاس و انتخاب s می‌باشد. بر این اساس در مقیاس‌های بالا اندازه موجک بزرگ است. بنابراین، بایستی دوباره از تصاویر یکپارچه برای فیلترینگ سریع استفاده کرد. تنها شش عملیات برای محاسبه پاسخ موجک هار در جهت x و y در هر مقیاس نیاز است. طول ضلع موجک $4 \times s$ است. هنگامی که پاسخ‌های موجک هار محاسبه شد، آنها با یک تابع گوسی با $\sigma = 2.5 \times s$ و مرکزیت نقاط بهره، وزن‌دار می‌شوند. در مرحله بعد، جهت‌گیری غالب با جمع پاسخ‌های موجک افقی و عمودی در یک قطعه چرخشی برآورد می‌شود که زاویه $\frac{\pi}{3}$ در فضای پاسخ موجک را پوشش می‌دهد. ماکزیمم نتیجه سپس برای توصیف جهت‌گیری توصیف گر نقاط بهره انتخاب می‌شود.



شکل ۱۳ واگذاری جهت‌گیری به توصیف گر SURF [۱۲۱]

¹Laplacian Of Gaussian (LOG)

²Sub-Sampling

$$RI(p_m) = \frac{1}{SD(p_m)} \quad (20)$$

- گام سوم: یک مقدار آستانه، جهت حذف افزونگی نقاط کلیدی انتخاب می‌شود.
 - گام چهارم: اگر فاصله منتهن نقاط کلیدی با یکدیگر (جز فاصله نقطه کلیدی با خودش) کمتر از آستانه‌ی موردنظر باشد، در این صورت یکی از نقاط کلیدی باید حذف شود. از میان این نقاط، نقطه کلیدی که مقدار شاخص زائد آن بزرگتر از سایرین است، حذف می‌شود.
- الگوریتم RKEM-SIFT در پردازش تصاویر از جمله انطباق تصاویر [۸]، جعل کپی-جابجایی [۱۸] استفاده شده است.

۷ شاخص‌های لازم برای انتخاب شناساگرها

با توجه به اهمیت الگوریتم‌های شناسایی ویژگی‌ها در کاربردهای گوناگون، انتخاب یک شناساگر مناسب در کارایی سیستم نقش انکارناپذیری دارد. در این بخش به بررسی شاخص‌های انتخاب شناساگر پرداخته می‌شود.

۷-۱ صحت

اگرچه الگوریتم‌های متعددی برای استخراج ویژگی‌ها وجود دارد، برخی از آنها از نظر صحت عملکرد مراحل بعدی (از جمله مرحله تطبیق) چندان مناسب نیستند. در بعضی از کاربردها (مانند شناسایی تغییرات در تصاویر شبکه‌ی لازم است از شناساگری مناسب جهت استخراج و شناسایی ویژگی‌ها استفاده شود. شاخص صحت از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (21)$$

در (۲۱)، TP مثبت صحیح و FP مثبت اشتباه می‌باشد.

۷-۲ پایداری

عموماً هر شناساگر که برای استخراج ویژگی‌ها به کار گرفته می‌شود نسبت به یکی از تغییرات هندسی (مانند تغییرات مقیاس، چرخش، زاویه) و تغییرات رادیومتریکی (مانند تغییرات شدت روشنایی) پایدار است. برای انتخاب شناساگر مناسب در هر کاربرد باید به پایداری آن نسبت به تغییرات هندسی و رادیومتریکی توجه شود.

۷-۳ سرعت

شناساگرهای انگشت شماری وجود دارند که هم از نظر سرعت و هم از نظر دقت عملکرد بالایی داشته باشند. عمده این الگوریتم‌ها فقط از جهت دقت یا سرعت عملکرد مناسبی دارند. علاوه بر این، اکثر این الگوریتم‌ها بر روی تصاویر خاص و انحراف‌های خاص پاسخ مطلوب می‌دهند و قابل تعمیم به سایر تصاویر و انحرافات

مرحله دوم، استخراج مؤلفه‌های توصیف‌گر می‌باشد. در این مرحله مناطق به طور منظم به مربع‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و تنها چند ویژگی ساده به طور منظم در نقاط نمونه برای هر زیر ناحیه محاسبه می‌شوند. پاسخ‌های موجک عمودی و افقی در هر زیر ناحیه جمع می‌شوند تا مجموعه اول بردار ویژگی را تشکیل دهند. پس برای این منظور، یک پنجره مربعی با سایز 20×8 در اطراف نقطه بهره در امتداد جهت‌گیری غالب در نظر گرفته می‌شود. پنجره به زیر نواحی منظم 4×4 تقسیم می‌شود. موجک‌های هار با سایز 2×8 برای ۲۵ نقاط نمونه توزیع شده در هر زیر ناحیه محاسبه می‌شود. در نتیجه پاسخ‌های موجک هار با یک تابع گوسی به مرکزیت نقاط بهره وزن‌دار می‌شوند تا مقاوم بودن به تغییرات هندسی را افزایش دهند. هر زیر ناحیه دارای یک بردار توصیف‌گر چهار بعدی V با ساختار (۱۷) می‌باشد.

$$V = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، d_x پاسخ‌های موجک در جهت افقی و d_y پاسخ‌های موجک در جهت عمودی می‌باشد. علاوه بر این مجموع مقادیر قدرمطلق پاسخ‌ها $|d_x|$ و $|d_y|$ بایستی استخراج شود. برای همه زیر ناحیه‌های 4×4 به همین صورت محاسبه می‌شود و یک بردار توصیف‌گر با طول ۶۴ را نتیجه می‌دهد.

الگوریتم SURF در پردازش تصویر از جمله انطباق تصویر [۱۲۲]، موزاییک تصویر [۱۲۳]، جعل کپی-جابجایی [۱۲۴] و در پردازش سیگنال از جمله در تشخیص خطا در بلبرینگ [۱۲۵] جهت شناسایی ویژگی‌ها استفاده شده است.

۶-۳ الگوریتم RKEM-SIFT

در این بخش، گام‌های روش RKEM-SIFT که جهت حذف نقاط کلیدی زائد SIFT و افزایش دقت تطبیق در [۸] پیشنهاد شد، معرفی می‌شود:

- گام اول: نقاط کلیدی در هر تصویر با استفاده از الگوریتم SIFT پایه شناسایی و استخراج می‌شوند.
- گام دوم: فاصله منتهن برای هر نقطه کلیدی با یکدیگر در هر تصویر مطابق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$d_1(p_m(i), p_n(i)) = \sum_{i=1}^l |p_m(i) - p_n(i)| \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، $p_m(i)$ و $p_n(i)$ به ترتیب مختصات i آمین نقاط کلیدی p_m و p_n است. سپس مجموع فواصل بین هر نقطه کلیدی و همه‌ی نقاط کلیدی دیگر در هر تصویر مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

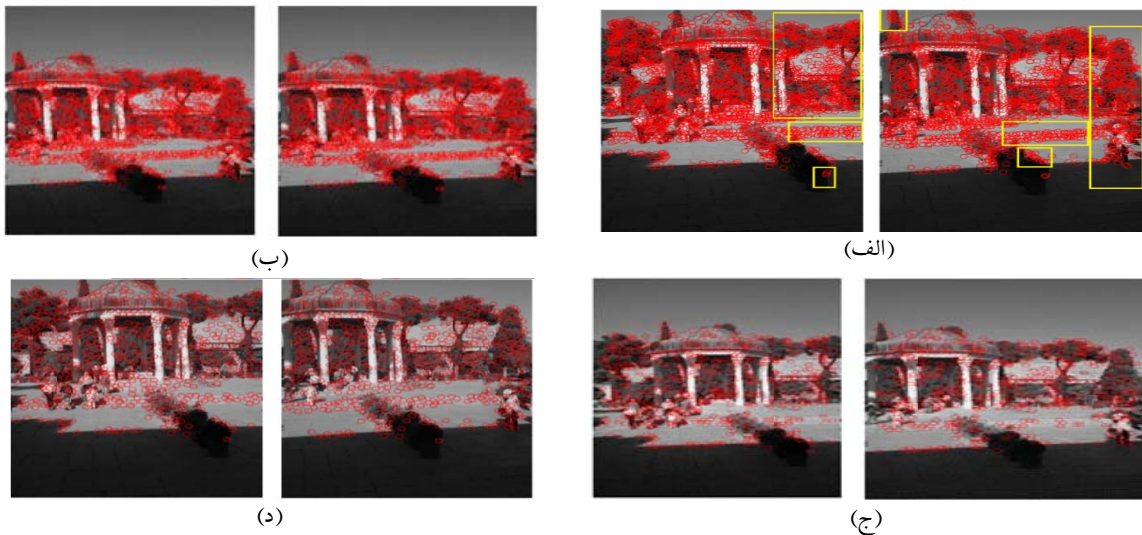
$$SD(p_m) = \sum_{j=1}^N d(p_m, p_j) \quad (19)$$

در این رابطه، N تعداد نقاط کلیدی در تصویر و $d(p_m, p_j)$ فاصله‌ی بین نقطه کلیدی p_m و p_j مطابق رابطه (۱۷) است. شاخص زائد مطابق رابطه (۲۰) تعیین می‌شود.

اول به تغییرات هندسی و رادیومتریکی، در مجموعه دوم به فرآیند تطبیق، در مجموعه سوم به فرآیند انطباق و در مجموعه چهارم به فرآیند موازی یک تصویر پرداخته می‌شود. معیارهای ارزیابی در این آزمایش‌ها شامل نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها، دقت تطبیق، تعداد کل تطبیق‌ها، زمان اجرا و همچنین معیارهای جدید SITMMC، SITMMR [۲۳] و RMSE است. هرچه نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها، دقت تطبیق، تعداد کل تطبیق‌ها و SITMMC بیشتر باشد و هرچه مقدار RMSE، زمان اجرا و SITMMR کمتر باشد، سیستم مناسب‌تر است.

۱-۸ بررسی عملکرد شناسایی ویژگی‌ها در تصاویر با انحراف‌های مختلف در الگوریتم SIFT

در این بخش برای بررسی عملکرد الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن، از تصاویر با زاویه متفاوت استفاده شد که نتایج در شکل ۱۴ و در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۴ نتایج شناسایی ویژگی‌ها در تصاویری با زاویه متفاوت. (الف) الگوریتم SIFT، (ب) الگوریتم SURF، (ج) الگوریتم A²SIFT، (د) الگوریتم RKEM-SIFT

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، از جهت نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها و دقت تطبیق، عملکرد الگوریتم RKEM-SIFT بهتر از الگوریتم‌های SIFT، SURF و A²SIFT می‌باشد اما از جهت زمان اجرا، الگوریتم SURF سریعترین است و سپس به ترتیب الگوریتم‌های A²SIFT، RKEM-SIFT و SIFT قرار می‌گیرند. نتایج ارزیابی و مقایسه‌ها نشان دادند که الگوریتم RKEM-SIFT در برابر اعوجاج‌های هندسی (برای مثال: تغییر مقیاس و تغییر زاویه) نسبت به الگوریتم‌های SURF، SIFT و A²SIFT از نظر دقت تطبیق بهتر عمل می‌کند. با توجه به نتایج مطلوب الگوریتم SURF در ارزیابی‌های موردنظر و سرعت بالا، این تکنیک برای کاربردهای بلادرنگ مناسب است.

نیستند. از این رو، ضروری است در انتخاب شناساگرها به کاربرد مورد استفاده آن، نوع و انحراف تصاویر توجه کرد.

۴-۷ نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها

نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها به صورت نسبت تعداد تطبیق‌های درست به مینیمم تعداد ویژگی‌های شناسایی شده در تصاویر مطابق رابطه (۲۲) تعریف شده است [۱۲۶]. این نرخ یکی از شاخص‌های مهم در انتخاب شناساگرها می‌باشد.

$$F_r = \frac{TM}{\min(N_{ref}, N_{sen})} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، TM تعداد تطبیق‌های درست و N_{ref} و N_{sen} به ترتیب تعداد ویژگی‌های شناسایی شده در تصاویر مرجع و حس شده می‌باشد.

۸ آزمایش‌ها

در این بخش، چهار مجموعه آزمایش انجام شد و الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن مورد بررسی قرار گرفتند. در مجموعه

جدول ۱ ارزیابی عملکرد الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن با معیارهای پایه

معیارها روش‌ها	نرخ تکرار- پذیری ویژگی‌ها (پیکسل)	دقت تطبیق (پیکسل)	زمان استخراج ویژگی‌ها (ثانیه)	زمان تطبیق (ثانیه)	زمان کل (ثانیه)
SIFT	۰/۷۲	۰/۸۰	۱۳/۴۲	۱۳/۲۱	۲۶/۶۳
SURF	۰/۶۷۱	۰/۸۱	۸/۳۷	۱۰/۶۹	۱۹/۰۶
A ² SIFT	۰/۵۲۷	۰/۷۶	۱۰/۵۴	۹/۸۶	۲۰/۴۰
RKEM-SIFT	۰/۸۵۳	۰/۹۳	۱۸/۹۲	۵/۴۲	۲۴/۳۴

۲-۸ بررسی عملکرد تطبیق در نسخه‌های مختلف الگوریتم SIFT

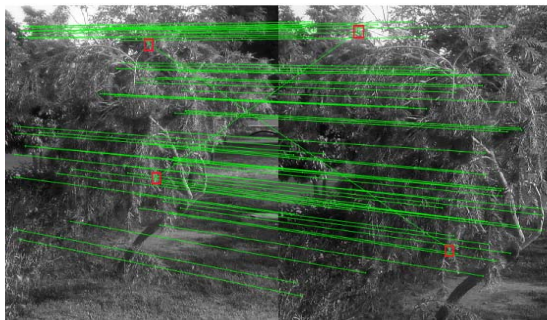
کل تطبیق‌ها به این معیارها اضافه می‌شود، روش RKEM-SIFT عملکرد مناسب‌تری دارد. در بعضی از کاربردها همچون انطباق تصویر علاوه بر دقت تطبیق، تعداد کل تطبیق‌ها بسیار موثر می‌باشد. برای مثال ممکن است یک تطبیق درست لزوماً در کاربرد انطباق تصویر عملکرد خوبی نداشته باشد. این مساله به این دلیل است که در گام بعدی انطباق (انتخاب تبدیل مناسب جهت هم-ترازی تصاویر) نمی‌توان تبدیل مناسبی انتخاب کرد.

جدول ۲ ارزیابی عملکرد الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبودیافته آن با معیارهای پایه و جدید

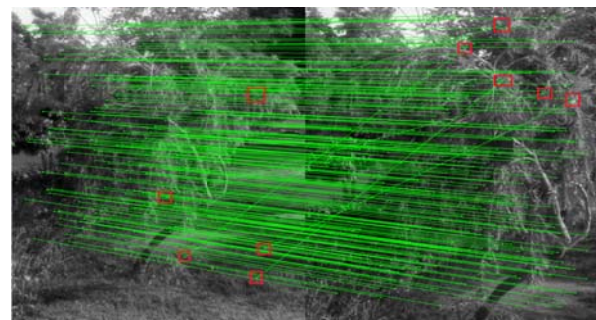
معیارها روش‌ها	SITMMC	SITMMR	تعداد کل تطبیق‌ها	دقت تطبیق (پیکسل)
SIFT	۰/۶۴۲	۰/۳۵۸	۱۵۶	۰/۶۹۲
SURF	۰/۷۸۵	۰/۲۱۵	۸۵	۰/۸۵۴
A ² SIFT	۰/۶۶۷	۰/۳۳۳	۱۱۲	۰/۸۲۵
RKEM-SIFT	۰/۸۲۳	۰/۱۷۷	۱۴۸	۰/۹۸۷

در این بخش، برای بررسی عملکرد تطبیق آزمایشی انجام شد که نتایج در شکل ۱۵ و در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، به علت شباهت توصیفگرها با یکدیگر در الگوریتم SIFT، تعداد زیادی تطبیق‌های نادرست به وجود آمده است. تعداد تطبیق‌های نادرست در الگوریتم‌های SURF، A²SIFT و RKEM-SIFT نسبت به الگوریتم SIFT کلاسیک کمتر است که این نشان دهنده عملکرد بهتر این الگوریتم‌ها نسبت به الگوریتم SIFT کلاسیک در تصاویر است. تعداد تطبیق‌های درست در الگوریتم RKEM-SIFT نسبت به الگوریتم SURF بیشتر می‌باشد.

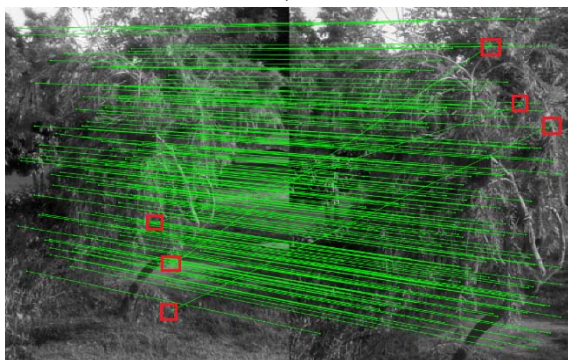
همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از جهت دقت تطبیق، SITMMR و SITMMC ابتدا روش RKEM-SIFT و سپس روش SURF عملکرد بهتری نسبت به SIFT دارند اما هنگامی که تعداد



(ب)



(الف)



(د)



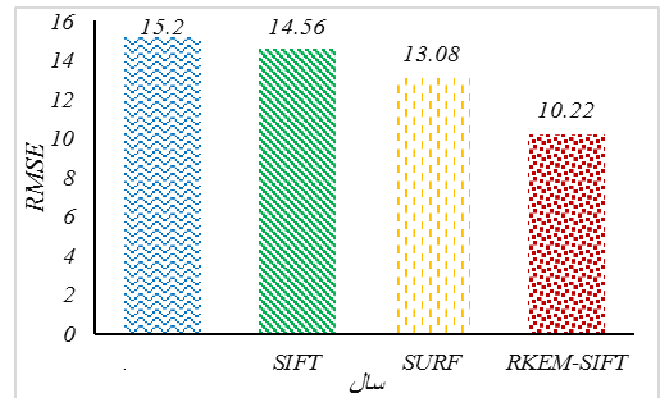
(ج)

شکل ۱۵ نتایج فرآیند تطبیق در تصاویر با تغییرات مقیاس، (الف) الگوریتم SIFT، (ب) الگوریتم SURF، (ج) الگوریتم A²SIFT، (د) الگوریتم RKEM-SIFT

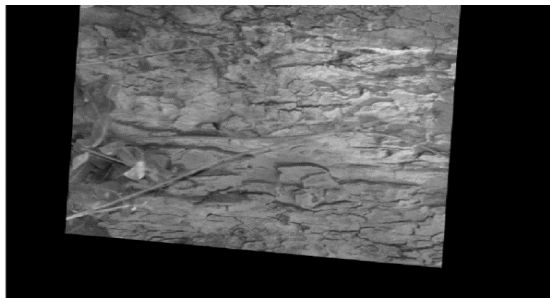
۳-۸ بررسی عملکرد انطباق در نسخه‌های مختلف الگوریتم SIFT

در این بخش، برای بررسی عملکرد انطباق تصویر آزمایشی انجام شد که نتایج در شکل ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بخش مشکی در الگوریتم RKEM-SIFT به ترتیب نسبت به الگوریتم‌های SURF، SIFT و A^2SIFT کمتر است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب این الگوریتم در انطباق تصویر می‌باشد.

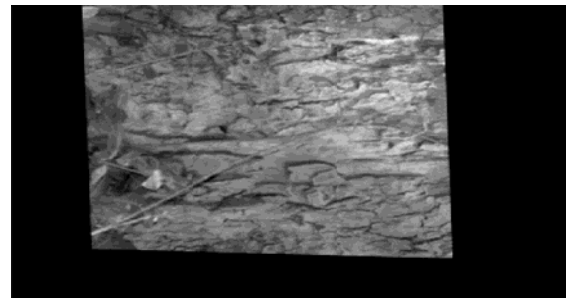
همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود عملکرد انطباق در الگوریتم RKEM-SIFT به دلیل حذف نقاط زائد نسبت به الگوریتم‌های SURF، SIFT و A^2SIFT بهتر است و ریشه میانگین مربعات خطا که نشان‌دهنده دقت هم‌ترازی می‌باشد در الگوریتم RKEM-SIFT مقدار کمتری دارد که این مبین عملکرد بهتر این الگوریتم در انطباق تصویر می‌باشد



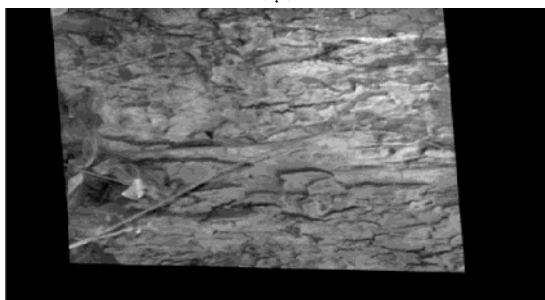
شکل ۱۷ نتایج دقت هم‌ترازی الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن



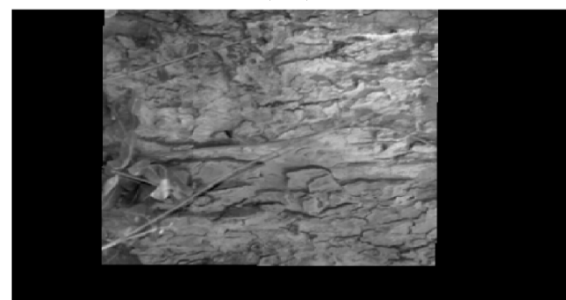
(ب)



(الف)

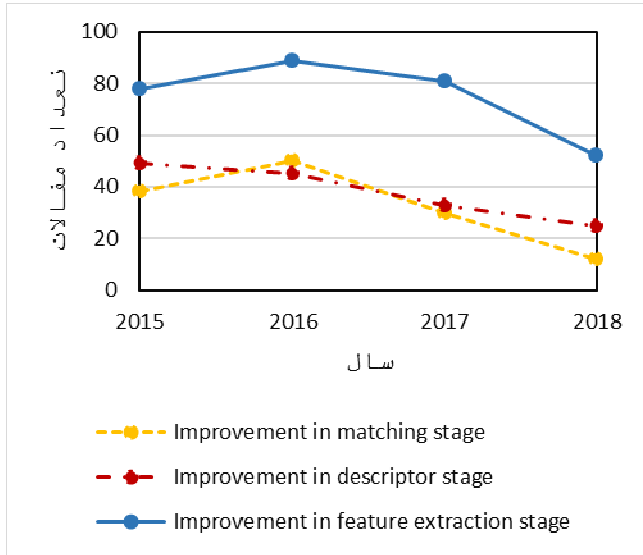


(د)



(ج)

شکل ۱۶ نتایج فرآیند انطباق در تصاویر با تغییرات مقیاس و چرخش متفاوت، (الف) الگوریتم SIFT، (ب) الگوریتم SURF، (ج) الگوریتم A^2SIFT ، (د) الگوریتم RKEM-SIFT



شکل ۲۰ نمودار بهبودهای انجام شده در هر مرحله الگوریتم SIFT برحسب سال

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود در مرحله استخراج ویژگی‌ها در این الگوریتم بهبودهای بیشتری نسبت به مرحله ایجاد توصیفگرها و تطبیق انجام شده است. از طرف دیگر، بهبودهای انجام شده در مرحله استخراج ویژگی‌ها در سالهای آتی رو به کاهش می‌باشد اما این بهبودها در مرحله تطبیق رو به افزایش است که این نشان می‌دهد که در مرحله تطبیق این الگوریتم هنوز محدودیت‌هایی وجود دارد. یکی از زمینه‌های دیگری که می‌تواند مورد توجه پژوهشگران این زمینه قرار گرفته و مبنای تحقیقات بعدی باشد، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مرحله تطبیق این الگوریتم می‌باشد.

۱۰ جمع‌بندی

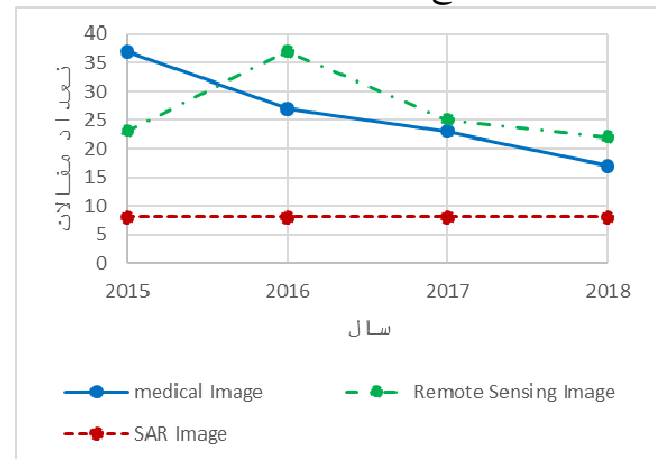
الگوریتم SIFT یکی از الگوریتم‌های بسیار پرکاربرد در بینایی ماشین می‌باشد که مورد توجه محققان متعددی قرار گرفته است. این الگوریتم در بسیاری از کاربردها همچون شناسایی تغییرات، انطباق تصویر، ترکیب تصویر، جعل کپی- جابجایی کاربرد دارد. در این مقاله، ضمن معرفی الگوریتم SIFT، مروری بر اصلاحات انجام شده این الگوریتم بر اساس نوع تصاویر، معرفی چند نسخه بهبود یافته، مروری بر کاربردهای الگوریتم و نسخه‌های بهبود یافته آن و دسته‌بندی جدید بر اساس نوع تصاویر ارائه شد. از ویژگی‌های دیگر این مقاله، مشخص کردن رویکردهای تحقیقات آینده در این زمینه است. مقالات این حوزه نشان می‌دهد که بازشناسی اشیاء و انطباق تصویر بیشترین کاربرد را دارد. از طرف دیگر، این الگوریتم و نسخه‌های بهبود یافته آن در تصاویر سنسجش از دور بیشتر به کار گرفته شده است.

۴-۸ بررسی عملکرد موزایک تصویر در نسخه‌های مختلف الگوریتم SIFT

در این بخش برای بررسی عملکرد موزایک تصویر آزمایشی انجام شد که نتایج در شکل ۱۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، فرآیند موزایک با الگوریتم SIFT، SURF و A^2SIFT به خوبی انجام نشده است بخش‌هایی به رنگ مشکی و بخش‌هایی که با رنگ قرمز مشخص شده است، مواردی می‌باشد که فرآیند ترکیب در آنها به خوبی انجام نشده است اما در الگوریتم RKEM-SIFT فرآیند ترکیب به خوبی انجام شده است.

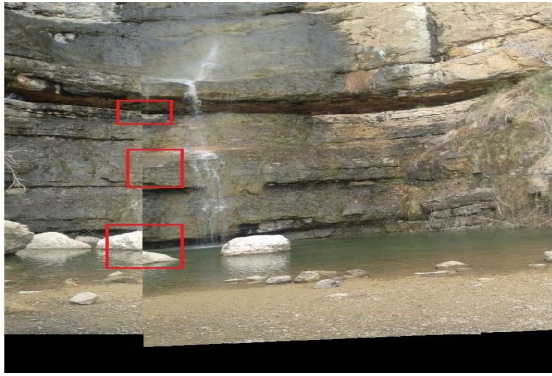
۹ رویکردهای جدید

در کاربردهای مختلف پردازش تصاویر، ماهیت تصاویر نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب ابزار مورد استفاده دارد. بنابراین نمی‌توان یک روش خاص را به عنوان راهکار عمومی برای شناسایی ویژگی‌ها در همه تصاویر پیشنهاد کرد. کاربری الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته آن از دیدگاه تصاویر مورد استفاده در محدوده سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۵ در پایگاه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این بررسی می‌توان نتیجه گرفت که نوع تصاویر در تعیین الگوریتم مناسب بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از الگوریتم SIFT و نسخه‌های بهبود یافته در تصاویر سنسجش از راه دور و پزشکی بیشتر از تصاویر SAR استفاده شده که این نشان می‌دهد که در زمینه تصاویر SAR این الگوریتم نتایج خوبی به دست داده و مرحله استخراج ویژگی‌ها نیازمند بهبود مناسب می‌باشد.



شکل ۱۹ نمودار تعداد مقالات در تصاویر متفاوت برحسب سال

در سال‌های اخیر بهبودهای مختلفی در الگوریتم SIFT انجام شده است که به طور کلی می‌توان آنها را در سه مرحله استخراج ویژگی‌ها، توصیفگر و تطبیق دسته‌بندی کرد. بر این اساس بررسی جهت بهبودهای انجام شده در الگوریتم SIFT در محدوده سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۵ در پایگاه IEEE انجام شد که در شکل ۲۰ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۸ نتایج فرآیند موزاییک در تصاویر با زاویه متفاوت، (الف) الگوریتم SIFT، (ب) الگوریتم SURF، (ج) الگوریتم A^2 SIFT، (د) الگوریتم RKEM-SIFT

- [۷] L. Kabbai, M. Abdellaoui, and A. Douik, "Image classification by combining local and global features," *The Visual Computer*, vol. 35, pp. 679–693, 2019.
- [۸] Z. Hossein-Nejad and M. Nasri, "RKEM: Redundant Keypoint Elimination Method in Image Registration," *IET Image Processing*, vol. 11, pp. 273–284, 2017.
- [۹] Q. Zhang, Y. Wang, and L. Wang, "Registration of images with affine geometric distortion based on maximally stable extremal regions and phase congruency," *Image and Vision Computing*, vol. 36, pp. 23–39, 2015.
- [۱۰] A. Sampath, A. Sivaramakrishnan, K. Narayan, and R. Aarthi, "A study of household object recognition using SIFT-based bag-of-words dictionary and SVMs," in *Proceedings of the International Conference on Soft Computing Systems*, 2016, pp. 573–580.
- [۱۱] S. Routray, A. K. Ray, C. Mishra, and G. Palai, "Efficient hybrid image denoising scheme based on SVM classification," *Optik*, vol. 157, pp. 503–511, 2018.
- [۱۲] P. M. Jain and V. Shandliya, "A review paper on various approaches for image mosaicing," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 3, pp. 106–109, 2013.
- [۱۳] D. Vaghela and P. Naina, "A review of image mosaicing techniques," *arXiv preprint arXiv:1405.2539*, 2014.
- [۱۴] A. Pandey and U. C. Pati, "Panorama Generation Using Feature-Based Mosaicing and Modified Graph-Cut Blending," in *Soft Computing: Theories and Applications*, ed: Springer, 2018, pp. 477–488.

مراجع

- [۱] م. خادمی، د. جعفری، "پردازش تصویر رقمی" مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، صفحه ۱-۸۳۲. ۱۳۸۲
- [۲] J. F. Abascal, S. Si-Mohamed, P. Douek, C. Chappard, and F. Peyrin, "A sparse and prior based method for 3D image denoising," 2019.
- [۳] M. Nasri and H. Nezamabadi-pour, "Image denoising in the wavelet domain using a new adaptive thresholding function," *Neurocomputing*, vol. 72, pp. 1012–1025, 2009.
- [۴] G. Nishimura, "Contrast improvement in indocyanine green fluorescence sensing in thick tissue using a time-gating method," *Biomedical optics express*, vol. 10, pp. 1234–1249, 2019.
- [۵] D. Husarik, H. Alkadhi, G. Puipe, C. Reiner, N. Chuck, F. Morsbach, *et al.*, "Model-based iterative reconstruction for improvement of low-contrast detectability in liver CT at reduced radiation dose :ex-vivo experience," *Clinical radiology*, vol. 70, pp. 366–372, 2015.
- [۶] X. Bian, C. Chen, L. Tian, and Q. Du, "Fusing local and global features for high-resolution scene classification," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, pp. 2889–2901, 2017.

- algorithm," *The Journal of Engineering*, vol. 2018, pp. 1793–1797, 2018.
- [۲۹] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Speeded-up robust features (SURF)," *Computer vision and image understanding*, vol. 110, pp. 346–359, 2008.
- [۳۰] P. Panchal, S. Panchal, and S. Shah, "A comparison of SIFT and SURF," *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, pp. 323–327, 2013.
- [۳۱] M. Urschler, J. Bauer, H. Ditt, and H. Bischof, *SIFT and shape context for feature-based nonlinear registration of thoracic CT images*: Springer, 2006.
- [۳۲] W. Cheung and G. Hamarneh, "N-sift: N-dimensional scale invariant feature transform for matching medical images," in *Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 2007. ISBI 2007. 4th IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 720–723.
- [۳۳] Z. Xiao, L. Yu, Z. Qin, H. Ren, and Z. Geng, "A point matching algorithm for brain CT images based on SIFT and gray feature," in *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, 2016, pp. 1–6.
- [۳۴] H.-H. Chang, G.-L. Wu, and M.-H. Chiang, "Remote Sensing Image Registration Based on Modified SIFT and Feature Slope Grouping," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019.
- [۳۵] M. Gong, S. Zhao, L. Jiao, D. Tian, and S. Wang, "A novel coarse-to-fine scheme for automatic image registration based on SIFT and mutual information," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 4328–4338, 2013.
- [۳۶] F. Dellinger, J. Delon, Y. Gousseau, J. Michel, and F. Tupin, "SAR-SIFT: a SIFT-like algorithm for SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 453–466, 2015.
- [۳۷] Y. Wu, W. Ma, M. Gong, L. Su, and L. Jiao, "A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, pp. 43–47, 2014.
- [۳۸] W. Ma, Z. Wen, Y. Wu, L. Jiao, M. Gong, Y. Zheng, et al., "Remote sensing image registration with modified SIFT and enhanced feature matching," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 14, pp. 3–7, 2016.
- [۳۹] H. Yang, X. Li, L. Zhao, and S. Chen, "A Novel Coarse-to-Fine Scheme for Remote Sensing Image Registration Based on SIFT and Phase Correlation," *Remote Sensing*, vol. 11, p. 1833, 2019.
- [۴۰] S. Chen, X. Li, L. Zhao, and H. Yang, "Medium-low resolution multisource remote sensing image registration based on SIFT and robust regional mutual information," *International journal of remote sensing*, vol. 39, pp. 3215–3242, 2018.
- [۴۱] H. Yang, X. Li, and S. Chen, "A novel image registration method based on geometrical outlier removal," in *Algorithms, Technologies, and Applications for*
- [۱۵] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 91–110, 2004.
- [۱۶] ز. حسین نژاد، م. نصری، "مروری بر روش‌های انطباق تصویر، مفاهیم و کاربردهای آن،" *مجله ماشین بینایی و پردازش تصویر*، صفحه ۳۹–۶۷، ۲۰۱۷
- [۱۷] P. Kang and H. Ma, "An automatic airborne image mosaicing method based on the SIFT feature matching," in *2011 International Conference on Multimedia Technology*, 2011, pp. 155–159.
- [۱۸] Z. H.-N. a. M. Nasri, "Copy-Move Image Forgery Detection Using Redundant Keypoint Elimination Method," in *Cryptographic and Information Security Approaches for Images and Videos*, S. Ramakrishnan, Ed. Boca Raton: CRC Press, pp. 773–797, 2019.
- [۱۹] A. Yilmaz, O. Javed, and M. Shah, "Object tracking: A survey," *Acm computing surveys (CSUR)*, vol. 38, p. 13, ۲۰۰۶.
- [۲۰] L. Juan and L. Gwon, "A comparison of sift, pca-sift and surf," *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 8, pp. 169–176, 2007.
- [۲۱] J. Wu, Z. Cui, V. S. Sheng, P. Zhao, D. Su, and S. Gong, "A Comparative Study of SIFT and its Variants," *Measurement science review*, vol. 13, pp. 122–131, 2013.
- [۲۲] K. Mikolajczyk and C. Schmid, "A performance evaluation of local descriptors," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 27, pp. 1615–1630, 2005.
- [۲۳] Z. Hossein-Nejad and M. Nasri, "An adaptive image registration method based on SIFT features and RANSAC transform," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 62, pp. 524–537, 2017.
- [۲۴] Z. Hossein-nejad and M. Nasri, "Image registration based on SIFT features and adaptive RANSAC transform," in *Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 1087–1091.
- [۲۵] S. Wang, H. You, and K. Fu, "BFSIFT: A novel method to find feature matches for SAR image registration," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 9, pp. 649–653, 2012.
- [۲۶] D. J. MacKay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 399–431, 1999.
- [۲۷] H. Nasir, V. Stankovic, and S. Marshall, "Image registration for super resolution using scale invariant feature transform, belief propagation and random sampling consensus," in *18th European Signal Processing Conference (EUSIPCO-2010) Aalborg, Denmark*, 2010.
- [۲۸] L. Dai, Q. Guan, and H. Liu, "Robust image registration of printed circuit boards using improved SIFT-PSO

- [۵۴] M. Puri and V. Chopra, "A survey: Copy-Move forgery detection methods," *International journal of computer systems*, vol. 3, 2016.
- [۵۵] Y. Fan, Y.-S. Zhu, and Z. Liu, "An improved SIFT-based copy-move forgery detection method using T-linkage and multi-scale analysis," *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, vol. 7, pp. 399-408, 2016.
- [۵۶] R. C. Pandey, S. K. Singh, K. Shukla, and R. Agrawal, "Fast and robust passive copy-move forgery detection using SURF and SIFT image features," in *2014 9th International conference on industrial and information systems (ICIIS)*, 2014, pp. 1-6.
- [۵۷] M. F. Hashmi, V. Anand, and A. G. Keskar, "A copy-move image forgery detection based on speeded up robust feature transform and Wavelet Transforms," in *2014 International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCCT)*, 2014, pp. 147-152.
- [۵۸] I. Amerini, L. Ballan, R. Caldelli, A. Del Bimbo, and G. Serra, "A sift-based forensic method for copy-move attack detection and transformation recovery," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 6, pp. 1099-1110, 2011.
- [۵۹] A. C. Popescu and H. Farid, "Exposing digital forgeries by detecting duplicated image regions," *Dept. Comput. Sci., Dartmouth College, Tech. Rep. TR2004-515*, pp. 1-11, 2004.
- [۶۰] A. J. Fridrich, B. D. Soukal, and A. J. Lukáš, "Detection of copy-move forgery in digital images," in *in Proceedings of Digital Forensic Research Workshop*, 2003.
- [۶۱] C.-C. Chen, W.-Y. Lu, and C.-H. Chou, "Rotational copy-move forgery detection using SIFT and region growing strategies," *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1-16, 2019.
- [۶۲] J. Li, X. Li, B. Yang, and X. Sun, "Segmentation-based image copy-move forgery detection scheme," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 10, pp. 507-518, 2014.
- [۶۳] S. Prasad and B. Ramkumar, "Passive copy-move forgery detection using SIFT, HOG and SURF features," in *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 706-710.
- [۶۴] S. Laaroussi, A. Baataoui, A. Halli, and S. Khalid, "A dynamic mosaicking method based on histogram equalization for an improved seamline," *Procedia Computer Science*, vol. 127, pp. 344-352, 2018.
- [۶۵] T. Koch, X. Zhuo, P. Reinartz, and F. Fraundorfer, "A new paradigm for matching uav-and aerial images," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, vol. 3, pp. 83-90, 2016.
- Multispectral and Hyperspectral Imagery XXV*, 2019, p. 109861N.
- [۴۲] C. Wang, J. Chen, J. Chen, A. Yue, D. He, Q. Huang *et al.*, "Unmanned aerial vehicle oblique image registration using an ASIFT-based matching method," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 12, p. 025002, 2018.
- [۴۳] Q. Zeng, J. Adu, J. Liu, J. Yang, Y. Xu, and M. Gong, "Real-time adaptive visible and infrared image registration based on morphological gradient and C_s SIFT," *Journal of Real-Time Image Processing*, pp. 1-13, 2019.
- [۴۴] X. Yi, B. Wang, Y. Fang, and S. Liu, "Registration of infrared and visible images based on the correlation of the edges," in *2013 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, 2013, pp. 990-994.
- [۴۵] L. Wang, Z. Niu, C. Wu, R. Xie, and H. Huang, "A robust multisource image automatic registration system based on the SIFT descriptor," *International journal of remote sensing*, vol. 33, pp. 3850-3869, 2012.
- [۴۶] X. Guo, J. Yang, and H. Lin, "Image registration method based on improved SIFT algorithm and essential matrix estimation", in *2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 2017, pp. 814-815.
- [۴۷] S. Jiang, U. Jzang, B. Wang, X. Zhu, M. Xiang, F. Xikai, *et al.*, "Registration of SAR and Optical Images by Weighted Sift Based on Phase Congruency," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018, pp. 8885-8888.
- [۴۸] ا. صدقات، ح. عبادی، "ارزیابی عملکرد توصیفگرهای موضعی در تصاویر ماهواره‌ای." *مجله سنجش از دور و GSI ایران*. دوره ۷، صفحه ۶۱-۸۴، ۱۳۹۴.
- [۴۹] V. T. Wang and M. P. Hayes, "Synthetic aperture sonar track registration using SIFT image correspondences," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 42, pp. 901-913, 2017.
- [۵۰] B. Wang, J. Zhang, L. Lu, G. Huang, and Z. Zhao, "A uniform SIFT-like algorithm for SAR image registration," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, pp. 1426-1430, 2015.
- [۵۱] W. Lu, X. Yue, Y. Zhao, and C. Han, "A SAR IMAGE REGISTRATION METHOD BASED ON SIFT ALGORITHM," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, vol. 42, 2017.
- [۵۲] F. Ye, Y. Su, H. Xiao, X. Zhao, and W. Min, "Remote sensing image registration using convolutional neural network features," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, pp. 232-236, 2018.
- [۵۳] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.

- [۸۰] Y. Sakai, T. Oda, M. Ikeda, and L. Barolli, "An object tracking system based on sift and surf feature extraction methods," in *2015 18th International Conference on Network-Based Information Systems*, 2015, pp. 561–565.
- [۸۱] A.-h. Chen, M. Zhu, Y.-h. Wang, and C. Xue, "Mean shift tracking combining SIFT," in *2008 9th International Conference on Signal Processing*, 2008, pp. 1532–1535.
- [۸۲] J. Dai-Hong, D. Lei, L. Dan, and Z. San-You, "Moving-Object Tracking Algorithm Based on PCA-SIFT and Optimization for Underground Coal Mines," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35556–35563, 2019.
- [۸۳] S.-W. Ha and Y.-H. Moon, "Multiple object tracking using SIFT features and location matching," *International Journal of Smart Home*, vol. 5, pp. 17–26, 2011.
- [۸۴] Q. Zhang, T. Rui, H. Fang, and J. Zhang, "Particle filter object tracking based on Harris-SIFT feature matching," *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 924–929, 2012.
- [۸۵] X. Xiao, J. Wang, Q. Shen, and Y. Wang, "An Improved CamShift Algorithm Based on FAST-SIFT Feature Detection Matching," in *2018 IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP)*, 2018, pp. 64–68.
- [۸۶] Y. Wang, X. Luo, L. Ding, and J. Wu, "Object tracking via dense SIFT features and low-rank representation," *Soft Computing*, vol. 23, pp. 10173–10186, 2019.
- [۸۷] K. Zhang and H. Song, "Real-time visual tracking via online weighted multiple instance learning," *Pattern Recognition*, vol. 46, pp. 397–411, 2013.
- [۸۸] T. Zhang, B. Ghanem, S. Liu, and N. Ahuja, "Robust visual tracking via multi-task sparse learning," in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 2042–2049.
- [۸۹] Z. Xiao, H. Lu, and D. Wang, "L2-RLS-based object tracking," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 24, pp. 1301–1309, 2013.
- [۹۰] P. Deekshitha, B. T. Reddy, S. Badadha, K. Dhruthi, and S. Pandiaraj, "Object Motion Perception and Tracking Using Sift With K-Means Clustering," *Journal of Network Communications and Emerging Technologies (JNCET)* www.jncet.org, vol. 8, 2018.
- [۹۱] C. Yang, L. Wanyu, Z. Yanli, and L. Hong, "The research of video tracking based on improved SIFT algorithm," in *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, pp. 1703–1707.
- [۹۲] D. I. H. Putri and C. Machbub, "Object detection and tracking using SIFT-KNN classifier and Yaw-Pitch servo motor control on humanoid robot," in *2018 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, 2018, pp. 47–52.
- [۹۳] R. Jin and J. Kim, "Tracking feature extraction techniques with improved SIFT for video identification," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 76, pp. 5927–5936, 2017.
- [۶۶] P. M. Jain and V. K. Shandliya, "A review paper on various approaches for image mosaicing," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 3, pp. 106–109, 2013.
- [۶۷] M. Brown and D. G. Lowe, "Automatic panoramic image stitching using invariant features," *International journal of computer vision*, vol. 74, pp. 59–73, 2007.
- [۶۸] Z.-L. Yang and B.-L. Guo, "Image mosaic based on SIFT," in *2008 International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2008, pp. 1422–1425.
- [۶۹] J. He, Y.-s. Li, H. Lu, and Z.-m. Ren, "Research of UAV aerial image mosaic based on SIFT," *Opto-electronic engineering*, vol. 2, 2011.
- [۷۰] Y. Wang, J. Shen, W. Liao, and L. Zhou, "Automatic fundus images mosaic based on SIFT feature," in *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*, 2010, pp. 2747–2751.
- [۷۱] C. Gao, X. Zhang, Y.-L. Wang, and H. Wang, "Automatic stitching approach of aerial image sequence based on SIFT features," *Jisuanji Yingyong/ Journal of Computer Applications*, vol. 27, pp. 2789–2792, 2007.
- [۷۲] L.-n. Li and N. Geng, "Algorithm for sequence image automatic mosaic based on SIFT feature," in *2010 WASE International Conference on Information Engineering*, 2010, pp. 203–206.
- [۷۳] M. Liu and D. Wen, "Automatic seamless image mosaic method based on SIFT features," in *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, 2017, p. 1025636.
- [۷۴] A. Laraqui, A. Saaidi, and K. Satori, "MSIP: Multi-scale image pre-processing method applied in image mosaic," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, pp. 7517–7537, 2018.
- [۷۵] Y. Murali and V. Mahesh, "Image mosaic using speeded up robust feature detection," *Image*, vol. 1, 2012.
- [۷۶] G. Venugopala, G. Padmajadevi, and M. Tech, "Image stitching using speeded up robust features," *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 3, pp. 3514–3519, 2015.
- [۷۷] Z. Yang, D. Shen, and P.-T. Yap, "Image mosaicking using SURF features of line segments," *PloS one*, vol. 12, p. e0173627, 2017.
- [۷۸] S. Chen, Y. Lu, Q. Gao, D. Sun, Y. Xia, and X. Peng, "Image mosaic based on SIFT and morphological component analysis," in *2017 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, 2017, pp. 1–6.
- [۷۹] B. Baheti, U. Baid, and S. Talbar, "An approach to automatic object tracking system by combination of SIFT and RANSAC with mean shift and KLT," in *2016 Conference on Advances in Signal Processing (CASP)*, 2016, pp. 254–259.

- [۱۰۷] A. Lingua, D. Marenchino, and F. Nex, "Performance analysis of the SIFT operator for automatic feature extraction and matching in photogrammetric applications," *Sensors*, vol. 9, pp. 3745–3766, 2009.
- [۱۰۸] Z. Yi, C. Zhiguo, and X. Yang, "Multi-spectral remote image registration based on SIFT," *Electronics Letters*, vol. 44, pp. 107–108, 2008.
- [۱۰۹] S. Wang, H. You, and K. Fu, "BFSIFT: A novel method to find feature matches for SAR image registration," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, pp. 649–653, 2012.
- [۱۱۰] F. Wang, H. You, and X. Fu, "Adapted anisotropic Gaussian SIFT matching strategy for SAR registration," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, pp. 160–164, 2014.
- [۱۱۱] W. Cheung and G. Hamarneh, "N-sift: N-dimensional scale invariant feature transform for matching medical images," in *2007 4th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*, 2007, pp. 720–723.
- [۱۱۲] Z. Ghassabi, J. Shanbehzadeh, A. Sedaghat, and E. Fatemizadeh, "An efficient approach for robust multimodal retinal image registration based on UR-SIFT features and PIIFD descriptors," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2013, p. 25, 2013.
- [۱۱۳] J. Chen, J. Tian, N. Lee, J. Zheng, R. T. Smith, and A. F. Laine, "A partial intensity invariant feature descriptor for multimodal retinal image registration," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 57, pp. 1707–1718, 2010.
- [۱۱۴] C. V. Stewart, "Robust parameter estimation in computer vision," *SIAM review*, vol. 41, pp. 513–537, 1999.
- [۱۱۵] Z. H.-N. a. M. Nasri, "A-RANSAC: Adaptive random sample consensus method in multimodal retinal image registration," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 45, pp. 325–338, 2018.
- [۱۱۶] Zahra Hossein-Nejad, M. Nasri, , and "Retianl Image Registration based on Auto-Adaptive SIFT and Redundant Keypoint Elimination Method," *27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2019)*, 2019.
- [۱۱۷] H. Tamimi, H. Andreasson, A. Treptow, T. Duckett, and A. Zell, "Localization of mobile robots with omnidirectional vision using particle filter and iterative sift," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 758–765, 2006.
- [۱۱۸] S. K. Lodha and Y. Xiao, "GSIFT: geometric scale invariant feature transform for terrain data," in *Vision Geometry XIV*, 2006, p. 60660L.
- [۱۱۹] A. E. Abdel-Hakim and A. A. Farag, "CSIFT: A SIFT descriptor with color invariant characteristics," in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer*
- [۹۴] Z. Zhuang, Z. Guo, and Y. Yuang, "Research on video target tracking technology based on improved SIFT algorithm," in *Seventh International Conference on Electronics and Information Engineering*, 2017, p. 1032210.
- [۹۵] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, and H. Ebadi, "Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 4516–4527, 2011.
- [۹۶] Q. Zhu, B. Wu, N. Wan, Z.-X. Xu, and Y.-X. Tian, "An interest point detect method to stereo images with good repeatability and information content," *Dianzi Xuebao(Acta Electronica Sinica)*, vol. 34, pp. 205–209, 2006.
- [۹۷] J. Fan, Y. Wu, F. Wang, Q. Zhang, G. Liao, and M. Li, "SAR image registration using phase congruency and nonlinear diffusion-based SIFT," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, pp. 562–566, 2014.
- [۹۸] A. Sedaghat and H. Ebadi, "Remote sensing image matching based on adaptive binning SIFT descriptor," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 53, pp. 528.۲۰۱۵, ۵۲۹۳–۳
- [۹۹] S. Paul and U. C. Pati, "SAR Image Registration Using an Improved SAR-SIFT Algorithm and Delaunay-Triangulation-Based Local Matching," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, pp. 2958–2.۲۰۱۹, ۹۶۶
- [۱۰۰] C.-L. Tsai, C.-Y. Li, and G. Yang, "The edge-driven dual-bootstrap iterative closest point algorithm for multimodal retinal image registration," in *Medical Imaging 2008: Computer-Aided Diagnosis*, 2008, p. 691533.
- [۱۰۱] R. Song and J. Szymanski, "Well-distributed SIFT features," *Electronics letters*, vol. 45, pp. 308–310, 2009.
- [۱۰۲] ز.حسین‌نژاد، م. نصری، "روشی جدید در تناظرابی مبتنی بر روابط فضایی در تصاویر چندسنجده سنجش از دوری،" *سنجش از دور و GIS* ایران، صفحه ۷۳–۹۴، ۱۳۹۶.
- [۱۰۳] P. Moreno, A. Bernardino, and J. Santos-Victor, "Improving the SIFT descriptor with smooth derivative filters," *Pattern Recognition Letters*, vol. 30, pp. 18–26, 2009.
- [۱۰۴] X. Wang and W. Fu, "Optimized SIFT image matching algorithm," in *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008, pp. 843–847.
- [۱۰۵] B. Kupfer, N. S. Netanyahu, and I. Shimshoni, "An efficient SIFT-based mode-seeking algorithm for sub-pixel registration of remotely sensed images," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12, pp. 379–383, 2014.
- [۱۰۶] S. Leutenegger, M. Chli, and R. Siegwart, "BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints," in *2011 IEEE international conference on computer vision (ICCV)*, 2011, pp. 2548–2555.



زهرا حسین‌نژاد مدرک کارشناسی را از دانشگاه آزاد اسلامی جهرم در رشته برق-مخابرات، کارشناسی ارشد و دکتری را در رشته مهندسی برق-مخابرات، گرایش سیستم به ترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی سیرجان و دانشگاه شیراز اخذ کرد. زمینه پژوهشی اصلی مورد علاقه نامبرده پردازش تصویر است.



آذر محمودزاده مدرک کارشناسی را از دانشگاه شیراز در رشته مهندسی برق-مخابرات، کارشناسی ارشد و دکتری را در رشته مهندسی برق-مخابرات به ترتیب از دانشگاه‌های شاهد و یزد اخذ کرد. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز است.

زمینه‌های پژوهشی اصلی مورد علاقه نامبرده پردازش تصویر، شبکه عصبی و بازشناسی آماری الگو است.



حامد آگاهی مدرک کارشناسی را از دانشگاه شیراز در رشته مهندسی برق-قدرت، کارشناسی ارشد و دکتری را در رشته مهندسی برق-کنترل به ترتیب از دانشگاه‌های امیرکبیر و تهران اخذ کرد. ایشان در حال حاضر استادیار گروه مهندسی برق در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز است.

زمینه‌های پژوهشی اصلی مورد علاقه نامبرده پردازش تصویر، شبکه عصبی و بازشناسی آماری الگو است.

Vision and Pattern Recognition (CVPR'06), 2006, pp. 1978-1983.

[۱۲۰] J.-M. Morel and G. Yu, "ASIFT :A new framework for fully affine invariant image comparison," *SIAM journal on imaging sciences*, vol. 2, pp. 438-469, 2009.

[۱۲۱] R. Bouchiha and K. Besbes, "Automatic remote-sensing image registration using SURF," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 5, pp. 88-92, 2013.

[۱۲۲] A. Sedaghat and N. Mohammadi, "High-resolution image registration based on improved SURF detector and localized GTM," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2576-2601, 2019.

[۱۲۳] R. Monali, S. Moonka, A. Priya, and S. S. Tripathy, "Effects of noise and relative overlap on image mosaicing using SURF features," in *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 773.۷۷۷-

[۱۲۴] M. F. Hashmi and A. G. Keskar, "Fast and robust copy-move forgery detection using wavelet transforms and SURF," *Int. Arab J. Inf. Technol.*, vol. 16, pp. 304-311, 2019.

[۱۲۵] Y. Cheng, B. Zhou, C. Lu, and C. Yang, "Fault diagnosis for rolling bearings under variable conditions based on visual cognition," *Materials*, vol. 10, p. 582, 2017.

[۱۲۶] C. Schmid, R. Mohr, and C. Bauckhage, "Evaluation of interest point detectors," *International Journal of computer vision*, vol. 37, pp. 151-172, 2000.