

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 16/ No. 63/ Autumn 2025 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://sanad.iau.ir/journal/jipet/

Doi: 10.71666/jipet.2025.998047

Research Article

Matching of Remote Sensing Images Using Improved SURF Detector and Direction-Invariant BRISK Descriptor in the Simulator Environment of Affine Transform Functions

Fatemeh Khalili¹, Ph.D. Student, Farbod Razzazi¹, Associate Professor, Sayed Abolfazl Hossini², Assistant Professor

¹Department of Mechanical, Electrical, and Computer Engineering- Science and Research Branch, Islamic Azad

University, Tehran, Iran

²Department of Electrical Engineering- Research Center for Developing Advanced Technologies of Electrical and Electronics Industry, Yadegar-e-Imam Khomeini Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran fatemeh.khalili@srbiau.ac.ir, razazzi@srbiau.ac.ir, abolfazl.hosseini@modares.ac.ir

Abstract

Remote sensing images are often captured by a variety of sensors at different times and with various deviation angles. This makes the matching procedure of image pairs be a challenge. To solve this problem, some algorithms have been proposed to improve this matching. One of the most popular methods is SURF (Speedup robust features) algorithm, which is somewhat resistant to scale changes, rotation of images, brightness variation, and noise. In addition, the algorithm is suitable for the image deviation angles up to 45 degrees. However, the overlap and proximity of the extracted key points in this algorithm are high and it does not provide a suitable spatial distribution for the key points. This study is looking for a method that is resistant to the changes of affine transformation parameters. We use an IMAS (Image matching by affine simulation) simulator environment, which offers a suitable distribution of key points and can be considered as a solution to more angle differences than SURF. A morphology filter is used to find the boundaries and the edges with more clarity in the images. To reveal the key points, the images centers of mass are employed, which address the main direction of feature points and describe the invariable rotation. In addition, RBRISK (Rotation invariant binary robust invariant scalable key point) descriptor is employed in the algorithm which is temporally stable. The results of the experiments show that the proposed method improved the matching rate in satellite images by about 10% with suitable computational complexity.

Keywords: Image descriptor, binary robust invariant scalable key point (BRISK), matching, remote sensing images, speedup robust features (SURF), morphology filter.

Received: 26 April 2023 Revised: 27 June 2023 Accepted: 23 August 2023

Corresponding Author: Dr. Farbod Razzazi

Citation: F. Khalili, F. Razzazi, S.A. Hossini, "Matching of remote sensing images using improved SURF detector and direction-invariant BRISK descriptor in the simulator environment of affine transform functions", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 63, pp. 171-190, September 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2025.998047

مقاله پژوهشی

تطبیق تصاویر سنجش از دور با استفاده از آشکارساز SURF بهبود یافته و توصیفگر BRISK نامتغیر با جهت در محیط شبیهساز توابع تبدیل مستوی

فاطمه خلیلی'، دانشجوی دکتری، فربد رزازی'، دانشیار، سید ابوالفضل حسینی'، استادیار

۱ – دانشکده مهندسی مکانیک، برق و کامپیوتر – واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ۲- گروه مهندسی برق- مرکز تحقیقات و توسعه فناوریهای پیشرفته صنعت برق و الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

fatemeh.khalili@srbiau.ac.ir, razazzi@srbiau.ac.ir, abolfazl.hosseini@modares.ac.ir

چکیده: از جمله مشکلات موجود در انطباق تصاویر سنجش از دور این است که تصاویر توسط سنسورهای متنوع و در زمانهای مختلف و با زاویههای انحراف متنوع گرفته شدهاند. برای حل این مشکل الگوریتمهایی برای بهبود انطباق پیشنهاد شدهاند. یکی از متداولترین روشها، استفاده از الگوریتم SURF (ویژگیهای مقاوم سریع) است که نسبت به تغییر مقیاس، چرخش، تغییر روشنایی و نویز تا حدودی مقاوم و به زاویه انحراف تصاویر تا حدود ۴۵ درجه پاسخگو است. اما روی همافتادگی و نزدیکی نقاط کلیدی استخراج شده در این الگوریتم زیاد است و عملاً توزیع پذیری مکانی مناسبی از نقاط کلیدی را رائه مییدهد. این پژوهش به دنبال روشهایی است که نسبت به پارامترهای تابع تبدیل آفین مقاوم باشد. در مقاله حاضر از محیط شبیدساز IMAS (انطباق تصویر با شبیهساز توابع تبدیل مستوی) که توزیع پذیری مناسبی از نقاط کلیدی را ارائه اختلاف زاویه بیشتری نسبت به SURF پاسخ گوست، استفاده شده است. برای یافتن مرزها و لبههایی با وضوح بیشتر در تصویر ویژگی را مشخص و چرخشهای تغییر ناپذیر را توصیف میکند. در بخش توصیفگر از توصیفگر از قاط کلیدی ویژگی را مشخص و چرخشهای تغییر ناپذیر را توصیف میکند. در بخش توصیفگر از توصیفگر مهادی با وضوح بیشتر در تصویر ویژگی را مشخص و چرخشهای تغییر ناپذیر را توصیف میکند. در بخش توصیفگر از توصیفگر مده است که جهت اصلی نقاط آزمایشها نشان دهنده آن است که روش پیشنهادی در تصاویر ماهواره میزان انطباق را تا حدود ۱۰ درصد بهبود بخشیده و از سرعت اجرای مناسبی در کاربردهای آنلاین برخوردار است.

كلمات كليدى: الگوريتم SURF، انطباق تصاوير، تصاوير سنجش ازدور، توصيف گر BRISK، فيلتر مورفولوژى.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۲/۶ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۴/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۶/۱

نام نویسندهی مسئول: دکتر فربد رزازی **نشانی نویسندهی مسئول:** تهران- انتهای بزرگراه ستاری- میدان دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۱– مقدمه

سنجش از دور٬، روشی برای استخراج اطلاعات اشیاء موجود در سطح زمین بر اساس میزان بازتاب دریافتی (در باندهای مختلف طیف الکترومغناطیس) توسط سنجندههای^۲ مستقر بر روی ماهوارهها، (هواپیما و پهبادها) است. کاربردهای تصاویر سنجش از دور در صنایع غذایی و کشاورزی، اکتشاف منابع معدنی، بررسی مخاطرات و سوانح طبیعی، پزشکی و صنایع دفاعی است [۳-۱]. انطباق تصویر یکی از زمینههای پرکاربرد در پردازش تصاویر سنجش از دور محسوب می شود. هدف از این انطباق، پیداکردن تبدیلی هندسی بین دو یا چند تصویر در شرایط مختلف آب و هوایی، اختلاف زاویه دید و زمانهای مختلف تصویر برداری از یک صحنه است. در حالت ایدهآل باید تناظری یکتا بین یک نقطه از یک تصویر و نقطهای دیگر از تصویر دوم را به نحوی پیدا نمود که هر دو نشان دهنده یک نقطه از یک صحنه باشد [۴]. کاربرد انطباق تصویر در شناسایی تغییرات بین تصاویر در مرجع [۵]، ترکیب و تشخیص اشیاء تصویر در مرجع [۶]، موزاییکیکردن و دوختن تصاویر و ساختن تصاویر پانورما^۳ (سراسر نما) در مرجع [۷] هستند. روشهای انطباق شامل مراحل شناسایی و توصیف ویژگی و تطبیق میان ویژگیهاست. شناسایی ویژگی خود به دو دسته مبتنی بر ناحیه و مبتنی بر ویژگی تقسیم میشود. روشهای مبتنی بر ناحیه زمانی بهکار می روند که تصویر، جزئیات مهم زیادی ندارد. در این روش ها، اطلاعات متمایز به وسیله تفاوت شدت روشنایی مشخص می شوند. این روش نیاز به فضای جستجو و مقدار اولیه مناسب دارد و در تصاویر با بافت ضعیف به کار برده می شود [۴]. در روشهای مبتنی بر ویژگی، ویژگیهای تصویر شناسایی میشود و سپس تطبیق میان این ویژگیها صورت میگیرد. از این روش زمانی می توان استفاده کرد که اطلاعات ساختار محلی از شدت روشنایی مهم تر است. این روشها نسبت به انحرافات تصویر پایدار است. یک ویژگی مناسب برای تطبیق آن است که نسبت به همسایگیهای مجاور خود متمایز و در برابر اعوجاجهای هندسی، رادیومتریک و نویز پایدار باشد. ویژگیهای مورد استفاده بستگی به نوع تصویر دارند، اما بهصورت کلی شامل ویژگیهای نقطهای، خطی و ویژگی بر مبنای ناحیه میشوند. روشهای SUSAN (کوچکترین هسته با مقدار ثابت جذب کننده بخش^۴) مبنی بر استخراج ویژگی بر اساس شدت روشنایی پیکسلها، FAST (ویژگیهای حاصل از تست تسریع شده قطعه ۵) مبنیبر استخراج گوشه با سرعت بالا و روشهای مبتنی بر لبه کنی از جمله روشهای مبتنی بر ویژگی و از نوع ویژگیهای نقطهای است، نقاط ویژگی استخراجی نسبت به تغییرات مقیاس، دوران، زاویه، تبدیل أفین ً و تغییرات روشنایی پایداری ندارند [۸].

الگوریتم SIFT (تبدیل ویژگیهای نامتغیر با مقیاس^۲) در سال ۲۰۰۴ توسط دیوید لاو معرفی شد. این الگوریتم و نمونههای بهبود یافته آن از معروفترین نمونههای ویژگیهای محلی هستند و بهعنوان یک شناساگر مقاوم نسبت به تغییرات مقیاس، چرخش، نویز و شدت روشنایی شناخته میشود [۹]. استخراج نقاط کلیدی در الگوریتم SIFT شامل تشخیص اکسترمم فضای مقیاس، تعیین فضای نقاط کلیدی و تخصیص جهت است. در مرحله اول، برای محاسبهی فضای مقیاس از کانولوشن تصویر در فيلتر گوسي استفاده و رابطه DOG (تفاضل گوسي^) كه از تفاضل دو سطح متوالي در فضاي مقياس بهدست آمده است، بهكار برده شده است. پس از تولید هر خروجی در فضای مقیاس، تصویر گوسی که مقیاس آن دو برابر تصویر اولیه است، انتخاب می شود و با نمونه برداری مجدد ابعاد آن نصف شده، به عنوان تصویر ابتدایی اکتاو ۹ بعدی در نظر گرفته می شود. پس از محاسبه DOG در لایههای میانی هر پیکسل در هر لایه با ۸ پیکسل همسایگی خودش و ۹ پیکسل از لایههای بالایی و ۹ پیکسل از لایههای پایینی مقایسه شده است. به این ترتیب هر پیکسل با ۲۶ پیکسل در همسایگی موجود در مکان و مقیاس، مقایسه میشود و هر کدام که بهصورت اکسترمم کمترین و بیشترین باشد، ذخیره میشود. مرحلهی بعدی انتخاب نقاط کلیدی است. در این مرحله به هر نقطه اکسترمم انتخاب شده یک تابع درجه دوم سه بعدی برازش شده است. با استفاده از آن مکان دقیق اکسترمم درونیابی میشود که باعث پایداری و تطبیق پذیری شده است. نقاطی که روی گوشه و لبهها با انحنای زیاد باشند، نگه داشته می شود. برای یافتن این نقاط و حذف لبه هایی با انحنای کم از ماتریس هسین استفاده می شود. در مرحله سوم برای هر كدام از نقاط كليدي جهتي مشخص مي شود تا نقاط نسبت به چرخش مقاوم باشند [١٠]. در مرحله استخراج نقاط كليدي، الگوریتم SIFT تعداد زیادی نقاط کلیدی نامطلوب را استخراج و زمان زیادی برای ایجاد بردار توصیف گر صرف می کند که از مشکلات روش SIFT به شمار میرود و برای حل این مشکل، در مرحله استخراج نقاط کلیدی و توصیف گر، روش های بهبود

یافته SIFT و توصیف گرهای باینری پیشنهاد شدهاند. الگوریتم SURF (ویژگیهای مقاوم سریع ۲۰) در مرجع [۱۱] به منظور استخراج نقاط کلیدی در سال ۲۰۰۶ معرفی و از فیلتر جعبهای برای استخراج نقاط کلیدی استفاده شده است. در این الگوریتم، تعداد نقاط کلیدی استخراجی و سرعت عملکرد از SIFT بیشتر است. در مرجع [۱۲] روش URSIFT (ویژگیهای یکنواخت نامتغیر با مقیاس^{۱۱}) پیشنهاد شد که در این الگوریتم ویژگیهای استخراج شده از نظر توزیع مکانی و مقیاس یکنواخت هستند. در مرجع [۱۳] از روش BFSIFT (فیلتر دو طرفه تبدیل ویژگیهای نامتغیر با مقیاس^{۲۱}) که از فیلتر ناهمسانگر گوسی در روش SIFT و در انطباق تصویر SAR (رادار دیافراگم مصنوعی^{۳۱}) استفاده شده است. در روش اخیر به جای استفاده از فیلتر گوسی از فیلتر ناهمسانگر استفاده شده که جزئیات و لبهها و مرزهای تصویر را واضحتر نشان و اثر نویز را کاهش میدهد ولی متاسفانه سرعت اجرای الگوریتم کند است.

الگوریتم ASIFT (ویژگیهای مستوی نامتغیر با مقیاس^{۱۴}) مبنیبر شبیهساز تصویر از منظرهای مختلف با در نظر گرفتن تصویر از منظرها و زوایای مختلف تعداد نقاط کلیدی بیشتری را استخراج میکند. این روش نسبت به ۶ پارامتر تبدیل آفین مقاوم است. در حالی که SIFT نسبت به ۴ پارامتر انتقال، دوران، تغییر مقیاس و جابهجایی مقاوم است [۱۴]. برای بهبود کیفیت تصویر از ASIFT در حوزه شیرلت^{۱۵} استفاده شده است [۱۵]. یکی از الگوریتمهای استخراج ویژگی AKAZE (توصيف گر براساس هرم مقياس غيرخطي^{۱۶}) است كه شامل سه مرحله اصلى ايجاد هرم غيرخطى، تعيين نقاط كليدى و ايجاد توصيف كننده دودويي است. به دليل استفاده از هرم غيرخطي، AKAZE نياز به منابع سختافزاري غيرقابل قبولي دارد و توليد توصيف كننده در سه مرحله مانعى براى توان عملياتى سيستم است. اين روش به دليل دسترسى به حافظه تصادفى براى کاربردهای آنی مناسب نیست [۱۶]. در مرحله استخراج نقاط کلیدی برای ایجاد هرم غیر خطی از معادله پرونا مالک استفاده شده است. برای ایجاد سطوح مختلف هرم، تصویر در مجموعهای از سطوح مقیاس در حال انتشار پخش شده است. به منظور افزایش سرعت انتشار AKAZE، یک روش انتشار سریع و صریح^{۱۷} (FED) در نظر گرفته شده که با چند تکرار میتوان جواب را تقریب زد. در هر تکرار تصویر، گامی با مقیاس کوچکتر پخش شود. پس از ایجاد هرم، دترمینان ماتریس نرمال شده محاسبه و مقدار بیشینه در هر زیر سطح، به عنوان نقاط کلیدی انتخاب می شود. سپس هر نقطه کلیدی با سایر نقاط کلیدی در پنجره δ×δ از زیر سطح i+1 تا i+1 مقایسه می شود تا نقاط کلیدی تعیین گردند [۱۷٬۱۸]. برای استخراج نقاط کلیدی، روشهای FOIGDD (مشتق مرتبهی اول فیلتر جهتدارگوسی همسانگرد^{۱۸}) و FOAGDD (مشتق مرتبه اول فیلتر جهتدارگوسی ناهمسانگرد^{۹۰}) به کار برده شده است. این روشها بر مبنای مشتق فیلتر گوسی مرتبه اول در جهات و زوایای مختلف هستند. این روش همانند SIFT از روابط بسط تیلور و ماتریس تابع هسین^{۲۰} استفاده نموده و با بهدست آوردن نسبت تریس^{۲۱} به دترمینان و با در نظر گرفتن آستانه، نقاط کلیدی را استخراج میکند. استفاده از ماتریس هسین (مشتق گیری در جهات x و y) حجم محاسبات را افزایش میدهد[۱۹]. برای کاهش حجم محاسبات، روش تقریبی SOAGDD (مشتق مرتبه دوم فیلتر جهتدار گوسی ناهمسانگرد^{۲۲}) و SOIGDD (مشتق مرتبه دوم فیلتر جهتدار گوسی همسانگرد^{۳۳})، که در ساختارشان فیلترجعبهای استفاده شده به کار رفته است [۲۰]. استفاده از شدت روشنایی در روشهای ناهمسانگرد که نقاط کلیدی را در جهات و مقیاسهای مختلف استخراج مینماید، مناسب نیست. این روشها نسبت به توزیع غیرخطی و شعاعی حساس هستند. در روش SIFT بهبود یافته در مرحله استخراج نقاط کلیدی از روش تجزیه و تحلیل اجزای آنتروپی هسته استفاده شده و توصيف گر SARSIFT (رادار ديافراگم مصنوعي ^{۲۴}SIFT) به کار رفته است. اين روش براي تصاوير SAR به نتايج خوبی دست یافته است [۲۱]. توصیف گر، برداری است که با استفاده از اندازه و جهت گرادیان موجود در همسایگی نقاط کلیدی ساخته می شود. توصیف گرها در برابر مقیاس، چرخش، تغییرات روشنایی و تا حدودی زاویه دید مقاوم هستند. از جمله توصيفگرها ميتوان به SIFT و بهبود يافتههاي آن، SURF و توصيفگرهاي باينري از جمله BRIEF (ويژگيهاي ابتدايي مستقل دودویی مقاوم^{۲۵}) ، ORB (استخراج ویژگی با روش FAST و توصیفگر ویژگی با BRIEF چرخش یافته^{۲۶}) و توصیف-گرهای مبتنی بر BRISK (نقاط کلیدی دودویی مقیاسپذیر مقاوم^{۲۷}) اشاره کرد [۲۲]. توصیفگرهای دودویی مبتنی بر BRISK و BRIEF نسبت به دوران مقاوم نیستند. الگوریتم SURF از تبدیل هار^{۲۸} برای توصیف نقاط کلیدی استفاده نموده است [۲۳]. یکی از روشهای بهبودیافته SIFT ،SIFT (SIFT با محدودهبندی تطبیقی^{۲۹}) توصیفگر مبتنی بر تعیین هیستوگرام بهینه است که با استفاده از الگوریتم هسین آفین، نقاط کلیدی را شناسایی کرده است و همانند روش SIFT برای هر نقطه کلیدی یک جهت در نظر می گیرد و در نهایت از توصیف گر ABSIFT برای تطبیق ویژگیها استفاده می کند [۴]. توصيف گر مبتنی بر BRISK توسط استيفان معرفی شده و از فضای مقياس و آشکارساز گوشه AGAST (آزمون قطعهای تسریع شده عمومی وفقی^{۳۰}) ویژگیهای مقاوم نسبت به تغییر مقیاس ساخته میشود [۲۴]. در این روش هرمی از تصویر ساخته و در روی هر لایه هرم، آشکارساز گوشه AGAST با آستانههای یکسان اعمال می شود، سپس مقیاس هر یک از این ویژگیها با استفاده از درونیابی امتیازات بهدست آمده از آشکارساز گوشه AGAST، تخمین زده می شود [۲۵]. نیم SIFT یکی دیگر از توسعههای SIFT است. این روش مطابق SIFT تصویر مورد نظر را به زیر نواحی ۴×۴ تقسیم شده و در هر زیر ناحیه از دایرهای استفاده میکند که به ۸ قطاع ۴۵ درجهای تقسیمبندی شده است. برای افزایش سرعت در استخراج نقاط کلیدی در هر ناحیه نقاط کلیدی که جهات آنها در زوایای بین π و π قرار دارند، طبق قانون آیینه در فاصله ($0,\pi$) قرار گرفتهاند و به جای ۸ جهت ۴ جهت در نظر گرفته و تعداد بردار ویژگی از ۱۲۸ به ۶۴ ویژگی کاهش یافته است [۲۶]. استخراج نقاط کلیدی با روش ORB و سپس استفاده از پنجره تصویر در اطراف هر نقطه کلیدی برای محاسبه توصیف گر از ترکیب شبکه یادگیری عمیق و تبدیل موجک استفاده شده است. بهطوری که استفاده از ویژگیهای فرکانس پایین در فرکانسهای بالاتر با استفاده از تبدیل موجک در لایههای شبکه عمیق باعث افزایش دقت و بهدست آوردن ویژگیهای گسسته و تغییرناپذیر در مقیاسهای مختلف است [۲۷]. استخراج نقاط کلیدی با روش SIFT و ساختن توصیف گری در اطراف نقاط کلیدی با استفاده از روش HOLBP (هیستوگرام جهتدار الگوی باینری محلی^{۳۱}) باعث افزایش دقت و سرعت اجرا گردیده است. روشهای الگوی باینری محلی از سرعت اجرای مناسبی برخوردار هستند و در برابر چرخش تغییرناپذیرند درمرجع [۲۸] استفاده از ثبات فاز^{۳۲} به عنوان پیش پردازش جهت و مقیاس مناسب در مرزها و لبهها و تصویر یکنواختی را محاسبه کرده و برای استخراج نقاط کلیدی روش SIFT به کار رفته است [۲۹]. در مرحله استخراج ویژگی، روش متداول SURF با مشکل توزیع پذیری نامناسب مکانی و روی همافتادگی نقاط کلیدی روبرو است و به اختلاف زاویه دید تا حدود ۴۵ درجه پاسخ گو است، مشکل ماتی تصویر نیز وجود دارد. استفاده از توصيف گر باينری BRISK از سرعت عمل خوبی در اجرای الگوريتم برخوردار هست، اما نسبت به دوران پايدار نیست. بنابراین در این پژوهش سعی شده است مشکل ماتی تصویر و روی همافتادگی نقاط کلیدی حل شود و به اختلاف زاویه دید بالاتری نسبت به SURF دست یافت. همچنین در بخش توصیفگر، چالش پایداری در برابر دوران را با روش RBRISK (نقاط کلیدی دودویی مقیاس پذیر مقاوم و تغییر ناپذیر در برابر دوران^{۳۳}) حل کرد. در ادامه کار در بخش دوم، در محیط IMAS (انطباق تصویر با شبیهساز توابع تبدیل مستوی^{۳۴}) استخراج نقاط کلیدی به روش SURF و توصیفگر BRISK معرفی و در بخش سوم روش پیشنهادی به همراه بلوک دیاگرام و جزئیات مطرح می شود. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی و مقایسه عملی با سایر روشها ارائه خواهد شد و در بخش پنجم مقاله جمعبندی می گردد.

۲- مبانی نظری روش پیشنهادی

IMAS) تطبيق تصوير با شبيهسازی آفين (IMAS)

روش IMAS، به عنوان یک شبیه ساز قبل از به کارگیری روش های انطباق بر روی تصویر اعمال می شود. این الگوریتم تعدادی تابع تبدیل آفین مختلف را شبیه سازی نموده، آن ها را بر روی تصویر مرجع و هدف اعمال می نماید تا برای هر کدام از آن دو، تصاویر شبیه سازی شده دو به دو با هم مقایسه شوند. این الگوریتم، تصاویر را می تواند تا اختلاف زاویه ۸۰ درجه تطبیق دهد. الگوریتم IMAS، بر اساس توصیف گرهای محلی و بهینه سازی هندسی بنا شده است. به منظور اندازه گیری میزان اختلاف زاویه دید بین دو تصویر گرفته شده از یک صحنه، مفاهیم تیلت^{۳۵} مطلق و انتقال تیلت به کار برده شده است. در الگوریتمی که نسبت به تمام پارامترهای تابع تبدیل آفین تغییرناپذیر باشد، شبیه سازی تیلت های بزرگ ضروری است. انتقال تیلت در عمل می تواند خیلی بزرگتر از تیلت مطلق باشد. در روش IMAS باید تا حد امکان از تعداد تابع تبدیل کمتری استفاده شود و این توابع تبدیل به طور بهینه تمام فضای تیلت را پوشش دهند [۳۰]. در شکل (۱) تحلیل حرکتی و زاویه دید دوربین نشان داده شده است که در آن ∳ طول جغرافیایی و ψ میزان چرخش دوربین حول محور و ۸ مقدار فاکتور بزرگ نمایی را نشان می هده.



[۱۴] شکل (۱): تحلیل حرکتی و زاویه دید دوربین بر اساس تجزیه تابع تبدیل آفین [۱۴] Figure (1): Motion analysis and camera view angle based on affine transform function analysis [14].

θ عرض جغرافیای زاویه از رابطه (۱) تعیین می شود که در آن t پارامتر تیلت مطلق نام دارد که زاویه دید بین دو دوربین با زاویه دید عمود و دوربین با زاویه دید غیر عمود را اندازه گیری می نماید [۱۴].

(۱)
در شکل (۱)، مشخص است که زمانی که دوربین در نقطه زاویه دید عمود قرار میگیرد، زمان برابر یک و
$$\theta \in \Psi$$
 برابر صفر
هستند. اگر دوربین بهطور ثابت در فاصله بینهایت از تصویر قرار گرفته باشد، تصویر گرفته شده از دوربین، یک نگاشت آفین^۳
ست. این تقریب برای مواردی که ابعاد تصویر نسبت به فاصله دوربین تا تصویر کوچک است، به عنوان یک روش مناسب
محسوب میشود. ساختن آفین برای هر محدوده کوچک و تقریبا مسطح از صحنه گرفته شده، توسط دوربین ثابت در فاصله
فرار داده شده نسبتاً دور از صحنه، بهصورت محلی معتبر است. برای هر ناحیه کوچک از صحنه، یک تابع تبدیل آفین متفاوت،
در نظر گرفته میشود که بر روی آن ناحیه اعمال شده است. پارامتر تیلت هر تابع تبدیل آفین یک ماتریس با دترمینان مثبت
(2)⁺G1 و ۲×۲ است که بهصورت (A) نمایش داده شده و در محدوده (∞،1) قرار میگیرد. مجموعه (2)⁺Go فقط ماتریسهایی
که بهصورت تابع تبدیل مشابه هستند، در نظر میگیرد. اگر (2)⁺Ae G0 باشد، پارامتر تیلت برابر یک است و اگر (2)⁺Ae

$$\begin{aligned} \mathrm{Gl}^{+}(2) &\to & [1,\infty[\\ \mathrm{A} &\to & \begin{cases} 1 & \mathrm{A} \in \mathrm{Go}^{+}(2) \\ \mathrm{t} & \mathrm{A} \in \mathrm{Gl}^{+}_{*}(2) \end{cases} \end{aligned}$$

$$(7)$$

مجموعه (2)⁺(2) از نسبت تقسیم مجموعه (Cl⁺(2) از مجموعه Go⁺(2) بهدست می آید [۳۰].

$$GI^{+}(2) = \{A \in GL(2) \mid det(A) > 0\}$$

$$Go^{+}(2) = \{A \in GL(2) \mid A \text{ is similarity}\}$$

$$GI_{*}^{+}(2) = \frac{GI^{+}(2)}{Go^{+}(2)}$$
(7)

هر تصویر گرفته شده از یک سطحی مانند u(x,y) توسط دوربین تحت نگاشت خاص مانند Au قرار دارد و برای این که به تواند به صورت تصویری تحت نگاشت Bu در بیاید، باید بتوان BA⁻¹ را بر روی Au اعمال کرد. هر تابع آفین مطابق رابطه (۴) با دترمینان مثبت که مشابه نباشد از طریق الگوریتم SVD قابل تجزیه است.

$$A = \lambda R_{1}(\psi)T_{t}R_{2}(\phi) = \lambda \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$
(*)

t در رابطه (۴)، λt دترمینان ماتریس A، ، A ماتریس چرخش و t تیلت نام دارد. یک ماتریس قطری مقدار ویژه اول آن برای t برای t رابطه (۴)، λt در رابطه (۲) هر تابع آفین مشابه را می توان به صورت λR بیان نمود. ϕ بزرگتر یا برابر یک و مقدار ویژه دوم آن یک است. در رابطه (۴) هر تابع آفین مشابه را می توان به صورت λr بیان نمود. ϕ پارامتر طول جغرافیایی و ψ نشان دهنده چرخش دوربین حول محور و λ بزرگنمایی است. در رابطه (۵) پارامتر طول

جغرافیایی φ هر تابع تبدیل آفین با دترمینان مثبت (2)+Gl و در محدوده]π,0] قرار دارد. اگر A متعلق به (2)+Go باشد، پارامتر طول جغرافیایی برابر صفر و اگر (2)+AeGl باشد، پارامتر طول جغرافیایی برابر φ است.

$$\begin{aligned} \mathrm{Gl}^{+}(2) &\to & [0,\pi[\\ \mathrm{A} &\to \begin{cases} 0 & \mathrm{A} \in \mathrm{Go}^{+}(2) \\ \phi & \mathrm{A} \in \mathrm{Gl}^{+}_{*}(2) \end{cases} \end{aligned}$$
 (Δ)

الف- انتقال تیلت: در کاربردهای واقعی معمولاً برای مقایسه دو تصویر (u₁(x,y) و u₂(x,y) از دوربینهایی با زوایای دید غیر عمود که از یک صحنه تصویربرداری شده، استفاده میشود. توصیفگرهایی مانند SIFT به دلیل آن که نسبت به جابهجایی چرخش و بزرگ و کوچکنمایی تغییرناپذیرند و نسبت به زاویه دید تغییرناپذیر نیستند، به خوبی در این مقایسه عمل مینماید. برای اندازهگیری میزان تغییرات تیلت بین دو تصویر (u₂(x,y) و u₂(x,y) یارامتری به نام انتقال تیلت محاسبه میشود. (u₁(x,y) و u₁(x,y) و u₂(x,y) و کوچکنمایی تغییرناپذیرند و نسبت به زاویه دید تغییرناپذیر نیستند، به خوبی در این مقایسه عمل مینماید. برای اندازهگیری میزان تغییرات تیلت بین دو تصویر (u₂(x,y) و u₂(x,y) یارامتری به نام انتقال تیلت محاسبه میشود. فرض این u₂(x,y) دو تصویر گرفته شده از یک صحنه با زوایای دید متفاوت، تحت نگاشتهای آفین اعمالی A و B هستند. فرض این است که تابع ¹¹ AB که تصویر (u₁(x,y) را به تصویر (x,y) تو سرعای منابه نیست و با تغییر زاویه دید همراه است، بنابراین برای به دست آوردن انتقال تیلت (u₁(x,y) و u₂(x,y) تابع ا² (u₁(x,y) و u₂(x,y) و u₂(x,y) بارامتری به نام انتقال تیلت محاسبه میشود. (u₁(x,y) و u₂(x,y) دو تصویر گرفته شده از یک صحنه با زوایای دید متفاوت، تحت نگاشتهای آفین اعمالی A و B هستند. فرض این است که تابع ¹¹ AB که تصویر (u₁(x,y) را به تصویر (u₁(x,y) و u₁(x,y) و u₁(x,y) میزان برای بهدست و با تغییر زاویه دید همراه است، است که تابع ارای دید انتقال تیلت (u₁(x,y) و انتقال چرخش (u₁(x) و انتقال چرخش (u₁(x) و انتقال چرخش (u₁(x) و انتقال زیر است:

$$AB^{-1} = H_{\lambda}R_{1}(\psi)T_{t}(AB^{-1})R_{2}(\phi)$$

که در آن A و B عضو مجموعه (2)⁺GL و انتقال تیلت بین A و B برابر تیلت مطلق تابع تبدیل AB⁻¹ است و با (AB⁻¹) است و با (AB⁻¹) مایش داده می شود [۳۰].

- فضای تیلت: فضای تیلت که با Ω نشان داده شده، مجموعهای از توابع همارز درون مجموعه (2)⁺GL است. هر نمونه در فضای تیلتها مجموعهای از توابع تبدیل با چرخشهای متفاوت (حول محور دوربین) و فاکتورهای بزرگنمایی مختلف و با تیلت معین t یکسان و در جهت ϕ یکسان است. هر کدام از دسته توابع همارز در یک کلاس قرار می گیرند. به عبارت دیگر با فرض A عضو (2)⁺GL کلاس تابع تبدیل A، [A] مجموعهای از توابع تبدیل است که با تابع تبدیل A همارز هستند. (۷)

در رابطه (۸) تابعی که با استفاده از یک کلاس با پارامترهای معین ¢ و t تابع تبدیل متناظر با آن کلاس Tt R را محاسبه مینماید. تزریق اولیه نام دارد و i نشان داده میشود.

$$i = \begin{cases} \Omega \to GL^+(2) \\ [A] \to T_{\iota(A)}R_{\phi(A)} \end{cases}$$
(λ)

و فضای تیلت به صورت رابطه (۹) تعریف می شود: (۹) که در آن ϕ در تمام توابع تبدیل در کلاس همارزی [i,d] برابر یک و t در تمام توابع تبدیل در کلاس همارزی [i,d] برا بر صفر است. در شکل (۲) تعدادی از عنصرهای نمونه برداری شده از فضای تیلتها به صورت نقاط مشکی در مخت صات قط بی (سمت راست) به طور پرسپکتیو (سمت چپ) نشان داده شده اند.

برای پوشش بهینه فضا باید دیسکهایی با فرمول بسته در فضای دو بعدی ایجاد شود. [Tt R(\oplus)] به عنوان یک نماد معین از فضای تیلتها بهصورت یک کلاس از توابع همارز است. محدوده همسایگی به شعاع r از هر نماد از فضای تیلتها، توسط دیسک ([Tt R(opl),r]) مشخص میشود. فرمول بسته این دیسکها در رابطه (۱۰) بیان شده است.

$$\{[T_t R(\phi_1)] | G(t,s,\phi_1,\phi_2) \le \frac{e^{2r} + 1}{2e^r}\}$$

$$(1 \cdot)$$

که در ان رابطه (۱۱) برقرار است.



شکل (۲): عناصر نمونه برداری شده از فضای تیلتها (مجموعهای از توابع تبدیل با چرخشهای متفاوت (حول محور دوربین θ) فاکتورهای بزرگنمایی مختلف اما با یک تیلت معین (t یکسان) در جهت معین (Φ یکسان) هستند [۳۹]) Figure (2): Sampled elements from the tilts space. A set of transform functions with different rotations (around the camera axis) [30]

$$G(t, s, \phi_1, \phi_2) = \left(\frac{\frac{t}{s} + \frac{s}{t}}{2}\right) \cos^2(\phi_1 - \phi_2) + (\frac{\frac{1}{st} + st}{2})\sin^2(\phi_1 - \phi_2)$$
(11)

در رابطه (۱۱)، در مختصات قطبی دیسکهای متقارن نواحی پوشش داده شده در فضای تیلت را نشان میدهند. با توجه به تقارن دیسکها مشخصههای (τ,φ+π) و (τ,φ) به عنوان مراکز دیسکها هستند. هر چه تیلت بزرگتر شود، دیسک کوچکتر میشود و برای پوشاندن به تعداد دیسکهای بیشتری نیاز است. نواحی از تیلتها که بهصورت گوهایاند، نواحی هستند که بهصورت متقارن بر روی کره قرار گرفته و نقاط کلید در این نواحی استخراج میشوند [۳۰].

ج- مطابقت ابر توصیفگرها: پس از تولید مجموعه تصاویری حاصل از چرخش و یا جابهجایی و تغییراتی بهصورت تصاویر (uı,u₂,...,u_n) دسته توصیفگرهای استخراج شده از روی این مجموعه تصاویر که نقاط ویژگی آنها بعد از نگاشت وارون بر روی تصویر اصلی u و در یک محدوده همسایگی به شعاع P در تصویر u قرار میگیرند، به عنوان یک ابرتوصیفگر P شناخته می شوند. به تمام ویژگیهای قرار گرفته در محدوده ی به شعاع P، بر نقاط کلیدی P گفته می شود. در عمل، شعاع P بین ۳ و پیکسل است. شکل (۳) مثالی از ابرتوصیفگری است که متشکل از سه توصیفگر استخراج شده از سه نمونه متفاوت شبیهسازی شده از روی تصویر u معرفی شدهاند. در حالت ایده آل مرکز سه توصیفگر استخراج شده از سه نمونه متفاوت شبیهسازی شده از روی تصویر u معرفی شدهاند. در حالت ایده آل مرکز سه توصیفگر برهم منطبق است. در عمل نقاط ویژگی تقیقاً در یک مکان یکسان ایجاد نمی شوند. حالت نشان داده شده در شکل (۳) زمانی که هیچ خطایی در شبیهسازی توابع تبدیل آفین و ایجاد نقاط ویژگی و توصیفگر آنها وجود نداشته باشد، رخ می دهد. لذا ابتدا در مرحله ی پیش پردازش عملگر ترفولوژی برای همه نمونههای شبیهسازی شده در تصویر u اعمال می شود و برای استخراج نقاط کلیدی از روش پیشنهادی و بردارهای ایجاد نقاط ویژگی و توصیفگر آنها وجود نداشته باشد، رخ می دهد. لذا ابتدا در مرحله ی پیش پردازش عملگر موفولوژی برای همه نمونههای شبیهسازی شده در تصویر u اعمال می شود و برای استخراج نقاط کلیدی از روش پیشنهادی و بردارهای ایجاد شده ذخیره می شوند. زمانی که توصیفگر به یک ابر توصیفگر موجود یا یک ابر توصیفگر جدید اختصاص می بابد و بردارهای ایجاد شده ذخیره می شوند. زمانی که توصیفگر به یک ابر توصیفگر جدید اختصاص می یابد. لازم است که مرکز این ابرتوصیفگر از طریق میانگین گیری بر روی مختصات مرکزی روش پیشنهادی در آن ابر توصیفگر مجد محاسبه شود. لازم به ذکر است که هر ابر توصیفگر جدید ایجاد شده با تمام ابر توصیفگر معرد شده ند، مقایسه و در صورتی که لازم به ذکر است که هر ابر توصیفگر جدید ایجاد شده با تمام ابر توصیفگرهای قبلی ذخیره شده ند، مقایسه و در صورتی که نسبت به هر کدام از آنها در همسایگی P قرار گرفته باشد، با آنها ادغام می شود [۱۰۰] (شکل ۳).



[٣٠] شکل (٣): تشکیل ابر توصیف گر [٣٠]
Figure (3): Hyperdescriptor formation [30]

۲-۲- الگوریتم ویژگیهای مقاوم سریع

(17)

در الگوریتم SURF برای یافتن نقاط کلیدی به طور سریع از روش کانولوشن تصویر انتگرالی فیلتر جعبهای استفاده می شود. برای به دست آوردن مقدار پیکسل در تصویر انتگرالی خود پیکسل یا همان آدرس در تصویر اصلی قرار داده می شود و مجموع تمام پیکسل های چپ و بالای آن پیکسل و خود پیکسل محاسبه می شود و به جای مقدار آن پیکسل در تصویر انتگرالی قرار داده می شوند. به طوری که راست ترین و پایین ترین پیکسل در تصویر انتگرالی بیان کننده تمام پیکسل های تصویر اصلی است. در رابطه (۱۲) تصویر انتگرالی نشان داده شده است [۲۱،۳۲].

$$I(X) = \sum_{i=0}^{i \le x} \sum_{j=0}^{j \le y} I(i, j)$$

I تصویر ورودی، (x,y) مختصات یک نقطه در تصویر است. پس از آن که تصویر انتگرالی I_Σ(X) با استفاده از مستطیلی با ابعاد معلوم تعیین شد، مجموع پیکسلهای درون مستطیل با چهار عمل جمع استخراج میشود [۳۲]. به همین دلیل استفاده از تصویر انتگرالی مستطیلی موجب افزایش سرعت میشود. برای آشکارسازی نقاط کلیدی از ماتریس هسین استفاده شده است. به طوری که آشکارسازی ساختارهای حبابی شکل در مکانهایی است که دترمینان ماتریس هسین بیشینه است. برای نقطه (X(x,y) در تصویرا، ماتریس هسین X با مقیاس σ به صورت رابطه (۱۳) تعریف میشود:

$$H = \begin{pmatrix} L_{XX}(X,\sigma) & L_{XY}(X,\sigma) \\ L_{YX}(X,\sigma) & L_{YY}(X,\sigma) \end{pmatrix}$$
(17)

که در آن L_{xy}(X, σ) مشتق مرتبه دوم ماتریس گوسین در جهت x، (X, σ) او L_{yy}(X, σ) مشتق مرتبه دوم تابع گوسین در جهت x در آن (X, x) است. استفاده از فیلتر گوسین برای آنالیز فضا-مقیاس بهینه است. اما برای افزایش سرعت از تصویر انتگرالی با گسسته کردن و تقریب فیلترهای لاپلاسین گوسی امکان پذیر است. به طوری که برای آشکارسازی نقاط کلیدی در جهت محور x معرف کردن و تقریب فیلترهای لاپلاسین گوسی امکان پذیر است. به طوری که برای آشکارسازی نقاط کلیدی در جهت محور x معیت محور x معیت کردن و تقریب فیلترهای لاپلاسین گوسی امکان پذیر است. به طوری که برای آشکارسازی نقاط کلیدی در محبت محور x معیت محور x معرف و نقاع کلیدی در می محبت محرف و برای با گسسته کردن و تقریب فیلترهای دو مرتبه نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه سطوح عمودی تفاضل داده میشود. ضریب نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه سطوح عمودی تفاضل داده میشود. ضریب نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه سطوح عمودی تفاضل داده میشود. ضریب نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه سطوح عمودی تفاضل داده میشود. ضریب نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه سلوح عمودی تفاضل داده میشود. ضریب نقاط خاکستری صفر و نقاط سفید و سیاه دارای ضریب میباشند. پاسخ مرتبه معودی تعان داده میشود. در مقیاسهای مختلف با در نظر گرفتن اکتاو اول بهدست میآید. برای مثال اکتاو اول مقایسهای میان لایه اول و دوم و سوم انجام شده است. این مقایسه برای همه نقاط و در هر لایه یک محدوده ۳×۳ در لایه وسط و بقیه ۲۶ پیکسل انجام میشود. اگر پیکسلی از ۲۶ پیکسل دیگر و آستانه ۲۰۰۰۴ بزرگتر باشد، به عنوان نقطه مطلوب در نظر گرفته میشود. در نتیجه نقطه کلیدی بهینه محاسبه میشود.

۲-۲- توصيف گر نقاط کليدي دودويي مقياس پذير مقاوم

یکی از الگوریتمهای مهم در بخش توصیف گر، الگوریتم BRISK است. الگوریتم BRISK در مرحله استخراج نقاط کلیدی از الگوریتم AGAST استفاده کرده است. فضای مقیاس الگوریتم AGAST دارای لایه اکتاو Ci و اکتاو ورودی di است. لایه اکتاو با نصف کردن تصویر اصلی و اکتاو درونی با نمونه کاهی از تصویر Ci و ضریب ۱/۵ بهدست میآید. اکتاو درونی ما بین لایههای اکتاو قرار می گیرد. ضریب مقیاس هر تصویر t و ضریب مقیاس اکتاو درونی 200=(c)t است. اگر تعداد لایههای اکتاو ۴ باشد. تعداد کل لایههای فضای مقیاس هر تصویر t و ضریب مقیاس اکتاو درونی imtoc(c) است. اگر تعداد لایههای اکتاو ۴ باشد. تعداد کل لایههای فضای مقیاس برابر ۸ است. در هر لایه از فضای مقیاس آشکارساز گوشه AGAST با آستانههای یکسان اعمال میشود. در شکل (۴) نقطه P به عنوان پیکسل مرکزی با شدت روشنایی م¹در یک دایره ۱۶ پیکسل در نظر گرفته میشود. ابتدا نقطه مرکزی (P) با شدت روشنایی پیکسلهای (۱۳۰۹،۹۰۱) مقایسه میشود. در صورتی که شدت روشنایی نقطه میشود. ابتدا نقطه مرکزی (P) با شدت روشنایی پیکسلهای (۱۳۰۹،۹۰۱) مقایسه میشود. در صورتی که شدت روشنایی نقطه مرکزی از این ۴ پیکسل بیشتر و یا کمتر باشد، به عنوان نقطه گوشه در نظر گرفته میشود. سپس نقطه مرکزی P با کاندیداهای از پیکسلهای باقیمانده مقایسه و نقاط گوشه شناسایی میشود. از نقطهی P یک بردار با ۱۶ پیکسل اطراف آن را ذخیره کرده که رابطه هر پیکسل با پیکسلهای کناری میتواند ۳ حالت تیره تر، مشابه و روشنتر باشند و به ۳ زیر مجموعه آستانه آنتروپی به عنوان گوشه شناسایی شود. حداقل شدت روشنایی یا و به شود از مقوه به آستانه آنتروپی به عنوان گوشه شناسایی شود. حداقل شدت روشنایی یا و به موزش داده شود و در نهایت با توجه به روشنایی پیکسل مرکزی P₁ بیشتر یا کمتر باشد و برای نقاط کلیدی بهدست آمده امتیازی تعریف می شود. این امتیازات به این صورت محاسبه می شود که پیکسل های متوالی که مقدار روشنایشان از مجموع مقدار آستانه بعلاوه پیکسل مرکزی بیشتر باشد از روشنایی مرکزی کم می شود، سپس همه را با هم جمع و به عنوان امتیاز نقاط کلیدی در نظر گرفته می شود. پس از اجرای الگوریتم AGAST بر روی فضای مقیاس تصویر، آن دسته از نقاط کلیدی که دارای امتیاز کمتری نسبت به نقاط کلیدی مجاور خود هستند، حذف می شوند و سپس نقاطی را که در سه لایه متوالی فضای مقیاس نقاط کلیدی هستند، به عنوان نقاط کلیدی مقاوم نسبت به تغییر مقیاس معرفی می شوند. برای هر نقطه ی کلیدی مقاوم نسبت به تغییر مقیاس، یک مقیاس واقعی براساس امتیازات الگوریتم AGAST تخمین زده می شوند. به این صورت که ابتدا یک منحنی درجه دو بر روی صفحه ی که محور افقی آن لگاریتمی بر پایه ۲ به عنوان ضریب مقیاس t و محور عمودی آن الگوریتم AGAST متناظر با آن نقطه است، درون یابی می شود [۳۵٫۴۴].

پس از محاسبه گوشه، برای یافتن جهت نقاط کلیدی از شکل (۵) استفاده می شود. مرکز الگو نقاط کلیدی الگوریتم AGAST است و برای جلوگیری از تداخل فرکانسی حاصل از کاهش نمونه برداری و همچنین کاهش حساسیت به نویز هر نقطه الگو با یک فیلتر پایین گذر گوسی فیلتر می شود. نقاط آبی نقاط نمونه برداری الگو است و مختصات آنها آ است و دایره های قرمز اندازه انحراف معیار فیلتر گوسی σ متناظر با آن نقطه است. اندازه انحراف معیار را بزرگتر انتخاب کنیم تا اندازه انحراف دو نقطه مجاور الگو با هم هم پوشانی داشته باشند. این کار سبب می شود تا همه پیکسل های اطراف نقاط کلیدی برای تعیین جهت مورد استفاده قرار گیرند. الگو را با ضریب مقیاس به دست آمده از فضای مقیاس، بزرگ کرده و مرکز این الگو را به مکان نقطه کلیدی در تصویر اصلی انتقال داده می شود. گرادیان محلی بین دو نقطه (P_i,P_j) و به صورت تقریبی (۱۴) محاسبه می شوند:

$$g(P_{i}, P_{j}) = \frac{(P_{i} - P_{j})I(P_{j}, \sigma_{j}) - I(P_{i}, \sigma_{i})}{\|P_{i} - P_{i}\|^{2}}$$
(14)

که در آن I(Pi, o_i) و I(Pi, o_j) میزان روشنایی فیلتر شده با فیلتر گوسی در نقاط P_i وP_i هستند. گرادیان در تصویر میزان تغییرات روشنایی است و مجموعه A را بهصورت (۱۵) تعریف می شود:

 (1Δ)

$$A = \left\{ (P_i, P_j) \in R^2 \times R^2 \mid i < N \land j < i \land i, j \in N \right\}$$

این مجموعه تمام زوج نقاط را بدون در نظر گرفتن ترتیب نقاط در خود جای میدهد. تعداد کل زوج نقاط برای الگوی شکل مطابق رابطه (۱۶) بهدست می آید که در آن N تعداد نقاط الگو و F تعداد کل زوج نقاط است.



(۳۳) شکل (۴): آشکارسازی نقاط کلیدی به وسیله آشکارسازی ویژگیهای مقاوم در برابر تغییر مقیاس [۳۳] Figure (4): Detecting key points by detecting features resistant to scaling [33]



شکل (۵): الگوی استفاده شده در الگوریتم نقاط کلیدی دودویی مقیاسپذیر مقاوم برای تخمین جهت نقاط کلیدی. نقاط آبی و الگوهای

دایرهای قرمز، انحراف معیار گوسی متناظر با نقاط نمونهبرداری شده [۳۴]

Figure (5): The pattern used in the robust scalable binary key points algorithm to estimate the direction of key points. Blue points and red circular patterns, corresponding Gaussian standard deviation of the sampled points [34]

$$F = \frac{N(N-1)}{2}$$
(19)

زیر مجموعهای از مجموعه A بهصورت رابطه (۱۷) تعریف می شود: (۱۷) L = {(P_i,P_j)∈ A || P_i - P_j || < δ_{max}} ⊆ A که در آن t ضریب مقیاس نقطه کلیدی و مجموعه L زوج نقاطی از مجموعه A است که فاصله زوج نقاط از یکدیگر از آستانه δ_{min} برابر ۱۳/۶۷t بیشتر است. برای یافتن میزان روشنایی، هر زوج نقطه به دست آمده را با هم مقایسه کرده و بر اساس رابطه (۱۸) یک کد باینری ساخته می شود. به طوری که d برابر است با:

$$b = \begin{cases} 1 & I(P_j, \sigma_j) > I(P_i, \sigma_i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall (P_i, P_j) \in L$$
(1A)

به این ترتیب توصیفگر دودویی ساخته میشود. اما این توصیفگر نسبت به دوران پایدار نیست. بنابراین در این پژوهش با در نظر گرفتن جهت گرادیان، نقاط تقریبا پایدار در برابر دوران ساخته میشود.

۳- روش پیشنهادی

استفاده از روشهای انطباق تصویر مرسوم مانند SURF و SIFT با مشکل توزیع پذیری نامناسب نقاط کلیدی و روی همافتادگی و نزدیکی آنها به هم روبرو هستند. همچنین این روشها به اختلاف زاویه دید تا حدود ۴۵ درجه پاسخگو هستند. در روش پیشنهادی این پژوهش، سعی شده که با به کار گیری محیط IMAS مشکل اختلاف زاویه دید تا حدود ۸۰ درجه بهبود داده شود در مرجع [۳۰] و با استفاده از تیلتها و تقارن در جهات و زوایای مختلف، تعداد نقاط کلیدی مناسبی انتخاب شود. برای یافتن مرزها و لبههای مشخصی از تصاویر و بهبود کیفیت تصویر، قبل از اعمال روشهای انطباق از فیلترهای غیرخطی با عملگرهای مورفولوژی استفاده شده است. برای استخراج نقاط کلیدی الگوریتم SURF را به کار برده و به جای یافتن جهت اصلی نقاط کلیدی در الگوریتم SURF، ایده مرکز جرم را پیشنهاد کردیم که میزان دقت انطباق را افزایش داده و از سرعت مناسبی نیز در کاربردهای آنلاین برخوردار است. در بخش توصیفگر از توصیفگر RBRISK استفاده شده است. توصیفگر BRISK به علت استفاده از مدل های دودویی، سرعت مناسبی دارد، اما نسبت به دوران تغییر پذیر است. برای رفع این مشکل مدل بهبودیافته RBRISK استفاده شده است که با گرادیان گرفتن، جهت مناسبی را برای نقاط کلیدی انتخاب میکند و میزان تغییرناپذیری نسبت به دوران را بهبود میدهد. برای انطباق نقاط کلیدی، الگوریتم KNN (K نزدیکترین همسایه^{۳۷}) و برای حذف نقاط اشتباه حاصل از این انطباق، الگوریتم RANSAC (اجماع نمونه تصادفی^{۳۸}) مبنی برتفکیک ویژگیهای درست از نادرست به کار رفته است. در بلوک دیاگرام شکل (۶) نحوه ی قرار گیری و معماری الگوریتم پیشنهادی ارائه گردیده است که در آن، تصویر مرجع، تصویری است که توسط ماهواره گرفته شده است و تصویر هدف تصویری است که نسبت به تصویر مرجع با چرخش، دوران، جابهجایی و اختلاف زاویه دید دوربین همراه است و در فصول مختلف سال گرفته شده است. بر روی هر دو تصویر، روش IMAS پیادهسازی می شود تا تصاویری از منظرهای مختلف تولید شود. در محیط IMAS مراحل پیش پردازش که شامل فیلترهای مبتنی بر مورفولوژی است، بر روی دو تصویر اعمال میگردد. سپس روشهای استخراج ویژگی که شامل SURF بهبودیافته است، اجرا می شود. در مرحله بعد توصیف گر RBRISK برای پایداری و مقاوم بودن نقاط کلیدی ارائه می گردد. برای انطباق نقاط کلیدی در دو تصویر از KNN استفاده می شود و در نهایت با به کار گیری الگوریتم RANSAC نقاطي كه به اشتباه انطباق يافتهاند، حذف مي گردند.

۱–۳– فیلتر مبتنی بر عملگر مورفولوژی

پس از پیادهسازی محیط IMAS، که در بخش دوم توضیح داده شد، عملیات پیش پردازش مورفولوژی در محیط IMAS اجرا گردید. برای یافتن مرزها و لبههایی با وضوح بیشتری در تصویر از عملگر گرادیان مورفولوژی استفاده شد که از فرایند گسترش و سایش مبتنی بر بازسازی یک تصویر تکباند برای استخراج اشیاء تصویر استفاده می کند.

شکل (۶): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی Figure (6): Block diagram of the proposed method

برای این که بهتوان اشیاء با اندازههای مختلف را با این روش استخراج نمود، معمولاً این عملگر با چندین عنصر ساختاری با اندازههای مختلف به تصویر اعمال میشود. به این ترتیب، با اعمال این فیلترها با n عنصر ساختاری به یک تصویر تکباند، میتوان ۲۱ تصویر جدید بهدست آورد که حاوی اطلاعات اندازه و شکل درون تصویر اصلی هستند. برای یافتن مرزها و لبههای اشیاء تصویر نیز میتوان از تفاضل مورفولوژی گسترش و سایش استفاده نمود و به عنوان عملگر گرادیان مورفولوژی، لبههای با کیفیتی از تصویر ارائه داد [۳۵].

$$g = dst1(x, y) - dst2(x, y)$$

 $dst1(x, y) = max_{i,j}f(x+i, y+j)$ (۲۰)
 $dst2(x, y) = min_{i,j}f(x+i, y+j)$ (۲۱)
 $cr(celied (۲۱-۲۱), g$ تصویر خروجی عملگر گرادیان مورفولوژی است و $f(x,y)$ نقطه مرکزی پنجره اطراف عنصر ساختاری و
 $dst_2(x,y)$ یکی از نقاط همسایه در پنجره اطراف عنصر ساختاری است. $dst_1(x,y)$ تصویر گسترش یافته و $dst_2(x,y)$ تصویر
سایش یافته است.

۲-۳- الگوریتم ویژگیهای مقاوم سریع بهبودیافته

پس از بهدست آوردن نقاط کلیدی در الگوریتم SURF که در بخش ۲-۲ توضیح داده شد. برای تغییرناپذیری نسبت به دوران در الگوریتم SURF از ایده مرکز جرم استفاده میشود. بهطوری که تصویر را به پنجرههایی افراز نموده و مرکز جرم (مرکز پنجره) را با استفاده از رابطههای (۲۲) و (۲۳)، مرکز جرم C تصویر محاسبه میشود.

$$\begin{cases} m_{00} = \sum x^{0} y^{0} I(x, y) \\ m_{10} = \sum x^{1} y^{0} I(x, y) \\ m_{01} = \sum x^{0} y^{1} I(x, y) \end{cases}$$
(77)
$$C = \left(\frac{m_{01}}{m_{00}}, \frac{m_{10}}{m_{00}}\right)$$
(77)

در رابطههای (۲۲) و (۲۳)، (۲۳) تصویر اولیه است. چنان که دیده می شود، m_{00} گشتاور صفرم و سپس m_{10} و m_{01} و m_{01} به ترتیب گشتاور اول در راستای محور x و محور y ها محاسبه می شود. سپس زاویه بین مرکز جرم پنجره و نقطه کلیدی به دست می آید و تصویر به اندازهی زاویه محاسبه شده، می چرخد. به کار گیری این روش موجب افزایش دقت می شود و الگوریتم با سرعت مناسبی اجرا می شود و سپس زاویه بین مرکز جرم تصویر و هر نقطه کلیدی محاسبه می شود: $\theta = tg^{-1}(m_{01}, m_{10})$ ۳-۳- توصیف گر نقاط کلیدی دودویی مقیاس پذیر مقاوم و تغییرنا پذیر در برابر دوران

توصیف گر BRISK همان طور که در بخش (۲–۳) معرفی شد، یک توصیف گر باینری است و از سرعت اجرای مناسبی برخوردار است. اما نسبت به دوران پایدار نمی باشد، بنابراین در بخش توصیف گر روش پیشنهادی، از گرادیان جهتی استفاده شده که پایداری الگوریتم نسبت به دوران بهبود می یابد. در این روش، پس از محاسبه یمجموعه L در رابطه (۱۶)، میانگین گرادیان محلی همه زوج نقاط مجموعه L تعیین می شود:

$$g = \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} = \frac{1}{k} \sum_{p_i, p_{j \in L}} g(P_i, P_j)$$
(Ya)

این رابطه میزان روشنایی غالب در نواحی اطراف نقاط کلیدی را نشان میدهد. k برابرطول مجموعه L است. پس از محاسبه g، زاویهای به نقاط کلیدی نسبت داده میشود. جهت این زاویه بیشترین تغییرات نقاط روشنایی پیکسلهای اطراف نقاط کلیدی را نشان میدهد.

$$d = tg^{-1}(g_y, g_x)$$
(79)

پس از محاسبه جهت نقاط کلیدی، مرکز الگوی جهتی به مختصات نقاط کلیدی انتقال داده میشوند. الگوی جهتی مجموعه s^d از مجموعه A بهصورت رابطه (۲۷) تشکیل میشود:

$$s^{d} = \left\{ (P_{i}^{d}, P_{j}^{d}) \in A \mid \parallel P_{i}^{d} - P_{j}^{d} \parallel < \delta_{max} \right\} \subset A$$

$$(\Upsilon Y)$$

که در آن P_j^d و P_j^d مختصات نقاطی است که از چرخش الگو بهدست آمدهاند. در مجموعه s^b فاصلهی زوج نقاط از یکدیگر باید از حدود δ_{max} برابر ۹/۱t کمتر باشد که این آستانه بهصورت تجربی حاصل شده است. با تغییر ضریب آستانه δ_{max} میتوان طول کد باینری را تغییر داد. روشنایی نقاط هر زوج نقطه در تصویر I(x,y) با هم بهصورت (۲۸) مقایسه و کد باینری جدیدی از توصیف گر ساخته می شود:

$$\mathbf{b} = \begin{cases} 1 & I(P_j^d, \sigma_j) > I(P_i^d, \sigma_i) \\ 0 & I(P_j^d, \sigma_j) < I(P_i^d, \sigma_i) \end{cases}$$
(7A)

برای کم کردن میزان حساسیت به دوران، به جای استفاده از میزان روشنایی خود پیکسلها بهتر است از میزان روشنایی پیکسلهای فیلتر شده با فیلتر گوسی استفاده کرد. پس از یافتن نقاط کلیدی و استفاده از توصیفگر مناسب، دو تصویر مرجع و هدف منطبق میشوند.

۴–۳ – انطباق در این الگوریتم، تطبیق مبتنی بر نسبت اولین و دومین نزدیکترین همسایه بوده است. در این روش دو نقطه کلیدی تطبیق مییابد. به شرطی که (۲۹) برقرار باشد.

$$\frac{\|D_{A} - D_{B}\|}{\|D_{A} - D_{C}\|} < t$$

$$D_{A} - D_{C} \|$$

$$D_{B} = D_{A} - D_{C} \|$$

$$D_{B} = D_{A} - D_{C} \|$$

$$D_{B} = D_{A} - D_{C} \|$$

$$D_{A} = D_{C} - D_{C} - D_{C} \|$$

$$D_{A} = D_{C} - D_{C} -$$

است. اگر فاصله بین اولین نزدیکترین همسایه تا توصیفگر نسبت به فاصله دومین نزدیکترین همسایه تا توصیفگر منظور، از حد آستانهای تجربی کوچکتر باشد، عمل تطبیق انجام میشود [۴].

در این صورت به وسیله الگوریتمی مانند RANSAC باید به توان نقاط درست را از اشتباه تشخیص داد و تطبیقهای درست را شناسایی کرد [۳۶].

۴- پیادهسازی روش پیشنهادی و مقایسه با سایر روشها

۱–۴– دادهها

جفت تصاویر استفاده شده در این پژوهش، شامل چهار جفت تصویر است که بهصورت ماهوارهای، هوایی، SAR دریافت شده است. این تصاویر در زمانهای مختلف و با اختلاف زاویه دید متفاوت گرفته شدهاند. برای بیان صریح و آسان جفت تصویر ماهوارهای حدود ۳۰ درجه را ماهوارهای نوع اول و جفت تصویر ماهوارهای با اختلاف زاویه زیاد تا حدود ۷۰ درجه را ماهوارهای نوع دوم نامیدیم. تصاویر ماهوارهای نوع اول از مناطق شهری و ماهوارهی نوع دوم از مناطق کوهستانی گرفته شده است. منبع ماهواره تصویربرداری تصویر ماهوارهای نوع اول در تصویر مرجع SPOT4 و تصویر هدف لندست است. در تصویر هوایی منبع ماهواره مرجع و هدف به ترتیب 3-یا در تصویر می باشد. در تصاویر ماهوارهای با اختلاف زاویه زیاد تا حدود ۷۰ در ماهواره مرجع و هدف به ترتیب 3-یا در تصویر مرجع SPOT4 و تصویر هدف لندست است. در تصویر هوایی منبع ماهواره مرجع و هدف به ترتیب 3-یا دو هوایی می باشد. در تصاویر ماهوارهای با اختلاف زاویه زیاد مرجع IRS-IC و هدف spot4 است و در تصاویر SAR مرجع لندست و هدف SAR است. جزئیات مشخصات تصاویر مورد استفاده در جدول (۱) و نمایش چشمی دادهها در شکل (۷) نشان داده شده است [۱۲،۳۷].

۲-۴- معیارهای ارزیابی

معیارهای ارزیابی استفاده شده در این الگوریتم، دقت، نرخ تکرارپذیری و زمان اجرا میباشد. دقت، تعداد تطبیقهای صحیح T_P به تعداد کل تطبیقها T_t است.

$$TR = \frac{T_p}{T_t} \tag{(...)}$$

نرخ تکرارپذیری، شامل تعداد تطبیقهای صحیح T_P به تعداد ویژگیهای شناسایی شده در دو تصویر مرجع N_{ref} و حس شده N_{Sens} است.

(۳۱)
F =
$$\frac{T_P}{\min(N_{
m ref},N_{
m Sens})}$$
زمان اجرای کل الگوریتم برحسب ثانیه گزارش شده است. تمام شبیهسازیها در نرم افزار ++C و OpenCV3.4 اجرا می شوند.

۴-۳- پیادهسازی روش پیشنهادی در محیط شبیهساز

زمان اخذ	ابعاد تصوير	وضعيت طيفي	نوع ماهواره	مجموع تصاوير	
7) 173×811		چندطیفی	SPOT4		
74	1730×84V	لندست چندطیفی		جفت تصویر ماهوارهای-ماهوارهای نوع اول	
۲۰۱۰	پانکروماتیک ۱۶۲×۱۶۵ (۰۱۰		ziyua-3		
۲۰۰۷	٧ • • × ٧ • •	پانكروماتيك	تصويرهوايي	جفت تصوير مامتوارماي-متوايي	
١٩٩٨	۱۹۹۸ ۱۱۴۶×۱۱۳۵ ۱۹۹۶ ۲۰۰×۵۹۰		IRS-IC	جفت تصویر ماهوارهای-ماهوارهای نوع دوم	
1998			SPOT4		
۲۰۰۷	7 ۲۷۹×۷۶۲		لندست	SAD LIN ""	
7Л		SAR پانکروماتیک		جفت تصویرماهوارهای – אותנ	

جدول (۱): چهار نوع تصویر استفاده شده در این پژوهش

شکل (۷): نمایش چشمی دادهها (تصاویر مرتبط با شماره پیشوند یکسان نمایش داده شدهاند) (الف)و (ب) جفت تصاویر ماهوارهای (ج)و (د) جفت تصاویر ماهوارهای – هوایی (ه)و (و) جفت تصاویر ماهوارهای - SAR (ز)و (ح) جفت تصاویر ماهوارهای اختلاف منظر ۷۰ درجه Figure (7): Images used in this study, (a), (b) Pair of satellite-satellite images., (c), (d) Pair of satellite-aerial images, (e), (f) Pair of Satellite-SAR Images, (g), (h) Pair of Satellite- satellite with angle difference of 70 degrees' images.

Table (2): Implementation of the proposed method										
زمان کل	دقت	تكرار پذيرى	زمان	زمان استخراج نقاط	نقاط كليدى	نقاط كليدى	مجموع تصاوير			
	پيكسلھا		انطباق	کلیدی	هدف	مرجع	مورد استفاده			
4/81	٠/٩٣	• /Y	•/۵۵	١/٨٧	39.2	4428	مجموعه اول			
۲/۱۱	٠/٩٠	•/• \	۰/۲۵	١/٧٨	37701	۳۰ ۲۸	مجموعه دوم			
۳/۸۴	•/44	•/7۶	• / ٨	۲/۳۴	4499	47.4	مجموعه سوم			
۶/۶۳	٠/۴٧	•/••٩۶	•/•٧	۳/۲۸	V498	7888	مجموعه چهارم			

جدول (۲): پیادهسازی روش پیشنهادی

در تصویر ماهوارهای نوع اول تعداد نقاط کلیدی استخراجی در تصویر مرجع ۴۴۶۸ و در تصویر هدف ۳۹۰۲ است که این تعداد نقاط حدود ۱۹۶۱ نقطه انطباق یافته و ۱۸۱۴ نقطه پس از عبور از الگوریتم RANSAC انطباق صحیح یافتهاند که میزان دقت انطباق ۹۳ درصد محاسبه شد. تصاویر ماهوارهای نوع اول دارای اختلاف زاویه ۳۰ درجه هستند که روش پیشنهادی در محیط IMAS به دقت خوبی دست یافته است. همان طور که در بخش تئوری IMAS بیان شد، IMAS به اختلاف زاویه دید تا حدود ۷۰ درجه پاسخ گو است. بنابراین در تصاویر ماهوارهای-اپتیکی نوع دوم از تصاویری استفاده شد که نسبت به هم ۷۰ درجه اختلاف دید داشته باشند. در این نوع تصویر تعداد نقاط کلیدی در تصویر مرجع ۳۰۲۸ و در تصویر دوم ۳۳۵۱ است و تعداد نقاط درست پس از عبور از RANSAC به تعداد کل انطباقها به ترتیب ۵۷۷ به ۶۳۷ است. در این نوع تصویر نیز دقت به ۹۰ درصد رسیده که با وجود اختلاف زاویه زیاد روش پیشنهادی در محیط IMAS به نتایج مناسبی دست یافته است. در تصاویر هوایی تعداد نقاط کلیدی در تصویر مرجع ۴۸۰۴ و تصویر هدف ۴۴۹۹ است و تعداد نقاط منطبق پس از عبور از RANSAC به کل نقاط به ترتیب ۷۲ به ۱۶۴ است و دقت انطباق ۴۴ درصد محاسبه شده است. در تصاویر SAR نیز تعداد نقاط کلیدی در تصویر مرجع و هدف به ترتیب ۷۶۸۸ و ۷۴۶۳ است که تعداد نقاط صحیح پس از عبور از RANSAC به تعداد کل نقاط منطبق ۲۹ به ۶۱ است و دقت انطباق ۴۷ درصد است. در تصاویر SAR و هوایی میزان دقت نسبت به تصاویر ماهوارهای اپتیکی کاهش قابل توجهی داشته است. به دلیل اینکه جنس و نوع تصاویر مرجع و هدف متفاوت هستند. تصویر مرجع ماهوارهای و هدف از جنس هوایی یا SAR است. در تصاویر هوایی و SAR تعداد نقاط منطبق به نسبت تعداد نقاط کلیدی استخراجی در تصویر بسیار کاهش یافته است. در مورد تصاویر هوایی از حدود ۴۰۰۰ نقطه استخراجی فقط ۷۲ نقطه صحیح و در مورد تصاویر SAR از حدود ۲۰۰۰ نقطه فقط ۲۹ نقطه انطباق صحیح داشتهاند. به نظر می رسد جنس و نوع و ماهیت تصاویر در انطباق نقاط کلیدی تاثیر قابل توجهی داشته است. نمونهای از دقت انطباق نقاط کلیدی صحیح روش پیشنهادی در محیط IMAS بر روی چهار نوع داده در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است روش پیشنهادی بر روی تصاویر ماهوارهای نوع اول و دوم به نتایج بهتری نسبت به تصاویر هوایی و SAR دست یافته است.

شکل (۸): نمونهای از تصاویر انطباق تصویر

Figure (8): An example of image matching images, a) Matching satellite-satellite images, b) Adaptation in satellite-satellite images with an angle of 70 degrees, c) Adaptation in aerial-satellite images, d) Adaptation in SAR satellite images

۴-۴- مقایسه روش پیشنهادی با سایر روشها در محیط شبیهساز و بدون محیط شبیهساز

در شکل (۹)، میزان دقت انطباق روش پیشنهادی با سه روش SURF ،SIFT و AKAZE برروی چهار نوع تصویر ماهوارهای نوع اول با اختلاف زاویه ۳۰ درجه، نوع دوم با اختلاف زاویه ۲۰ درجه، هوایی و SAR در محیط IMAS و غیر IMAS مقایسه شده است. مقایسه روش پیشنهادی با سایر روشها در استخراج نقاط کلیدی است و توصیف گر به کار رفته در همهی روشها RBRISK است. نتایج محاسبه شده در محیط IMAS دارای دقت بالاتری نسبت به محیط غیر IMAS است. زیرا این محیط با در نظر گرفتن تقارن و تیلت در جهات مختلف و استخراج نقاط کلیدی در نواحی تیلتها بهدقت خوبی دست یافته است. به دلیل اینکه نقاط مورد نظر را داخل تیلتها استخراج میکند، نقاط بهینهای بهدست میآیند که از قابلیت انطباق خوبی برخوردار هستند. روش پیشنهادی ما، در هر دو محیط IMAS و بدون اعمال IMAS از دقت بالاتری نسبت به سایر روشها برخوردار است. به منظور افزایش دقت، در مدل پیشنهادی برای یافتن مرزها و لبههای دقیقتر از فیلتر مورفولوژی استفاده شد. برای نمایش نقاط کلیدی و پایداری نسبت به دوران الگوریتم بهبود یافته SURF پیشنهاد گردید که موجب دقت انطباق می گردد. در این الگوریتم پس از محاسبه نقطه کلیدی و با تعیین نقطه مرکزی و 0، (زاویهی بین نقطهی مرکزی و نقطه کلیدی در هر پچ) تصویر به اندازهی زاویه اصلی چرخانده می شود و حجم محاسبات کاهش می یابد. در تصاویر ماهوارهای الگوريتم SURF بهدقت مناسبي نسبت به الگوريتم AKAZE ،SIFT دست يافته است. همچنين الگوريتم SURF سرعت مناسبی نسبت به الگوریتم SIFT در محیط غیر IMAS دارد. اما در محیط IMAS به علت استخراج نقاط کلیدی بسیار زیاد، زمان زیادی را صرف می کند. در محیط غیر IMAS، در تصویر ماهوارهای نوع دوم که دارای اختلاف زاویهای در حدود ۷۰ درجه است، روش پیشنهادی ما نیز همانند سایر روشهای انطباق تصویر پاسخ گو نیست و دقت تصاویر عملاً از دست رفته است. ولى محيط IMAS به اختلاف زاويه ديد بالاترى از ۵۰ درجه نيز پاسخ گو است و تصوير ماهوارهاى نوع دوم به دقت بالاتری دست یافته است. دقت قابل ملاحظهای در محیط IMAS برای تصاویر ماهوارهای نوع دوم با اختلاف زاویه ۲۰ مشاهده می شود. کلیه روش ها در دو محیط IMAS و غیر IMAS برای تصاویر هوایی و SAR نتایج قابل قبولی نیستند. به دلیل اینکه جنس و نوع تصاویر متفاوت بوده روشهای معمول و روش پیشنهادی ما هم به نتایج خوبی در دقت انطباق نرسیده است. در شکل (۹) محور عمودی میزان دقت انطباق و محور افقی روشهای پیشنهادی را نمایش میدهند.

A-4- مقایسه توصیف گر BRISK و روش پیشنهادی RBRISK

در آزمایشی دیگر، توصیف گرهای BRISK و RBRISK بر روی چهار داده تصویر با هم مقایسه شدهاند که میزان دقت انطباق RBRISK از BRISK در تمام دادهها بیشتر است. البته الگوریتم با سرعت کندتری نسبت به BRISK اجرا می شود. در هر دو نمونه مرحله استخراج ویژگی SURF بهبود یافته به کار رفته است. در شکل (۱۰) محور عمودی میزان دقت انطباق دو توصیف گر و محور افقی چهار نوع تصویر را نشان می دهند.

۶-۴- به کارگیری آستانه و تعیین دقت

میزان دقت انطباق در روش پیشنهادی و سایر روشهای SURF ،SIFT و AKAZE بررسی شده که در تمامی روشها برای انطباق نقاط درست از نادرست الگوریتم RANSAC به کار رفته است. این الگوریتم از آستانهای استفاده می کند که تعداد نقاط استخراجی درست را شناسایی مینماید. این آستانه حدود ۵/۰ در نظر گرفته می شود و به تدریج افزایش می یابد. دقت انطباق نیز به همین نسبت افزایش یافته است و از حدود ۸/۰ به بالا میزان دقت انطباق تغییر محسوسی نخواهد کرد. به طوری که اگر میزان آستانه را از ۸۸/۰ تا ۹۰/۰ یا ۲۹/۰ رسانده شود. میزان نقاطی که به درستی انطباق یافته اند، در حدود یک زوج نقطه افزایش یافته و در نتیجه میزان دقت تا حدود ۱/۰ درصد افزایش یافته است. بنابراین در پیاده سازی آستانه ۸/۰ به کار رفته است. همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، میزان دقت انطباق روش پیشنهادی از سایر روشها بیشتر است. در نمودار محور عمودی میزان دقت انطباق و محور افقی تغییرات سطح آستانه را نمایش می هدی از می روش ها بیشتر است. در

(الف) مقایسه روشهای انطباق تصویر در محیط IMAS

(ب) مقایسه روشهای انطباق تصویر در محیط بدون IMAS

شکل (۹): روشهای انطباق تصویر در دو محیط

Figure (9): Image matching methods in two environments, a) Comparison of image matching methods in IMAS environment, b) Comparison of image matching method in the environment without IMAS

شکل (۱۰): مقایسه توصیف گر BRISK و روش پیشنهادی RBRISK Figure (10): Comparison of BRISK descriptor and proposed RBRISK method

شکل (۱۱): در نظر گرفتن پنجره با آستانه در نظر گرفته شده Figure (11): Considering the window with the considered threshold

۵- نتیجهگیری

در این مقاله در مرحله استخراج نقاط کلیدی SURF بهبود یافته، معرفی گردید که در مرحله پیش پردازش از فیلتر مورفولوژی برای کیفیت بهتر تصویر استفاده شده است. در روش SURF معمول برای تک تک نقاط کلیدی زاویه و جهتی در نظر گرفته میشود. اما در مدل SURF بهبود یافته با در نظر گرفتن پنجره تصویر و مرکز جرم میتوان جهت هر نقطه کلیدی را شناسایی کرد و سرعت اجرای الگوریتم بالاتر رود. در مرحله توصیف گر از مدل RBRISK استفاده شد. توصیف گر این اسبت به دوران پایداری نیست ولی در مدل RBRISK با در نظر گرفتن جهت و یک 6 زاویه ای مشکل پایداری در برابر دوران تا حدودی بهبود یافت. با توجه این که مدل پیشنهادی به اختلاف زاویه دید تا حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه پاسخ گو است. برای آن که به اختلاف زاویه دید تا حدود ۷۰ درجه پاسخ گو باشد، مدل IMAS به کار برده شد. روش پیشنهادی بر روی چهار نوع داده از نوع دادههای ماهوارهای-ماهوارهای، ماهوارهای ماهوارهای با اختلاف زاویه دید در حدود ۲۰ تا ۶۰ درجه، ماهوارهای-هوایی و ماهوارهای-اختلاف زاویه دید تا حدود ۷۰ درجه پاسخ گو باشد، مدل IMAS به کار برده شد. روش پیشنهادی بر روی چهار نوع داده از نوع دادههای ماهوارهای-ماهوارهای، ماهوارهای ماهوارهای با اختلاف زاویه دید در حدود ۲۰ درجه، ماهوارهای-هوایی و ماهوارهای-SAR پیاده سازی شد که مدل پیشنهادی بر روی دادهای ماهوارهای ماهوارهای به بهترین نتیجه دست یافت. روش SURS بر دوی دادههای ماهوارهای با اختلاف زاویه دید تا حدود ۲۰ درجه، ماهوارهای هوایی و ماهوارهای-یوی دادههای ماهواره ای با اختلاف زاویه دید تا حدود ۲۰ درجه، ماهواره ای دروش یشتهادی به تصویر با جنس متفاوت به روی دادههای ماهواره ای با اختلاف زاویه دید تا حدود ۲۰ درجه به نتایج خوبی رسید ولی نسبت به تصاویر با جنس متفاوت به نتایج مناسبی دست نیافت.

References

مراجع

- G. Khademi, H. Ghassemian, "Second-order total generalized variation regularization for pansharpening", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 19, pp. 1-5, Dec 2020 (doi: 10.1109/LGRS.2020.3043435).
- [2] A. Saboori, H. Ghassemian, F. Razzazi, "Active multiple kernel fredholm learning for hyperspectral images classification", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 18, no. 2, pp. 356-360, Feb. 2021 (doi: 10.1109/LGRS.2020.2969970).
- [3] S.A. Hosseini, H. Ghassemian, "Rational function approximation for feature reduction in hyperspectral data", Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 2, pp. 101-110, Nov 2015 (doi: 10.1109/ICSIPA.2015.7412241).
- [4] A. Sedaghat, H. Ebadi, "Remote sensing image based on adaptive binning SIFT descriptor", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 10, pp. 5283-5293, Oct 2015 (doi: 10.1109/TGRS.2015.2420659).
- [5] J. Zhang, W. Ma, Y. Wu, L. Jiao, "Multimodel remote sensing image registration based on image transfer and local feature", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 16, no. 8, pp. 1210-1214, Aug. 2019 (doi: 10.1109/LGRS.2019.2896341).
- [6] A. Ishihara, H. Aga, Y. Ishihara, H. Ichikawa, H. Kaji, K. Kawasaki, D. Kobayashi, T. Kobayashi, K. Nishida, T. Hamasaki, H. Mori, Y. Morikubo, "Integrating both parallax and latency compensation into video see-through head-mounted display", IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics. vol. 29, no. 5, pp. 2826-2836, May 2023 (doi: 10.1109/TVCG.2023.3247460).
- [7] Z. Fang, X. Yu, J. Pan, N. Fan, H. Wang, J. Qi, "A fast image mosaicking method based on iteratively minimizing cloud coverage areas", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. vol. 18, no. 8, pp. 1371-1375, Aug. 2021 (doi: 10.1109/LGRS.2020.2998920).
- [8] R. Grompone, G. Randull, "A sub-pixel edge detector: On implementation of the canny devernay algorithm", Image Processing on Line, vol. 7, pp. 347-372, Sept. 2017 (doi: 10.5201/ipol.2017.216).
- [9] P. Moreno, A. Bernadino, J. Santos-Victor, "Improving the SIFT descriptor with smooth derivative filters", Pattern Recognition Letters, vol. 30, pp. 18-26, Jan. 2009 (doi: 10.1016/j.patrec.2008.08.012).
- [10] S. Jiang, U. Jzang, B. Wang, X. Zhu, M. Xiang, X. FU, X. Sun, "Registration of SAR and optical images by weighted SIFT based on phase congruency", Proceeding of the IEEE/IGARSS, pp. 8885-8888, Valencia, Spain, July 2018 (doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519181).
- [11] H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool, "SURF: Speeded up robust features", Proceeding of the ECCV, vol. 3951, pp. 404-417, Berlin, 2006 (doi: 10.1007/11744023_32).
- [12] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, H. Ebadi, "Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, pp. 4519-4527, Nov. 2011 (doi: 10.1109/TGRS.2011.2144607).
- [13] S. Wany, H. You, 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, July 2012 (doi: 10.1109/LGRS.201-1.2177437).

- [14] J.M. Morel, G. Yu, "ASIFT: An algorithm for fully affine invariant comparison", SIAM Journal of Imaging Sciences, vol. 2, no. 2, pp. 11-38, Feb. 2011 (doi: 10.5201/ipol.2011.my-asift).
- [15] X. Liu, Z. Tian, Q. Lu, L. Yang, Ch. Chai, "A new affine invariant descriptor framework in shearlet domain for image SAR multiscale registration", International Journal of Electronics and Communications, vol. 67, no. 9, pp. 743-753, Sept. 2013 (doi: 10.1016/j.aeue.2013.03.002).
- [16] S.A. Khan, Z. Saleem, "A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK", Proceeding of the IEEE/ICOMET, pp. 1-10, Sukkur, Pakistan, March 2018 (doi: 10.1109/ICOMET.2018.8346440).
- [17] G. Jiang, L. Liu, W. Zhu, S. Yin, S. Wei, "A 181, GOPS AKAZE accelerator employing discrete-time cellular neural networks for real-time feature extraction", Sensors, vol. 15, pp. 22509-22529, Sept. 2015 (doi: 10.3390/s150922509).
- [18] P. Soleimani, D.W. Capson, K.F. Li, "Real-time FPGA-based implementation of the AKAZE algorithm with nonlinear scale space generation using image partitioning", Journal of Real-Time Image Processing, vol. 18, pp. 2123-2134, Dec. 2021 (doi: 10.1007/s11554-021-01089-9).
- [19] W. Zhang, C. Sun, "Corner detection using multi-directional structure tensor with multiple scales", International Journal of Computer Vision, vol. 128, pp. 438-459, Feb. 2020 (doi: 10.1007/s11263-019-012-57-2).
- [20] T. Gao, J. Jing, Ch. Liu, W. Zhang, Y Gao, Ch. Sun, "Fast corner detection using approximate form of second-order Gaussian directional derivative", IEEE Access, vol. 8, pp. 194092-194104, Oct. 2020 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032751).
- [21] B. Pan, R. Jiao, J. Wang, Y. Han, H. Hang, "SAR image registration based on KECA. SAR-SIFT operator", Proceeding of the IEEE/CEI, pp. 114-119, Nanjiang, China, Nov 2022 (doi: 10.1109/CEI57409.2022.9950203).
- [22] Z. Hossien-Nejad, M. Nasri, M. Baharlouie, "Image mosaicing based on adaptive sample consensus method and a data dependent blending algorithm", Signal Processing and Renewable Energy, vol. 6, pp. 1-12, Sept. 2022 (dor: 20.1001.1.25887327.2022.6.3.1.1).
- [23] S. Leutenegger, M. Chli, R.Y. Siegwart, "BRISK: Binary robust invariant scalable key points", Proceeding of the IEEE/ICOCV, Barcelona, Spain, Nov. 2011 (doi: 10.1109/ICCV.2011.6126542).
- [24] N. Mentzer, J. Mahr, G. Payá-Vayá, H. Blume, "Online stereo camera calibration for automotive vision based on HW-accelerated A-KAZE-feature extraction", Journal of Systems Architecture, vol. 97, pp. 335– 348, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.sysarc.2018.11.003).
- [25] P.F. Alcantarilla, A. Bartoli, A.J. Davison, "KAZE features", Computer Vision-EECV, vol. 7577, pp. 214-227, Berlin, Sept. 2012 (doi: 10.1007/978-3-642-33783-3_16).
- [26] D. Quan, H. Wei, Sh. Wang, Y. Li, J. Chanussot, Y. Guo, B. Hou, L. Jiao, "Efficient and Robust: A crossmodal registration deep wavelet learning method for remote sensing images", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 16, pp. 4739-4754, May 2023 (doi: 10.1109/JSTARS.2023.3276409).
- [27] Y. Hong, C. Leng, X. Zhang, Z. Pei, I. Cheng, A. Basu, "Remote sensing image registration based on histogram of oriented local binary pattern descriptor", Remote Sensing, vol. 13, no. 12, Article Number: 2328, June 2021 (doi: 10.3390/rs13122328).
- [28] W. Zhang, Y. Zhao, "SAR and optical image registration based on uniform feature points extraction and consistency gradient calculation", Applied Sciences, vol. 13, no. 3, Article Number: 1238, Jan. 2023 (doi: 10.3390/app13031238).
- [29] D. Mishkin, J. Matas, M. Perdoch, "MODS: FAST and robust method for two-view matching", Computer Vision and Image Understanding, vol. 141, no. 12, pp. 81-93, Dec. 2015 (doi: 10.1016/j.cviu.2015.08.005).
- [30] M. Rodriguez, J. Delon, J. Michel, "FAST affine invariant image matching", Image Processing on Line, vol. 8, pp. 251-281, Dec 2018. (doi: 10.5201/ipol.2018.225).
- [31] S. Jain, S. Kumar, R. Shettigar, "Comparative study on SIFT and SURF face feature descriptors", Proceeding of the IEEE/ICICC, Coimbatore, India, March 2017 (doi: 10.1109/ICICCT.2017.7975187).
- [32] M. Gharibi, S. Mirzakuchaki, "Improving the performance of SURF algorithm descriptors for image matching", Electronic Industries Quarterly, vol. 7, no. 1, pp. 75-88, April 2015 (in Persian).
- [33] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski, "ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF", Proceeding of the IEEE/ICCV, pp. 2564-2571, Barcelona, Spain, Nov. 2011 (doi: 10.1109/ICCV.2011.6126544).
- [34] E. Azimi, A.R Behrad, M.B. Gaznavi-Ghoushchi, J. Shanbehzadeh, "A fully pipelined and parallel hardware architecture for real-time BRISK salient point extraction", Journal of Real-Time Image Processing, vol. 16, pp. 1859-1879, Oct. 2019 (doi: 10.1007/s11554-017-0693-4).
- [35] F. Khalili, H. Ghassemian, "Classification of remote sensing images using transformation methods and spatial features", Proceeding of the MVIPC, Isfahan, Iran, Nov. 2016 (in Persian).

- [36] Y. Zhao, R. Hong, J. Jiang, "Visual summarization of image collections by fast RANSAC", Nearocomputing, vol. 172, pp. 48-52, Jan. 2016 (doi: 10.1016/j.neucom.2014.09.095).
- [37] K. Li, Y. Zhang, Z. Zhang, G. Lai, "A course-to- fine registration strategy for multi-sensor images with large resolution difference", Remote Sensing, vol. 11, no.4, Article Number: 470, Feb. 2019 (doi: 10.3390/rs11040470).

زيرنويسها

- 1. Remote sensing
- 2. Sensors
- 3. Panorama
- 4. Smallest univalue segment assimilating nucleus
- 5. Features from accelerated segment test
- 6. Affine
- 7. Scale invariant features transform
- 8. Different of Gaussian
- 9. Octave
- 10. Speeded up robust features
- 11. Uniform SIFT
- 12. Bilateral Filter SIFT
- 13. Synthetic aperture radar
- 14. Affine scale invariant features transform
- 15. Shearlet domain
- 16. Accelerated KAZE
- 17. Fast explicit diffusion
- 18. First order isotropic Gaussian directional derivative
- 19. First order anisotropic Gaussian directional derivative
- 20. Hessian
- 21. Trace
- 22. Second order anisotropic Gaussian directional derivative
- 23. Second order isotropic Gaussian directional derivative
- 24. Synthetic aperture radar SIFT
- 25. Binary robust independent elementary features
- 26. Oriented FAST and rotated BRIEF
- 27. Binary robust invariant scalable key point
- 28. Haar transform
- 29. Adaptive binning SIFT
- 30. Adaptive and generic accelerated segment test
- 31. Histogram of oriented local binary pattern
- 32. Phase congruency
- 33. Rotation BRISK
- 34. Image matching by affine simulation
- 35. Tilt
- 36. Affine map
- 37. K nearest neighbors
- 38. Random sample consensus