

## مروری بر روش‌های انطباق تصویر، مفاهیم و کاربردهای آن

زهرا حسین نژاد<sup>۱</sup> و مهدی نصری<sup>۲</sup>

### چکیده

انطباق تصویر، یکی از زمینه‌های بسیار پرکاربرد در پردازش تصویر است که تحقیقات زیادی در این حوزه انجام شده است. انطباق تصویر به معنای هم‌تراز و هم‌محور کردن دو یا چند تصویر از شرایط مختلف تصویربرداری است. از کاربردهای آن می‌توان به شناسایی تغییرات بین تصاویر، ترکیب تصاویر، تشخیص اشیا و موزاییک تصاویر اشاره کرد. در این مقاله، ضمن معرفی مفاهیم انطباق تصویر، تحقیقات مختلف جمع‌آوری و دسته‌بندی شده و سوگیری تحقیقات در این زمینه مشخص شده است. علاوه بر این، از طریق چهار دسته آزمایش مختلف جنبه‌های مختلف انطباق تصویر مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقاله می‌تواند راهگشای محققین پردازش تصویر در این زمینه بوده و سعی شده است تمام جنبه‌های این زمینه تحقیقاتی مورد کاوش قرار گیرد.

### کلیدواژه‌ها

انطباق تصویر، شناسایی ویژگی‌ها، تطبیق، برآورد مدل تبدیل، الگوریتم SIFT.

### ۱ مقدمه

قابل توجه بین تصاویر می‌شود و به صورت کلی این اختلاف را می‌توان به چهار دسته‌ی مشکلات هندسی، مشکلات رادیومتر<sup>۱</sup>، مشکلات بافت و تغییر مناظر تقسیم کرد [۳]. مشکلاتی مانند اختلافات مقیاس تصاویر، اختلافات چرخشی تصاویر و تغییر شکل‌های ناشی از تغییر موقعیت اخذ تصویر را مشکلات هندسی می‌گویند. این اختلافات در تصاویر پزشکی، بر اساس حرکات غیرارادی (مانند تنفس، ضربان قلب و...) حرکات ارادی (مانند جابجایی بیمار) و در تصاویر دیگر بر اساس حرکت دوربین به وجود می‌آیند. نویز، تفاوت شدت روشنایی، موقعیت منابع روشنایی در صحنه و اخذ تصویر در حسگرها و باندهای طیفی متفاوت، سبب ایجاد تغییراتی در شدت روشنایی<sup>۲</sup> تصویر می‌شود که به مشکلات رادیومتر<sup>۱</sup> معروف می‌باشند. تصاویر، ممکن است دارای سطوحی با بافت ضعیف (مانند دریا)، بدون بافت و بافت-های تکراری (مانند ساختمان‌های مشابه) باشد که مشکلات بافت

انطباق تصویر، فرآیند روی هم گذاشتن دو یا چند تصویر از یک صحنه است که در شرایط مختلف تصویربرداری (زمان‌های متفاوت، زوایای متفاوت، حسگرهای متفاوت و نوع و ماهیت منطقه‌ی تصویربرداری شده) گرفته شده‌اند و این فرآیند از نظر هندسی، دو تصویر مرجع و حس شده را هم‌تراز می‌کند [۱]. این فرآیند، یک مرحله‌ی پیش‌پردازش در تحلیل تصاویر است [۲]. در واقع، شرایط مختلف تصویربرداری سبب ایجاد اختلافات

این مقاله در دیماه سال ۱۳۹۵ دریافت، در شهریورماه سال ۱۳۹۶ بازنگری و در مهرماه همان سال پذیرفته شد.

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی برق- مخابرات، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران

رایانامه: [hoseinnejad.zahra@yahoo.com](mailto:hoseinnejad.zahra@yahoo.com)

<sup>۲</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی،

خمینی شهر، اصفهان، ایران

رایانامه: [nasri\\_me@iaukhsh.ac.ir](mailto:nasri_me@iaukhsh.ac.ir)

هدف ما در این مقاله، بررسی رویکردها، شرح روش‌ها و مراحل انطباق تصویر، توصیف بعضی الگوریتم‌های مهم و بهبودهایی که در زمینه ارتقا دقت انطباق در آن‌ها انجام شده‌است. علاوه بر مرور روش‌های انطباق، یک سری آزمایش‌ها بر روی تصاویر طبیعی، تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی و تصاویر چندمندی سنجنش‌ازدور جهت بررسی دقت تطبیق انجام می‌شود.

سازمان‌دهی مقاله به این صورت است که در بخش دوم به بررسی کاربردهای انطباق تصویر بر اساس شیوه اکتساب، در بخش سوم به شرح جزئیات مراحل و روش‌های انطباق تصویر و در بخش‌های چهارم و پنجم به ترتیب، به دسته‌بندی انطباق و بررسی معیارهای ارزیابی انطباق پرداخته می‌شود. نتایج آزمایشات به منظور ارزیابی الگوریتم‌ها در بخش ششم و در نهایت به جمع‌بندی و جهت‌یابی آینده در بخش هفتم پرداخته می‌شود.

## ۲ کاربردهای انطباق تصویر

انطباق تصویر، کاربردهای گسترده‌ای در تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی [۱۶، ۱۷]، پزشکی [۱۸، ۱۹]، بینایی کامپیوتر [۲۰]، تصاویر سنجنش‌ازدور SAR [۲۱] و تصاویر طبیعی [۲۲] دارد. در کل، کاربردهای آن را می‌توان بر طبق شیوه اکتساب تصویر به چهار گروه اصلی، زوایای متفاوت، زمان‌های متفاوت، حسگرهای متفاوت و انطباق تصویر به مدل تقسیم کرد که در ادامه به شرح مختصر هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود [۱].

### ۲-۱ زوایای متفاوت

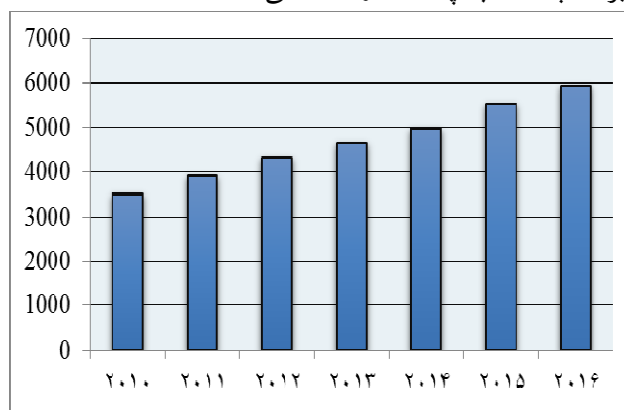
در این دسته، هدف انطباق دو تصویر است که از یک صحنه در زوایای متفاوت گرفته شده‌اند. در این روش، هدف رسیدن به بعد سوم تصویر، شناسایی یک شی در تصویر و به دست آوردن اطلاعات کامل‌تری در مورد آن شی مدنظر است. از آنجایی که با محدود بودن عدسی‌های دوربین نمی‌توان تصاویر پانوراما ایجاد کرد، می‌توان با استفاده از این روش، چنین تصاویری را ایجاد نمود. در شکل ۲ نمونه‌ای از این نوع انطباق مشاهده می‌شود.

### ۲-۲ زمان‌های متفاوت

در این دسته، هدف انطباق تصاویری است که از یک صحنه در زمان‌های متفاوت و تحت شرایط مختلفی گرفته شده است. در اینجا، هدف اصلی یافتن و ارزیابی تغییرات است. در این نوع تصاویر، انطباق تصویر به عنوان یک مرحله پیش‌پردازش در همه‌ی الگوریتم‌های شناسایی تغییرات استفاده می‌شود. برای مثال، در شبکه چشم جهت تصویربرداری آنژیوگرافی فلورسین<sup>۳</sup>، یک یا دو

نامیده می‌شوند. ویژگی‌های متحرک (مانند حرکت وسایل نقلیه) و تغییراتی که در اثر گذر زمان در تصاویر (مانند تغییرات فصلی) وجود دارد، سبب تغییرات مناظر می‌شود. براساس مشکلات ذکرشده، جهت افزایش دقت در پردازش تصاویر، ضروری است فرآیند انطباق انجام شود. باید توجه کرد که هر یک از الگوریتم‌های انطباق، تنها برای انطباق نوع مشخصی از تصاویر طراحی شده‌اند چراکه هر الگوریتم انطباق تصویر تنها برای حل نوع مشخصی از مشکلات هندسی، رادیومتری و مشکلات بافت و غیره کاربرد دارد.

انطباق تصویر، یک مرحله‌ی پیش‌پردازش است که در شناسایی تغییرات [۳]، ترکیب تصاویر [۴]، موزاییک تصاویر [۵] و غیره کاربرد دارد. با توجه به کاربردهای این فرآیند، هر روز توجه دانشمندان بیشتری را به خود جلب می‌کند. شکل ۱ نمودار تعداد مقالات ژورنالی که در پایگاه‌های ساینس دایرکت و IEEE برحسب سال چاپ شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمودار تعداد مقالات برحسب سال

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هر سال مقالات بیشتری در زمینه انطباق تصویر نسبت به سال‌های قبل به چاپ رسیده است که این نشان‌دهنده اهمیت این موضوع می‌باشد. با این وجود، مقاله مروری فارسی در این زمینه وجود ندارد. همچنین، تعداد اندک مقالات مروری انگلیسی که در این زمینه وجود دارد، متأسفانه به شرح کلی روش‌ها پرداخته‌اند و بسیار قدیمی هستند [۶-۸]. از طرف دیگر، مقالات مروری که اخیراً نوشته شده‌اند هم اکثراً مربوط به نوع خاصی از تصاویر پزشکی [۹-۱۱] و در زمینه‌ی یکی از مراحل انطباق است. در این مقالات، به بررسی مزایا و معایب هر یک از الگوریتم‌های مهم در تصاویر متفاوت (سنجنش‌ازدور، تصاویر پزشکی، تصاویر سنجنش‌ازدور SAR) پرداخته نشده است [۱۲-۱۵]. اهمیت و کاربرد روزافزون این زمینه علمی، نشان می‌دهد که هر پنج سال یک‌بار باید یک مقاله مروری نوشته شود تا به شرح مزایا و معایب الگوریتم‌ها و معیارهای ارزیابی جدید در زمینه انطباق تصویر پرداخته شود تا بتواند دانشمندان را در جهت ارتقا عملکرد فرآیند انطباق تصویر راهنمایی کند و راهگشای محققین جدید باشد. این موارد ذکرشده، انگیزه‌ی نگارش مقاله مروری در این زمینه را فراهم می‌کند.

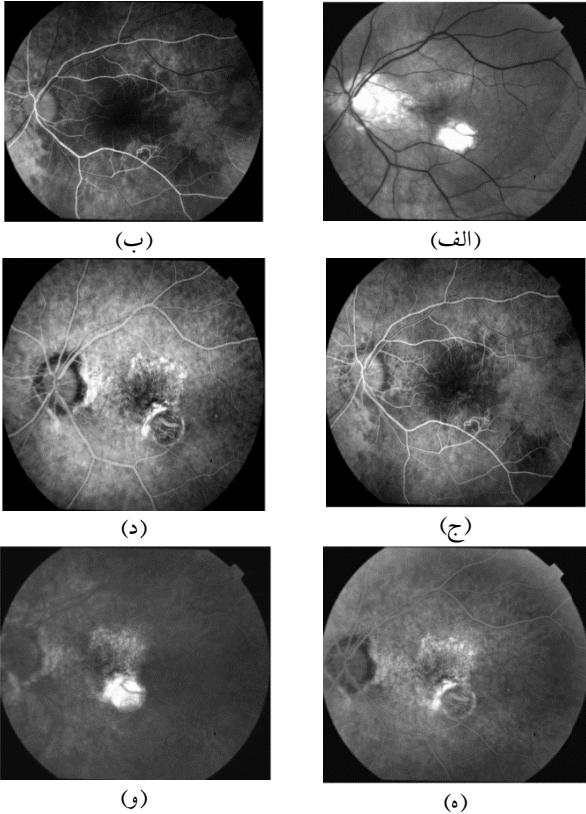
1 Remote sensing

<sup>۲</sup>تصاویر پانوراما: به تصاویری گفته می‌شود که زاویه دید گسترده‌ای (۳۶۰ درجه) داشته باشند.

3 Fluorescein angiographic (FA)

می‌دهند [۲۴]. استفاده هم‌زمان از تصاویر چندمودی در کنار هم کمک شایانی در فرآیند تشخیص و درمان برای پزشکان دارد. در این زمینه، طی سالیان متمادی، روش‌های گوناگون و متنوعی ارائه شده است [۲۵-۲۷]. در شکل ۴ نمونه‌ای از این نوع انطباق مشاهده می‌شود.

تصویر قبل از تزریق رنگ سدیم فلورسین و چند عکس بعد از تزریق رنگ سدیم فلورسین در طول فواصل معین گرفته می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت شناسایی و ارزیابی آسیب‌هایی که در شبکه ایجاد شده، لازم است فرآیند انطباق به‌عنوان یک مرحله‌ی پیش‌پردازش انجام شود.



(ب)

(الف)

(د)

(ج)

(و)

(ه)

شکل ۳ حالت‌های متفاوت تصویر شبکه در آنژیوگرافی فلورسین (الف) تصویر شبکه چشم پس از حذف حالت قرمزی چشم (ب) حالت سرخرگی (ج) حالت وریدی (سیاه‌رگی - سرخرگی) (د) حالت سیاه‌رگی (ه) حالت وریدی تأخیری (و) حالت خون‌رسانی مجدد [۵].

## ۲-۴ انطباق تصویر به مدل<sup>۶</sup>

در این دسته، هدف انطباق تصویری است که از یک صحنه با مدل آن گرفته شده است. مدل می‌تواند یک تصویر کامپیوتری از صحنه باشد. هدف اصلی در این نوع انطباق، مقایسه تصویر با مدل و تهیه اطلس<sup>۸</sup> است و برای رسیدن به این منظور، از انطباق بین موضوعی<sup>۹</sup> و درون شیوه‌ای<sup>۱۰</sup> استفاده می‌شود. یک نمونه‌ی کاربردی از این دسته، در تصویربرداری پزشکی جهت مقایسه تصویر بیمار با اطلس‌های دیجیتال است. پس از بررسی کاربردهای فرآیند



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ یک نمونه از انطباق با زوایای متفاوت (الف) تصویر حس شده. (ب) تصویر مرجع. (ج) تصویر انطباق داده شده [۲۳].

## ۲-۳ حسگرهای متفاوت

در این دسته، هدف انطباق تصاویری است که از یک صحنه به‌وسیله حسگرهای متفاوت و در یک زمان یکسان گرفته شده است که به این نوع تصاویر، تصاویر چندمودی می‌گویند. در این دسته از روش‌ها، هدف اصلی به دست آوردن اطلاعات کامل‌تر و دقیق‌تری از یک صحنه است که در تصاویر پزشکی و سنجش‌ازدور اپتیکی و سنجش‌ازدور SAR<sup>۱</sup> کاربرد دارد. برای مثال، تعیین موقعیت آناتومی یک تومور در پزشکی بسیار مهم است. تمایز بین تومور و بافت پیرامون آن، در تصاویر سی‌تی‌اسکن (CT)<sup>۳</sup> کم است. از طرفی تصاویر MRI<sup>۴</sup> توانایی خوبی در به تصویر کشیدن بافت‌های نرم دارند، درحالی‌که CT بافت سخت و PET<sup>۵</sup>، SPECT<sup>۶</sup> کارکردها و فیزیولوژی را به‌خوبی در بدن نشان

6Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)

7To model registration

8 Atlas

9Inter subject

10Intra subject

1Synthetic Aperture Radar (SAR)

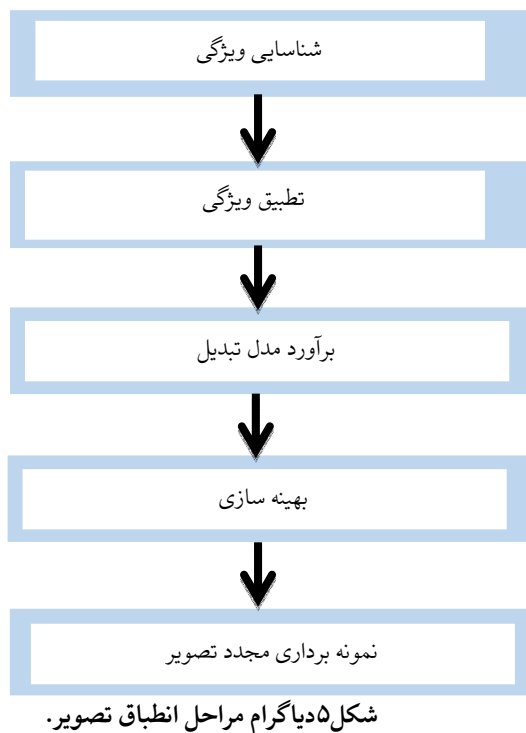
2Contrast

3Computed tomographic imaging(CT)

4Magnetic Resonance Imaging (MRI)

5 Positron Emission Tomography (PET)

است و همچنین با مشکل محدودیت دقت مواجه می‌شود. یکی دیگر از مشکلات روش تعاملی، مسئله اختلاف دیدگاه بین متخصصین<sup>۲</sup> است که بدین معناست که ممکن است متخصصین در انتخاب نقاط کنترلی اختلاف نظر داشته باشند و نقاط به دست آمده توسط آن‌ها منحصر به فرد نباشد؛ بنابراین، وجود روش‌های خودکار در انطباق، یک مسئله مهم است و روش‌های متعددی در این زمینه ارائه شده‌اند [۳۱، ۳۲]. علیرغم اینکه روش‌های گوناگونی برای انجام انطباق خودکار تصویر وجود دارد، اما اکثریت آن‌ها از مراحل که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تشکیل شده‌اند که از مهم‌ترین مراحل انطباق تصویر، شناسایی ویژگی‌ها و تطبیق میان آن‌ها است. در ادامه به شرح هر یک از این مراحل پرداخته می‌شود.



انطباق تصویر در این بخش، در بخش بعدی به شرح مراحل انطباق تصاویر پرداخته خواهد شد.



(الف)



(ب)



(ج)

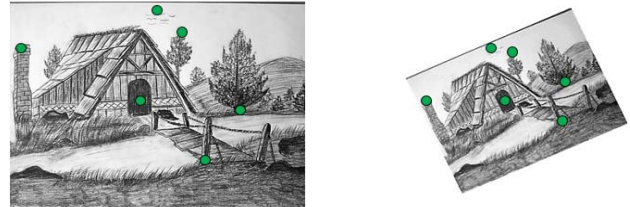
شکل ۴ انطباق تصویر با حسگرهای متفاوت (الف) تصویر MRI به عنوان تصویر مرجع (ب) تصویر CT به عنوان تصویر حس شده (ج) تصویر انطباق یافته [۲۸].

### ۳ انطباق تصاویر و مراحل آن

به صورت کلی، دو روش تعاملی<sup>۱</sup> (پایه) و خودکار برای انجام عمل انطباق وجود دارد [۲۹، ۳۰]. در روش تعاملی، یک مجموعه از نقاط کنترلی در تصاویر به صورت دستی انتخاب می‌شوند و سپس، از این نقاط برای برآورد تابع تبدیل میان دو تصویر و نمونه برداری مجدد استفاده می‌کنند. این روش نیاز به یک اپراتور ماهر دارد. همچنین، انجام آن خسته کننده، تکراری و بسیار زمان بر

## ۳-۱ شناسایی ویژگی‌ها

به طور کلی روش‌های انطباق تصویر براساس نوع شناسایی ویژگی‌ها به دو دسته‌ی روش‌های مبتنی بر ناحیه و روش‌های مبتنی بر ویژگی در انطباق خودکار برای شناسایی ویژگی‌ها تقسیم می‌شوند که شکل ۶ یک جفت تصویر که در آن ویژگی‌ها شناسایی شده‌اند را نشان می‌دهد. در ادامه به شرح هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۶ شناسایی ویژگی‌ها در تصویر مرجع و حس شده

## ۳-۱-۱ روش‌های مبتنی بر ناحیه

روش‌های مبتنی بر ناحیه، زمانی به کار می‌روند که تصاویر جزئیات مهم زیادی نداشته باشد. اطلاعات متمایز، به وسیله تفاوت شدت روشنایی مشخص می‌شوند. در این دسته از روش‌ها، هیچ ویژگی از تصویر شناسایی نمی‌شود و این روش‌ها روی مرحله تطبیق تصویر تأکید بیشتری دارند؛ بنابراین، اولین مرحله انطباق تصویر حذف می‌شوند. روش‌های مبتنی بر ناحیه نیاز به فضای جستجو و مقدار اولیه‌ی مناسب داشته و در مناطق با بافت یکنواخت ضعف دارند که جهت رفع این مشکل روش‌های مبتنی بر ویژگی پیشنهاد شد.

## ۳-۱-۲ روش‌های مبتنی بر ویژگی

در این رویکرد، ویژگی‌های تصاویر شناسایی می‌شوند و سپس تطبیق میان آن‌ها انجام می‌شود. از این دسته از روش‌ها، معمولاً زمانی استفاده می‌شود که اطلاعات ساختار محلی مهم‌تر از اطلاعات شدت روشنایی باشد. این روش نسبت به انحراف‌های بین تصاویر پایدار است. یک ویژگی مناسب برای فرآیند تطبیق این است که باید نسبت به همسایگی‌های خود متمایز بوده و در میان دیگر ویژگی‌ها، منحصر به فرد باشد و مستقل از اعوجاج هندسی و رادیومتری و پایدار در برابر نویز باشد. نوع ویژگی‌هایی که در تصاویر انتخاب می‌شود، بستگی به نوع تصاویر دارد. به طور کلی، در تصاویر سه نوع ویژگی وجود دارد: ویژگی‌های نقطه‌ای<sup>۱</sup>، ویژگی‌های خطی<sup>۲</sup> و ویژگی‌های ناحیه‌ای<sup>۳</sup> [۱]. در ادامه به شرح هر یک از این ویژگی‌ها پرداخته می‌شود.

## • ویژگی‌های نقطه‌ای

گوشه‌ها و نقاط را می‌توان به عنوان ویژگی‌های نقطه‌ای در نظر گرفت. گوشه‌ها، نقاطی از تصویر هستند که تغییرات شدت روشنایی آن‌ها نسبت به سایر همسایه‌های آن‌ها بسیار زیاد است. به طور کلی، برای استخراج ویژگی‌های نقطه‌ای نیاز به شناساگرهای گوشه و شناساگرهای نقاط کلیدی می‌باشد که شناساگرهای مُراوک<sup>۴</sup> [۳۳] و هریس<sup>۵</sup> [۳۳] و SIFT<sup>۶</sup> [۳۴] نمونه‌ای از این شناساگرها می‌باشند که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود.

## شناساگر گوشه مُراوک

ایده مُراوک برای تشخیص گوشه، استفاده از یک پنجره‌ی باینری کوچک (برای مثال ۳×۳) با مرکزیت پیکسل مورد بررسی است. با حرکت دادن این پنجره در چهار جهت اصلی  $(u, v) = (1,0), (1,1), (-1,-1), (0,1)$  میزان تغییرات شدت روشنایی بررسی می‌شود. اگر این میزان، در چهار جهت بررسی شده نسبت به سایر همسایه‌ها بیشتر باشد، آن پیکسل به عنوان گوشه در نظر گرفته می‌شود. این شناساگر دارای نقاط ضعفی است که عبارت‌اند از:

چون شناساگر مُراوک از پنجره باینری استفاده می‌کند، اگر پیکسلی نویزی باشد در مقدار نهایی شدت روشنایی، اثر زیادی می‌گذارد و ممکن است نقاط گوشه به درستی شناسایی نشوند. شناساگر مُراوک در چهار جهت، مقدار شدت روشنایی را بررسی می‌کند در صورتی که نقاط گوشه، نقاطی است که در همه جهات تغییرات شدت روشنایی آن زیاد باشد. برای برطرف کردن نقاط ضعف شناساگر مُراوک، شناساگر دیگری به نام شناساگر هریس پیشنهاد شده است که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود.

## شناساگر هریس

شناساگر هریس توسط کریس هریس<sup>۸</sup> در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد شد [۳۳]. این شناساگر، برای شناسایی گوشه از یک پنجره دایره‌ای هموار برای مثال پنجره گوسی استفاده می‌کند و سپس با استفاده از بسط تیلور، پنجره را در تمام جهات حرکت می‌دهد و مقدار شدت روشنایی را در تمام جهات بررسی می‌کند. این شناساگر، نسبت به مقیاس تغییرپذیر است یعنی ممکن است یک پیکسل در یک مقیاس تصویر به عنوان گوشه در نظر گرفته شود، اما همان پیکسل در مقیاس دیگر همان تصویر به عنوان گوشه در نظر گرفته نشود. یانگ<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای انطباق تصاویر از الگوریتم هریس برای شناسایی ویژگی‌ها استفاده کردند. ژانگ<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ از الگوریتم هریس برای شناسایی ویژگی‌ها در انطباق غیر سخت تصاویر ریه که با CT گرفته شده‌اند، استفاده کردند [۳۵].

5 Moravec

6 Harris

7 Scale Invariant Feature Transformation (SIFT)

8 Chris Harris

9 Yang

10 Zhang

1 Feature detection

2 Point features

3 Line features

4 Region features

دور SAR پیشنهاد کردند [۳۷]. در این روش از انتشار غیرخطی جهت حفظ جزئیات مهم و ظریف در تصویر و از عملکرد نسبت میانگین وزن شده نمایی برای محاسبه اطلاعات گرادیان و سپس از تجانس فاز برای حذف نقاط پرت استفاده می‌کند. از مزایای این روش، اندازه گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف اندکی تفاوت دارد اما برای تعیین جهت گرادیان معیار مناسبی ندارد. فنگ وانگ<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵، روش تبدیل ویژگی مقیاس ثابت گوسی ناهمسانگرد و فقی<sup>۲</sup> را برای انطباق تصاویر سنجنش از دور SAR پیشنهاد کردند [۳۹]. در این روش، از فیلتر گوسی ناهمسانگرد در فضایی مقیاس SIFT و تطبیق پایداری جهت‌گیری متعادل به ترتیب برای حفظ لبه‌ها و جزئیات مهم تصویر و حذف تطبیق‌های نادرست استفاده می‌کند. در این روش لبه‌ها در تصویر سنجنش از دور SAR حفظ می‌شوند و در نهایت باعث ارتقا دقت انطباق تصویر سنجنش از دور SAR می‌شود اما در این روش اندازه گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف، متفاوت است.

الگوریتم SIFT، در تصاویر سنجنش از دور اپتیکی، دارای دو مشکل اصلی است که عبارت از کنترل‌پذیری پایین آن در تعداد ویژگی‌ها و عدم توجه به کیفیت و توزیع ویژگی‌های استخراج شده می‌باشد [۴۰]. یکی از پارامترهای مؤثر در کنترل تعداد ویژگی‌ها در الگوریتم SIFT، میزان آستانه تمایز ویژگی‌ها ( $T_c$ ) است که به علت حساسیت بسیار بالای آن در تعداد ویژگی‌های نهایی استخراج شده، در تصاویر مناسب نیست. در ضمن به علت عدم توجه این الگوریتم به مسئله توزیع مکانی و توزیع مقیاس ویژگی‌ها در اغلب موارد، پراکندگی ویژگی‌های استخراج شده، نامناسب است. در [۴۱] روشی برای استخراج ویژگی‌های SIFT با توزیع مکانی پیشنهاد شده است که در این روش به جای استخراج اکستریم‌های تصویر DOG در همسایگی ۲۶ تایی خود، همسایگی‌های بزرگ‌تری (۶۶ تایی) پیشنهاد کردند. با وجود مزایای این همسایگی بزرگ‌تر، این روش دارای معایبی نیز می‌باشد. یکی از این معایب این است که احتمال دارد باعث حذف بعضی از ویژگی‌های باکیفیت ولی با ساختار کوچک تصویر شوند. همچنین افزایش پیچیدگی محاسباتی آن نیز، بیشتر از الگوریتم SIFT پایه است. در [۴۲] روش SIFT تکرار شونده را به منظور کاهش تعداد ویژگی‌های SIFT و همچنین کاهش زمان استخراج و تطبیق میان آن‌ها، برای موقعیت‌یابی ربات‌های موبایل توسعه داده‌اند. 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. برای این منظور، در ابتدا یک مجموعه از نمونه‌های تصادفی انتخاب شده و از میان آن‌ها، ویژگی‌هایی که حساب هستند باقیمانده و سایر ویژگی‌ها حذف می‌شوند. سپس ویژگی‌های باقی‌مانده اگر

برای حل مشکل نقطه ضعف ذکر شده شناساگر هریس، یک الگوریتم به نام تبدیل ویژگی مقیاس ثابت پیشنهاد شد. در ادامه به بررسی بیشتر این الگوریتم پرداخته می‌شود.

### الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت

این الگوریتم در سال ۲۰۰۴ توسط لاو جهت انجام فرآیند تشخیص الگو در تصاویر اپتیکی ارائه شده است. الگوریتم SIFT هم شناساگر و هم توصیفگر است که مرحله استخراج ویژگی در آن، خود شامل سه مرحله است: استخراج اکستریم‌های فضای مقیاس، بهبود دقت موقعیت و حذف اکستریم‌های ناپایدار و در آخر تخصیص جهت به هر ویژگی که ایجاد شده است. الگوریتم SIFT دارای محدودیت‌هایی است که برای بهبود دادن این الگوریتم جهت ارتقا دقت انطباق باید به نوع تصویر هم توجه کرد، زیرا انحراف‌هایی که بین تصاویر وجود دارد، با توجه به ماهیت تصاویر ممکن است، متفاوت باشد. در تصاویر سنجنش از دور SAR به دلیل وجود نویز اسپکل و همچنین استفاده از فضای مقیاس گوسی در SIFT باعث می‌شود، اغلب لبه‌ها و جزئیات ظریف در تصویر از بین برود که تأثیر قابل توجهی در تشخیص ویژگی‌ها دارد [۳۶، ۳۷]. برای غلبه بر مشکلات ذکر شده در تصاویر سنجنش از دور SAR، بهبودهایی در الگوریتم SIFT انجام شده است که در ادامه به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود.

فلورا دلینگر<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ جهت بهبود الگوریتم SIFT در تصاویر سنجنش از دور SAR روش SAR-SIFT را معرفی کردند [۳۶]. این روش از دو مرحله کلی تشکیل شده است که ابتدا از روش نسبت به جای روش تفاضل برای محاسبه گرادیان استفاده می‌کند که این سبب می‌شود مقادیر گرادیان در مناطق همگن تحت شرایط بازتاب مختلف فرقی نداشته باشد. سپس برای تطبیق تصاویر سنجنش از دور SAR از یک الگوریتم SIFT مانند استفاده می‌شود که در این الگوریتم، 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<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ روش BFSIFT برای انطباق تصاویر سنجنش از دور SAR را پیشنهاد کردند [۳۸]. در این روش، برای حفظ جزئیات در تصاویر سنجنش از دور SAR فضای مقیاس گوسی ناهمسانگرد جایگزین فضای مقیاس گوسی در الگوریتم SIFT شده است که این فضای مقیاس با استفاده از فیلتر دوطرفه ایجاد شده است. از مزایای این روش، کاهش اثر نویز اسپکل در انطباق تصویر است اما زمان اجرا آن زیاد می‌باشد. جیانوی فن<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ روش تبدیل ویژگی مقیاس ثابت مبتنی بر انتشار غیرخطی و تجانس فاز<sup>۴</sup> را برای انطباق تصویر سنجنش از-

1 Flora Dellinger

2 Wang

3 Jianwei Fan

4 Nonlinear diffusion scale space (NDSS) and Phase Congruency

در نهایت از توصیفگر پیشنهادی AB-SIFT جهت تطبیق تصاویر استفاده می‌شود. این توصیفگر از نظر دقت و ریشه میانگین مربعات خطا از توصیفگرهای دیگر مانند GLOH و BRLSK بهتر است. لی و همکاران [۴۳] و یی و همکاران [۴۴] با استفاده از اصلاح جهت گرادیان نقاط کلیدی و معیار محدودیت مقیاس، تعدادی از تطبیق‌های نادرست را حذف کردند که این امر سبب بهبود الگوریتم SIFT در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور شد. حسن و همکاران از اطلاعات همسایه برای بهبود تطبیق SIFT استفاده کرد [۴۹]. یکی از مشکلات دیگری که در الگوریتم SIFT وجود دارد، نزدیک بودن یا حتی روی هم قرار گرفتن یک سری نقاط کلیدی است که این نقاط غیرضروری باعث تداخل در فرآیند انطباق تصویر می‌شود که در مقاله [۵۰] با ارائه روش RKEM-SIFT سبب حذف نقاط زائد و بهبود فرآیند انطباق تصویر شد. یکی از معایب این روش است که مقدار آستانه را به صورت تجربی در نظر می‌گیرد.

در تصاویر پزشکی که تغییرات محتوا بین تصاویر وجود داشته باشد، این الگوریتم نمی‌تواند تعداد کافی نقاط کلیدی (ویژگی) را شناسایی کند به همین جهت در انطباق تصاویر پزشکی از الگوریتم‌های دیگر جهت شناسایی ویژگی‌ها استفاده می‌شود و از توصیفگر SIFT برای توصیف ویژگی‌ها استفاده می‌شود. مارتین و همکاران در سال ۲۰۰۶ جهت انطباق تصاویر CT، با استفاده شناساگر فرستر<sup>۱</sup> ویژگی‌ها را شناسایی کردند و سپس از توصیفگر SIFT و Shape context جهت توصیف ویژگی‌ها استفاده کردند [۵۱].

#### الگوریتم SURF

الگوریتم SURF توسط هربرت بای<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۶ پیشنهاد شد [۵۲]. SURF هم شناساگر و هم توصیفگر است. این الگوریتم، نسخه توسعه‌یافته الگوریتم SIFT از لحاظ سرعت است و الگوریتم SURF خود شامل چهار مرحله‌ی آشکارسازی نقاط کلیدی، تعیین موقعیت نقاط کلیدی، تخصیص جهت و ایجاد توصیفگر برای نقاط کلیدی است. از آنجایی که وجود اعوجاج‌های هندسی بین تصاویر و تنوع حسگرها سبب می‌شود که ویژگی‌های یک تصویر در تصویر دیگر به‌طور اندک ظاهر شود یا اصلاً ظاهر نشود که در نتیجه باعث تداخل در عملکرد انطباق تصویر می‌شود. جهت بهبود انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور در برابر این مشکلات ذکر شده، ژی لی سانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ از الگوریتم SURF ارتقا یافته و مسیرهای تولید شده از تصاویر لیسازور برای انطباق تصویر سنجنش‌ازدور اپتیکی استفاده کردند [۵۳]. در این روش تعداد تطبیق صحیح بیشتری به دست می‌آید و این روش را می‌توان با سایر مدل‌های تبدیل استفاده کرد. زالسکی<sup>۴</sup> و همکاران

اکسترم باشند به‌عنوان ویژگی SIFT انتخاب می‌شود. این فرآیند تا زمانی که تعداد ویژگی‌های موردنظر استخراج شوند، در یک روند تکراری ادامه می‌یابد. اگرچه این روش می‌تواند باعث کاهش تعداد ویژگی‌ها و کنترل الگوریتم استخراج ویژگی SIFT شود، اما معایبی نیز دارد. یکی از این معایب این است که به دلیل تصادفی بودن استخراج نمونه‌های اولیه، فرآیند استخراج ویژگی ممکن است زمان‌بر شود. توزیع مکانی ویژگی‌ها در نظر گرفته نشده و ممکن است ویژگی‌ها دارای پراکندگی مناسبی نباشند. در مرجع [۴۳] یک روش خود و فقی SIFT برای بهبود عملکرد شناساگر SIFT در جهت بهبود توزیع فضایی پیشنهاد شد. در این روش ضریب بافت محلی برای هر ویژگی محاسبه می‌شود و سپس پنج مقدار آستانه تمایز (۰/۰۵، ۰/۱) در نظر گرفته می‌شود و بر اساس مقدار ضریب بافت محلی، یک مقدار آستانه تمایز برای هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود. برای هر نوع تصویر، تعداد و مقدار آستانه تمایز متفاوت است. صداقت و همکاران در سال ۲۰۱۱ الگوریتم UR-SIFT جهت بهبود انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی پیشنهاد کردند [۴۰]. در الگوریتم UR-SIFT ویژگی‌های استخراج شده هم از نظر توزیع مکانی و مقیاس یکنواخت می‌شوند.

در تصاویر چند مودی سنجنش از دور ماهیت پیچیده‌ی این تصاویر باعث تداخل کارایی الگوریتم SIFT در استخراج یک مجموعه‌ی مناسب از ویژگی‌ها می‌شود. به‌گونه‌ای که در بعضی موارد حجم عظیمی از ویژگی‌ها استخراج شده که علاوه بر زمان‌بر بودن فرآیند تطبیق، باعث شباهت بسیاری از توصیفگرها با یکدیگر و در نتیجه افزایش تطبیق‌های نادرست می‌شود. در بعضی موارد دیگر نیز به علت استخراج تعداد محدودی از ویژگی‌ها عملاً تعداد تطبیق‌های صحیح بسیار کم است. این دلایل ذکر شده، سبب می‌شود که فرآیند انطباق با این الگوریتم با شکست مواجه می‌شود [۴۳، ۴۴]. کارهای زیادی در رابطه با الگوریتم SIFT در تصاویر چند مودی سنجنش از دور انجام شده است [۲، ۴۰، ۴۵]. مورینا و همکاران [۴۶] از فیلترهای هموار کننده مشتق‌گیر مبتنی بر توابع فرد گابور جهت محاسبه‌ی مقادیر گرادیان‌ها، به‌جای تفاضل پیکسل‌ها به منظور افزایش کارایی توصیفگر SIFT استفاده کردند. ونگ و همکاران [۴۷] از ترکیب خطی فاصله منهن به‌جای فاصله اقلیدسی میان توصیفگرها جهت فرآیند تطبیق استفاده کردند. بنیو همکاران [۴۸] یک الگوریتم جست‌وجوی مد مؤثر بر پایه SIFT برای انطباق تصاویر سنجنش از دور اپتیکی پیشنهاد کردند. در این روش، برای حذف نقاط دورافتاده، از جست‌وجوی مد نسبت به مقیاس، اختلاف چرخشی و شیفتهای افقی و قائم بین همه‌ی نقاط کلیدی SIFT استفاده می‌کنند. آقای صداقت و همکاران [۴۵] توصیفگر AB-SIFT برای بهبود تطبیق تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی پیشنهاد کردند. در این روش، ابتدا ویژگی‌ها با استفاده از الگوریتم هسیان آفین شناسایی می‌شوند و سپس برای هر نقطه ویژگی بر اساس روش SIFT یک جهت در نظر گرفته می‌شود و

<sup>1</sup>Forester  
<sup>2</sup>Herbert Bay  
<sup>3</sup>Zhi Li song  
<sup>4</sup>Zalesky

### • ویژگی‌های ناحیه‌ای

نواحی به صورت مرزهای بسته، مخازن آب، دریاچه‌ها، ساختمان‌ها، جنگل‌ها، مناطق شهری یا سایبان‌ها به عنوان ویژگی‌های ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. برای استخراج ویژگی‌های ناحیه‌ای می‌توان از الگوریتم‌های قطعه‌بندی<sup>۸</sup> و شناساگرهای هریس-لاپلاس، هسیان-لاپلاس، هریس-آفین و هسیان-آفین [۶۶]، نواحی خارجی به صورت بیشینه پایدار<sup>۹</sup> [۶۷]، شناساگر اکسترم نواحی پراکنده<sup>۱۰</sup> [۶۸] و شناساگر نواحی مبتنی بر لبه<sup>۱۱</sup> [۶۹] استفاده کرد.

### شناساگر هریس-لاپلاس

این شناساگر توسط میکولاجزیک<sup>۱۲</sup> معرفی شد [۷۰] که به تغییرات مقیاس و چرخش ثابت است و ساختارهای شبیه گوشه‌ها را شناسایی می‌کند. این شناساگر بر پایه دو گام انتخاب موقعیت و مقیاس (اندازه پنجره) برای هر نقطه هریس و انتخاب ویژگی‌های تغییرناپذیر نسبت به مقیاس بر اساس ماکزیمم محلی لاپلاس استوار است. در این روش، ابتدا یک فضای مقیاس برای شناساگر هریس محاسبه می‌شود و سپس نقاطی که یک معیار محلی (لاپلاس) را روی مقیاس‌ها بیشینه می‌کنند را به عنوان ویژگی‌ها انتخاب می‌کند.

### شناساگر هسیان-لاپلاس

این شناساگر به تغییرات مقیاس و چرخش ثابت هستند و ساختارهای شبیه حباب را شناسایی می‌کند [۷۱].

### شناساگر MSER

این شناساگر در برابر تغییرات هندسی و رادیومتری مستقل است و ویژگی‌ها در این شناساگر به صورت منحنی‌های بسته شناسایی می‌شوند. مطابق با تحقیقات [۷۲] شناساگر MSER در برابر شناساگرهای ناحیه‌ای دیگر پایدارتر است.

### شناساگر ESR

این شناساگر توسط وانگ چاو<sup>۱۳</sup> معرفی شد [۶۸]. این شناساگر به تغییرات مقیاس و تغییرات پوشش زمینی ثابت است که در انطباق تصاویر چندمودی SAR استفاده شد.

### شناساگر EBR

این شناساگر در برابر تغییرات مقیاس، زاویه دید و روشنایی مناسب است. برای تصاویر رنگی و تصاویر بافتی هم مناسب است.

در سال ۲۰۱۱ از شناساگر SURF برای انطباق تصاویر پزشکی استفاده کردند [۲۹]. در این روش نقاط ویژگی با استفاده از SURF شناسایی و توصیف می‌شوند. سپس فرآیند تطبیق با استفاده از نزدیک‌ترین همسایه مبتنی بر KD-tree [۵۴] انجام می‌شود. از مزایای آن می‌توان به کاربرد در انطباق تصاویر پزشکی سه‌بعدی اشاره کرد. هونگ<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ الگوریتم انطباق وفقی مبتنی بر SURF را برای تصاویر رنگی استفاده کردند [۵۵]. یکی از معایب این روش، این است که تعداد کل نقاطی را که تطبیق می‌دهد از الگوریتم SURF کمتر است.

در [۵۶] سه شناساگر ویژگی SIFT، SURF، PCA-SIFT [۵۷] برای کاربرد تشخیص الگو، مقایسه شده‌اند. عملکرد این شناساگرها در برابر تغییرات مقیاس، چرخش ثابت بوده و در مقابل دیگر تغییرات نظیر تغییرات روشنایی و تغییرات ناشی از زاویه دید<sup>۲</sup> تصویربرداری تا حد ممکن مستقل است. در تمام آزمایش‌ها، توانایی تطبیق دقیق‌تر SIFT نسبت به SURF نشان می‌دهد، اما SURF دارای سرعت بیشتری است. PCA-SIFT در برابر تغییرات روشنایی و چرخش مزایای برتری دارد.

### • ویژگی‌های خطی

ساختارهای تصویری نظیر خطوط ساحلی، جاده‌ها و رودخانه‌ها و مرزهای نواحی، به عنوان ویژگی خطی در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های معمول تشخیص لبه مانند آشکارساز کنی<sup>۳</sup> و آشکارساز لاپلاس گوسین<sup>۴</sup> برای شناسایی ویژگی خطی به کار می‌روند [۱]. مراحل استخراج خطوط در اغلب شناساگرهای خطی عبارت از هموار کردن<sup>۵</sup> تصویر، اعمال فیلتر لبه‌یاب، تعیین لبه، اتصال لبه‌ها و تعیین خطوط می‌باشند [۵۸]. لن و همکاران [۵۹] از الگوریتم کنی جهت شناسایی ویژگی‌ها در انطباق تصویر استفاده کردند. سای<sup>۶</sup> و همکاران [۶۰] یک الگوریتم جدید جهت شناسایی ویژگی لبه‌ها بر اساس تبدیل موجک پیشنهاد کردند. اینگلد<sup>۷</sup> و همکاران [۶۱] از شناساگر سوبل جهت استخراج ویژگی‌های خطی در انطباق تصاویر چندمودی سنجنش‌ازدور استفاده کردند. لی و همکاران [۶۲] جهت استخراج ویژگی‌ها در تصاویر سنجنش‌ازدور SAR از کانتورها استفاده کردند. علی و همکاران [۶۳] از شناساگر بهبودیافته کنی [۶۴، ۶۵] و استخراج الگوها جهت استخراج ویژگی‌ها در انطباق تصاویر سنجنش‌ازدور SAR و سنجنش‌ازدور اپتیکی استفاده کردند. از مزایای این شناساگر، نسبت به نویز اسپکل تصویر حساس نیست.

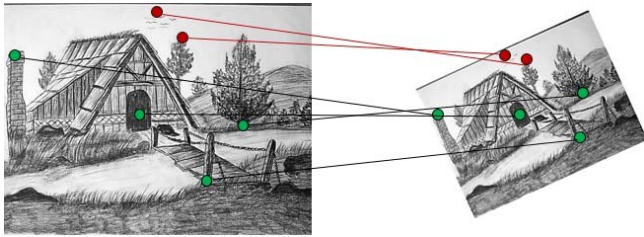
1 Huang  
2 Viewpoint  
3 Canny  
4 Laplacian of Gaussian  
5 Smoothing  
6 Hsieh  
7 Inglada

8 Segmentation  
9 Maximally Stable Extremal Region (MSER)  
10 Extremal Scattering Regions (ESR)  
11 Edge Based Region (EBR)  
12 Mikolajczyk  
13 Wang Chao



## • جمع بندی

توصیفگرها تطبیق یابند [۱، ۳۰]. در ادامه به شرح هر یک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۷ فرآیند تطبیق در تصویر مرجع و حس شده

### ۳-۲-۱- تطبیق بر اساس مقادیر شدت روشنایی

در این روش، مستقیماً از توزیع سطوح خاکستری تصاویر درون پنجره‌هایی با ابعاد یکسان استفاده می‌کنند. بدین منظور، با استفاده از معیارهای مشابهت (تفاوت) مختلف، به‌طور آماری شدت روشنایی دو تصویر مقایسه و موقعیت بیشینه شباهت (کمینه تفاوت) را به‌عنوان موقعیت‌های مشابه تعیین می‌کنند. این روش‌ها خود به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: روش‌های شبه همبستگی<sup>۳</sup> [۷۵]، روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه [۷۶]، روش‌های اطلاعات مشترک<sup>۴</sup> [۷۷]. در ادامه بخش به شرح مختصری از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

#### روش‌های شبه همبستگی

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های مبتنی بر ناحیه، روش‌های شبه همبستگی می‌باشند. در این روش‌ها، میزان شباهت در جفت پنجره‌هایی از تصاویر حس شده و مرجع محاسبه می‌شود و بیشینه شباهت آن‌ها به‌عنوان موارد مشابه باهم تعیین می‌شوند [۱]. این روش در تصاویری که روابط شدت روشنایی بین آن‌ها خطی است، کاربرد دارد. روش شبه همبستگی در انطباق تصاویر با حسگرهای متفاوت مناسب نیست چون روابط شدت روشنایی بین این تصاویر غیرخطی است [۷۸]. جهت حل مشکل ذکر شده، روش‌های مبتنی بر فوریه و اطلاعات مشترک پیشنهاد شدند.

#### روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه

در این دسته از روش‌ها، به محاسبه طیف قدرت متقابل<sup>۵</sup> بین تصاویر مرجع و حس شده پرداخته می‌شود. زمانی که تصاویر به‌وسیله نویز وابسته به فرکانس خراب شوند یا سرعت محاسباتی موردنیاز باشد، از روش‌های فوریه به‌جای روش‌های شبه همبستگی استفاده می‌شود. این روش‌ها، در برابر نویز همبسته و وابسته به فرکانس و اختلافات روشنایی متغیر با زمان و غیریکنواخت مقاوم است [۱].

در این بخش روش‌های شناسایی ویژگی‌ها که شامل روش مبتنی بر ناحیه و روش مبتنی بر ویژگی (شامل سه نوع ویژگی: نقطه‌ای، خطی، ناحیه‌ای) است مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های روش‌های مختلف نشان داد که روش‌های مبتنی بر ناحیه، در تصاویر پزشکی و تصاویری که اطلاعات شدت روشنایی در آن مهم‌تر از اطلاعات ساختاری هست، کاربرد دارد. از طرف دیگر، روش‌های مبتنی بر ویژگی بیشتر در تصاویر سنجش‌ازدور اپتیکی و تصاویری که جزئیات زیادی در آن است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، روش‌های مبتنی بر ویژگی در مقابل روش‌های مبتنی بر ناحیه قابلیت اطمینان بیشتری داشته و در برابر اعوجاج‌های هندسی و رادیومتری عملکرد بهتری دارند [۱].

نوع ویژگی‌های انتخاب‌شده در تصویر بستگی به نوع تصویر و محتوای ویژگی‌های تصویر شده دارد. برای مثال، در تصویری از یک منطقه شهری اغلب شامل خطوط مختلف بوده درحالی‌که در تصویری از یک منطقه طبیعی، اغلب شامل نواحی و منحنی‌ها است. الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت نسبت به شناساگرهای نقطه‌ای دیگر عملکرد بهتری دارند. در [۷۲، ۷۳] شناساگرهای ناحیه‌ای IBR<sup>۱</sup>، EBR<sup>۲</sup>، MSER، شناساگر هریس آفین و هسیان آفین مقایسه شده‌اند که شناساگر MSER در اکثر موارد عملکرد بهتری دارد. شناساگرهای هریس آفین و هسیان آفین نواحی (ویژگی‌های) بیشتری را شناسایی می‌کنند. با توجه به سه نوع ویژگی مختلف در روش‌های مبتنی بر ویژگی، می‌توان نتیجه گرفت ویژگی‌های نقطه‌ای از دیگر ویژگی‌ها پایدارتر می‌باشند؛ یعنی شناساگرهای نقاط ویژگی معمولاً در برابر انحراف‌های هندسی پیچیده بین تصاویر، پایدارتر از شناساگرهای نواحی است [۷۴]. این مزیت ویژگی‌های نقطه‌ای سبب شده که امروزه از این ویژگی بیشتر از دیگر ویژگی‌ها در انطباق تصویر استفاده شود.

### ۳-۲ تطبیق

در بخش قبلی به مسئله شناسایی ویژگی‌ها در تصویر مرجع و حس شده پرداخته شد. پس از شناسایی ویژگی‌ها در دو تصویر لازم است نقاط متناظر بین آن‌ها تعیین شود (یک نمونه تطبیق در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در این شکل نقاط متناظر سبز و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده تطبیق درست و نادرست می‌باشد). این مرحله از مهم‌ترین مراحل فرآیند انطباق تصویر محسوب می‌شود چون مرحله بعدی (برآورد مدل تبدیل) فرآیند انطباق و موفقیت فرآیند انطباق تصویر به میزان زیادی به این مرحله وابسته است. ویژگی‌های شناسایی‌شده در تصویر مرجع و حس شده می‌تواند با استفاده از روش‌های مقادیر شدت روشنایی، روابط فضایی و

3 Correlation-like  
4 Mutual information  
5 Cross-power spectrum

1 Intensity extrema based region  
2 Sensing image

## روش‌های مبتنی بر اطلاعات مشترک

روش‌های مبتنی بر اطلاعات متقابل ابتدا توسط ویولا<sup>۱</sup> [۷۷] معرفی شد. این دسته از روش‌ها، از نظریه اطلاعات منشأ می‌گیرند و در انطباق تصاویر چندمودی کاربرد دارد. برای محاسبه احتمال مشترک، می‌توان از پنجره پارزن<sup>۲</sup> [۷۹] و برآوردهای هیستوگرام<sup>۳</sup> گسسته از توزیع مشترک احتمال [۸۰] و غیره استفاده کرد. محاسبه MI بین دو متغیر تصادفی Y, X بر اساس رابطه (۱) است.

$$MI(X, Y) = H(Y) - H(Y|X) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (1)$$

در این رابطه  $H(X)$  نشان‌دهنده آنتروپی متغیر تصادفی X است. از روش مبتنی بر اطلاعات مشترک، در مقالات مختلفی استفاده شده است که در ادامه به شرح نمونه‌ای از مقالات پرداخته می‌شود.

رحمان خرسندی و همکاران در سال ۱۳۸۹ جهت انطباق تصاویر چندمودی مغز از اطلاعات مشترک استفاده کردند. در این پژوهش از تصاویر سی‌تی‌اسکن و MRI برای انطباق تصویر استفاده شد [۲۸].

علیرضا مهري دهنوی در سال ۱۳۹۱ از روش اطلاعات مشترک برای انطباق تصاویر، تک‌مودی<sup>۴</sup> و چندمودی استفاده کرد. این روش تصاویر تک‌مودی مغز را (سی‌تی‌اسکن با سی‌تی‌اسکن یا MRI با MRI) بهتر از تصاویر چندمودی (سی‌تی‌اسکن با MRI یا MRI با سی‌تی‌اسکن) انطباق می‌دهد [۸۱].

در ادامه به شرح روش‌هایی که بر اساس تطبیق‌های مبتنی بر روابط فضایی هستند، پرداخته می‌شود.

## ۳-۲-۲- تطبیق مبتنی بر روابط فضایی

در تطبیق مبتنی بر روابط فضایی، ابتدا یک مدل هندسی میان ویژگی‌های استخراج شده در دو تصویر مرجع و حس شده تعریف می‌شود و سپس پارامترهای مدل هندسی برآورد می‌شود. در این روش، از اطلاعات فاصله بین نقاط کنترلی (ویژگی) و اطلاعات فضایی توزیع شده بین آن‌ها استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این روش‌ها که از روابط فضایی استفاده می‌کنند به صورت الگوریتم RANSAC<sup>۵</sup> [۸۲]، الگوریتم تطبیق تبدیل گراف [۸۳] و الگوریتم نزدیک‌ترین نقاط تکراری<sup>۶</sup> [۸۴] می‌باشند.

## الگوریتم RANSAC

الگوریتم RANSAC یک روش برآورد مقاوم است که توسط فیشر<sup>۷</sup> در سال ۱۹۸۱ معرفی شد [۸۲]. این الگوریتم جهت

جداسازی زیرمجموعه تطبیق‌های درست و نادرست از یکدیگر و برآورد پارامترهای مدل تبدیل پیشنهاد شد. این الگوریتم در برابر نویز مقاوم و پایدار است اما این الگوریتم محدودیت‌هایی اعم از زمان‌بر بودن، قابل تکرار نبودن، عدم عملکرد مناسب در تصاویری با الگوی تکراری و تصاویر تغییر شکل یافته دارد [۸۵، ۸۶]. الگوریتم RANSAC پایه فقط برای سامانه‌های خطی مناسب است چون از تبدیل خطی برای محاسبه پارامترهای تبدیل استفاده می‌کند. کانگ<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ الگوریتم RANSAC غیرخطی را پیشنهاد کردند [۸۷]. در این الگوریتم، از تبدیل غیرخطی برای محاسبه پارامترهای تبدیل استفاده می‌شود. مارینا<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ روشی بر اساس اطلاعات ساختار برای بهبود الگوریتم RANSAC پیشنهاد کردند [۸۸]. این روش در تعداد تکرار کمتری و زمان اجرای کمتری نسبت به RANSAC می‌تواند دقت بهتری را به دست آورد که از مزایای آن به شمار می‌آید. چینگ<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ برای تطبیق تصاویر سنجش‌ازدور اپتیکی، الگوریتم RANSAC را بهینه کردند [۸۹]. در این روش، در مواقعی که لازم است همه‌ی تطبیق‌های نادرست حذف شوند، مقدار خطای آستانه را، کمینه در نظر می‌گیرند. درحالی‌که در بعضی مواقع به دلیل نداشتن تعداد ویژگی‌های کافی لازم است فقط تطبیق‌های نادرست بارز حذف شوند که در این مورد مقدار خطای آستانه را بیشینه در نظر می‌گیرند. شی<sup>۱۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۳ روشی برای بهبود الگوریتم RANSAC پیشنهاد کردند [۹۰]. در این روش ابتدا نقاط ویژگی که مربوط به منطقه هدف (تصویر شامل شی و پس‌زمینه است و منطقه هدف همان شی می‌باشد که می‌خواهیم تطبیق یابد) نیست و نقاط تلاقی حذف می‌شوند و سپس از الگوریتم RANSAC استفاده می‌شود. یی<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ روش RANSAC سریع را پیشنهاد کردند [۹۱]. در این روش برای محاسبه پارامترهای تبدیل از نقاط تطبیقی که دارای نرخ درست بالایی هستند، استفاده می‌کند. این الگوریتم، از نظر دقت و زمان اجرا نسبت به RANSAC بهبود یافته است. لی<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ روشی برای بهبود الگوریتم RANSAC در تصاویر سنجش‌از-دور SAR<sup>۱۴</sup> پیشنهاد کردند [۹۲]. یو<sup>۱۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ روشی برای بهبود الگوریتم RANSAC پیشنهاد کردند [۹۳]. این روش پیشنهادی شامل سه بخش است و از الگوریتم اجماع نمونه سریع<sup>۱۵</sup> برای به دست آوردن نتایج مقدماتی<sup>۱۶</sup> استفاده می‌کند. از الگوریتم، می‌توان زمانی که نرخ تطبیق‌های درست کم هست، استفاده کرد. سپس، از الگوریتم انتخاب تکراری تطبیق‌های درست

8Kang  
9Marina  
10Cheng  
11Shi  
12Ye  
13Li  
14Yue  
15Fast Sample Consensus (FSC)  
16 Preliminary

1Viola  
2 Parzen window  
3 Discrete histogram

۴ به تصاویری که از یک حسگر اما در زمان‌های متفاوت بدست می‌آیند تصاویر تک‌مودی می‌گویند.

5Random Sample Consensus (RANSAC)  
6 Iterative Closest Point (ICP) algorithm  
7Fischler

گراف در تصاویری با اعوجاج هندسی می‌شود. وندی و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای افزایش تعداد تطبیق‌های درست، از دو مرحله هرس<sup>۶</sup> و بازیابی<sup>۷</sup> در الگوریتم تطبیق تبدیل گراف استفاده کرد[۱۰۲].

### ۳-۲-۳- تطبیق بر اساس توصیفگرها

در این دسته از روش‌ها، بعد از استخراج ویژگی‌ها یک توصیفگر با استفاده از خصوصیات ناحیه‌ای اطراف هر ویژگی ایجاد شده و سپس فرآیند تطبیق با استفاده از یک معیار تفاوت (مانند فاصله اقلیدسی) میان بردارهای مشخصه، انجام می‌گیرد. توصیفگرهای مختلفی وجود دارند که به‌طور کلی می‌توان آن‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد: توصیفگرهای مبتنی بر توزیع<sup>۸</sup>، توصیفگرهای مبتنی بر تکنیک‌های مکان فرکانس<sup>۹</sup> و توصیفگرهای دیفرانسیلی<sup>۱۰</sup> که در ادامه به‌طور مختصر هر کدام از این بررسی می‌شوند.

#### • توصیفگرهای مبتنی بر توزیع

این توصیفگرها از هیستوگرام‌ها برای بیان تفاوت مشخصه‌ها استفاده می‌کنند [۱۰۳] و در برابر انحراف‌های هندسی و خطاهای کوچک در شناسایی نواحی مقاوم هستند. یکی از معایب این دسته از روش‌ها این است که ابعاد این توصیفگرها بزرگ است. نمونه‌ای از توصیفگرهای مبتنی بر توزیع عبارت‌اند از: Spin image [۱۰۴]، Shape context [۱۰۵]، توصیفگر SIFT، توصیفگرهای بهبودیافته SIFT نظیر GLOH<sup>۱۱</sup> و SURF<sup>۱۲</sup> [۵۲]. در ادامه به بررسی توصیفگر Shape context و GLOH پرداخته می‌شود.

#### توصیفگر Shape Context [۱۰۵]

توصیفگر shape context توسط بلوچی<sup>۱۳</sup> در سال ۲۰۰۲ معرفی شد. این توصیفگر مشابه توصیفگر SIFT است، اما مبتنی بر لبه‌ها است. این توصیفگر یک هیستوگرام سه‌بعدی از موقعیت‌ها و جهت‌های نقطه لبه است و در این توصیفگر لبه توسط شناساگر کنی استخراج می‌شود و این یک توصیفگر ۳۶ بعدی است [۱۰۳]. مارتین<sup>۱۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۶ از توصیفگر SIFTshape context، برای انطباق تصاویر سی‌تی‌اسکن ریه استفاده کردند [۵۱].

#### توصیفگر GLOH

توصیفگر GLOH توسط براون<sup>۱۵</sup> در سال ۲۰۰۲ معرفی شد

برای افزایش تطبیق‌های درست استفاده می‌شود چون الگوریتم RANSAC تعداد تطبیق‌های درست را افزایش نمی‌دهد و پس‌از آن الگوریتم، از یک مقدار خطای آستانه برای حذف تطبیق‌های نادرست استفاده می‌شود. این روش پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد. یکی دیگر از معایب الگوریتم RANSAC، این است که مقدار خطای آستانه به‌صورت تجربی در نظر گرفته می‌شود که در [۹۴] مقدار خطای آستانه بر اساس میانگین فاصله بین مدل تبدیل و نقاط تطبیق به‌صورت وقتی محاسبه شده است. این روش در تصاویری که دارای الگوهای تکراری هستند و تصاویر بافتی، مناسب نیست. در [۹۵] مقدار خطای آستانه بر اساس مسئله طبقه‌بندی، وقتی در نظر می‌گیرد. در [۹۶] روشی برای تعیین مقدار خطای آستانه ارائه شد که می‌تواند در تصاویری که الگوی مشابه یا جزییات بافتی کمتری است هم عملکرد مناسبی داشته باشد.

#### الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری<sup>۱</sup>

الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری در سال ۱۹۹۲ توسط بسل معرفی شد [۸۴]. یکی از کاربردهای آن در انطباق تصاویر سه‌بعدی است. یانگ<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای انطباق تصاویر شبکه‌ای از الگوریتم نزدیک‌ترین نقطه تکراری خود راه‌انداز دوگانه تعمیم‌یافته<sup>۳</sup> استفاده کردند [۹۷]. این الگوریتم برای انطباق تصاویر چند مودی که تغییرات روشنایی در آن غیرخطی است، مناسب نمی‌باشد. لینگ<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای انطباق تصاویر چند مودی، این الگوریتم را بهبود دادند [۵]. این روش برای انطباق تصاویر چند مودی که دارای تغییرات شدت روشنایی غیرخطی می‌باشند، مناسب است.

#### الگوریتم تطبیق تبدیل گراف

الگوریتم تطبیق تبدیل گراف، توسط وندی<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۶ معرفی شد [۹۸] که این یک الگوریتم تکرارشونده است و از روابط فضایی نقاط تطبیق استفاده می‌کند. این الگوریتم در فرآیند انطباق تصویر [۹۹] و در تطبیق تصاویر پزشکی [۱۰۰] و در تشخیص چهره [۱۰۱] کاربرد دارد. این الگوریتم برای تصاویری که دارای الگوهای تکراری‌اند، تصاویر تغییر شکل یافته و تصاویر پزشکی که در بافت نرم‌اند مناسب است اما این الگوریتم در برابر تصاویر نویزی و اعوجاج‌های هندسی بین تصاویر عملکرد مناسبی ندارد [۹۸, ۹۹]. آزادی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از فاصله‌ی زاویه‌ای به‌جای فاصله خطی، بهبودی در این الگوریتم انجام دادند [۹۹]. این روش سبب بهبود الگوریتم تطبیق تبدیل

6 Pruning

7 Recovering

8 Distribution- based descriptors

9 Spatial-frequency techniques

10 Differential descriptors

11 Gradient location-orientation Histogram (GLOH)

12 Speed Up Robust Feature (SURF)

13 Belongie

14 Martin urschler

15 Brown

1 Iterative closest point (ICP) algorithm

2 Yang

3 Generalized dual-bootstrap Iterative (GDB-ICP)

4 Ling tsai

1 Wendy

تولید فیلتر گابور، مجموعه‌ای از فیلترها به دست می‌آید که به آن‌ها بانک فیلتر گابور گفته می‌شود.

### موجک

در سال ۱۹۸۷، موجک‌ها به‌عنوان مبنایی برای روش قدرتمند جدید در تحلیل و پردازش سیگنال، به نام نظریه چند دقتی<sup>۴</sup> پیشنهاد شدند [۱۰۹، ۱۱۰]. موجک‌ها برخلاف تبدیل فوریه دارای فرکانس متغیر و طول عمر محدودی می‌باشند. این تبدیل، کار فشرده‌سازی، انتقال و تحلیل تصاویر را آسان‌تر می‌کند.

### • توصیفگرهای دیفرانسیلی

در این توصیفگرها از مشتق‌های تصویر برای توصیف استفاده می‌کنند. فیلترهای Steerable و complex نمونه‌ای از این توصیفگرها است [۱۱۱، ۱۱۲].

### • جمع‌بندی

در این بخش روش‌های کلی تطبیق تصویر که شامل تطبیق بر اساس مقادیر شدت روشنایی، تطبیق مبتنی بر توصیفگرها و تطبیق مبتنی بر روابط فضایی است مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های مبتنی بر اطلاعات مشترک از میان دیگر روش‌های تطبیق مبتنی بر مقادیر روشنایی مقاوم‌تر است چون این روش تنها از رابطه آماری بین تصاویر استفاده می‌شود [۲۷، ۱۱۳]. روش‌های مبتنی بر مقادیر شدت روشنایی توانایی تطبیق با دقت بسیار بالایی دارند [۵۸] اما این روش ضعف‌هایی نیز دارند. یکی از محدودیت‌های اصلی این روش‌ها این است که تصویر مرجع و حس شده باید تا حد زیادی دارای توابع شدت روشنایی مشابه یا یکسانی باشند یا حداقل از نظر آماری وابسته باشند [۱]. این روش‌ها، تنها برای تصاویر با اعوجاج کم (اختلاف مقیاس، چرخش، تغییر زاویه کم میان تصاویر) مناسب هستند. نویز، تغییرات روشنایی و تصاویر گرفته‌شده از حسگرهای متفاوت باعث تغییراتی در میزان شدت روشنایی تصویر می‌شود که در این نوع تصاویر، روش‌های مبتنی بر مقدار شدت روشنایی مناسب نیست، چون این روش‌ها حساسیت زیادی به تغییرات روشنایی دارند. الگوریتم RANSAC یکی از روش‌های تطبیق مبتنی بر روابط فضایی است که امروزه به‌طور گسترده از آن استفاده می‌شود. روش‌های مبتنی بر روابط فضایی، زمانی استفاده می‌شوند که ویژگی‌های شناسایی شده مبهم باشند یا همسایه‌های آن‌ها از نظر محلی دارای اعوجاج باشند [۱]. روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیفگرها به‌آسانی پیاده‌سازی می‌شود، اما زمانی که ویژگی‌ها، توصیفگرها یا شکل‌های مشابهی داشته باشند، ممکن است با شکست مواجه شوند. عملکرد توصیفگرها به نوع تصویر هم بستگی دارد که در تصاویر بافتی<sup>۵</sup>، توصیفگر SIFT و در تصاویر ساختاری<sup>۶</sup>، توصیفگر GLOH بهترین عملکرد دارند. در روش تطبیق مبتنی بر توصیفگرها، توصیفگرهای مبتنی بر روابط فضایی

که یک توصیفگر توسعه‌یافته از SIFT است و برای افزایش تمایز و مقاوم بودن طراحی شده است. توصیفگر GLOH برای یک شبکه موقعیت Log-polar با سه سلول در جهت شعاع (با شعاع‌های ۶ و ۱۱ و ۱۵) و ۸ سلول در جهت زاویه‌ای محاسبه می‌شود که ۱۷ سلول موقعیت را نتیجه می‌دهد. باید توجه داشت که سلول مرکزی در جهت زاویه‌ای تقسیم نمی‌شود و جهت‌های گرادینان در ۱۶ سلول چندی<sup>۱</sup> می‌شود سپس توصیفگر با ۲۷۲ بعد به دست می‌آید. با آنالیز مؤلفه‌ی اصلی<sup>۲</sup> اندازه این توصیفگر به ۱۲۷ کاهش می‌یابد [۴۵، ۱۰۳].

### • توصیفگرهای مکان فرکانس

این توصیفگرها از محتوای فرکانسی یک تصویر برای توصیف استفاده می‌کنند. تبدیل فوریه یکی از انواع توصیفگرها است که محتوای تصویر را در داخل توابع پایه تجزیه می‌کند اما روابط فضایی بین نقاط واضح نیست و توابع پایه نامحدود هستند؛ بنابراین برای وفق دادن رویکردهای محلی مناسب نیست. نمونه‌های دیگر از این توصیفگرها فیلترهای گابور<sup>۳</sup> و موجک [۱۰۶] هستند که بر مشکلات ذکرشده در تبدیل فوریه غلبه یافتند، اما تعداد زیادی از این فیلترها برای توصیف تغییرات کوچک در فرکانس لازم است.

### فیلترهای گابور

فیلتر گابور با موجک گابور در ارتباط است. موجک گابور حاصل ترکیب یک موج سینوسی با پوش گوسی است. فیلتر گابور از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۰۷، ۱۰۸].

$$g(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi) = g_R(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi) + jg_I(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi) \quad (2)$$

در این رابطه  $g_R(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi)$  بخش حقیقی فیلتر گابور و  $g_I(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi)$  بخش موهومی فیلتر گابور می‌باشند. بخش حقیقی فیلتر گابور مطابق رابطه (۳) و بخش موهومی فیلتر گابور مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱۰۷، ۱۰۸].

$$g_R(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi) = \frac{\gamma}{\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x_I^2 + \gamma^2 y_I^2}{2\sigma^2}} \cos\left(\sqrt{2}\pi \frac{x_I}{\lambda} + \phi\right) \quad (3)$$

$$g_I(x, y, \lambda, \sigma, \gamma, \theta, \phi) = \frac{\gamma}{\sqrt{\pi}\sigma} e^{-\frac{x_I^2 + \gamma^2 y_I^2}{2\sigma^2}} \sin\left(\sqrt{2}\pi \frac{x_I}{\lambda} + \phi\right) \quad (4)$$

در این روابط  $x, y$  مختصات یک نقطه از تصویر،  $\theta$  زاویه چرخش فیلتر گابور،  $\phi$  فاز آفست است که تقارن تابع گابور را نشان می‌دهد.  $\sigma$  طول پوش تابع گوسی،  $\gamma$  نرخ نمودار فضایی و  $\lambda$  طول موج است. در تولید فیلترهای گابور، بعضی از این پارامترها نقش مهم‌تری ایفا می‌کنند که آن‌ها را پارامترهای مؤثر بر تولید فیلتر گابور می‌نامیم. با دادن مقادیر مختلف به پارامترهای مؤثر بر

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

### ۳-۳-۳- تبدیل شباهت<sup>۵</sup>

وقتی تصویر حس شده از نظر حرکت انتقالی، چرخش و مقیاس با تصویر مرجع متفاوت باشد، از این نوع تبدیل استفاده می‌شود. در این نوع تبدیل حداقل نیاز به دو جفت نقطه تطبیق است که روابط بین آن‌ها را می‌توان مطابق رابطه (۹) نوشت [۱۱۴].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & h \\ 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۹)$$

### ۳-۳-۴- تبدیل آفین<sup>۶</sup>:

وقتی تصاویر از نظر مقیاس، حرکت انتقالی، چرخش و برش<sup>۷</sup> باهم متفاوت باشند، از این تبدیل می‌توان استفاده کرد. برای تبدیل آفین حداقل نیاز به سه جفت تطبیق است [۱۱۴]. روابط بین نقاط تطبیق در تصاویر را می‌توان مطابق رابطه (۱۰) نوشت [۱۱۴].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & h \\ 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & 0 \\ \beta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

### ۳-۳-۵- تبدیل پرسپکتیو

این تبدیل، زمانی استفاده می‌شود که یک صحنه (تصویر) منحرف شود. در این تبدیل خطوط مستقیم، مستقیم باقی می‌ماند و خطوط موازی به سمت نقاط تلاقی همگرا می‌شود. تبدیل پرسپکتیو نیاز دارد که خطوط مستقیم در تصویر مرجع و تصویر حس شده مستقیم باقی بماند. این تبدیل در انطباق تصاویر دوبعدی به سه‌بعدی کاربرد دارد [۷].

### ۳-۳-۶- تبدیل غیر سخت<sup>۸</sup>

این تبدیل برای تصاویری که علاوه بر چرخش، حرکت انتقالی، تغییر مقیاس و برش، دارای تغییر شکل هم باشند، استفاده می‌شود [۷]. این تبدیل در تصاویر پزشکی برای بافت‌های نرم بسیار کاربرد دارد و این تبدیل خود به چند دسته تقسیم می‌شود که نمونه‌های از آن‌ها به صورت B-spline [۱۱۷]، Thin-plate [۱۱۸]، Elastic [۱۱۹]، Fluid [۱۲۱] غیره می‌باشند.

از جمله توصیفگر SIFT و توصیفگر GLOH نسبت به توصیفگرهای دیگر از دقت تطبیق بالاتری برخوردار هستند اما توصیفگرهای ديفرانسیلی از جمله توصیفگر complex پایین‌ترین عملکرد دارند.

### ۳-۳- برآورد مدل تبدیل<sup>۱</sup>

پس از تطبیق ویژگی، تابع نگاشت (تبدیل)<sup>۲</sup> ایجاد می‌شود که باید تصویر حس شده را برای قرار دادن روی تصویر مرجع تغییر شکل دهد. کاری که در این مرحله انجام می‌شود، عبارت از انتخاب نوع تابع نگاشت و برآورد پارامترهای آن است. با توجه به نوع تصاویر و انحراف‌هایی که در بین تصاویر وجود دارد، یک نوع تبدیل برای انطباق انتخاب می‌شود که در ادامه، به شرح هر یک از این تبدیل‌ها پرداخته می‌شود.

### ۳-۳-۱- تبدیل انتقالی<sup>۳</sup>

این نوع تبدیل هنگامی استفاده می‌شود که تصویر حس شده تنها از جهت حرکت انتقالی با تصویر مرجع متفاوت باشد. در این نوع تبدیل دوبعدی حداقل نیاز به یک جفت نقطه تطبیق می‌باشد و روابط بین نقاط تطبیق مطابق رابطه (۵) است [۱۱۴].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & h \\ 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۵)$$

همچنین، تبدیل انتقال سه‌بعدی مطابق رابطه (۶) است [۱۱۵].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & h \\ 0 & 1 & 0 & k \\ 0 & 0 & 1 & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

### ۳-۳-۲- تبدیل سخت<sup>۴</sup>:

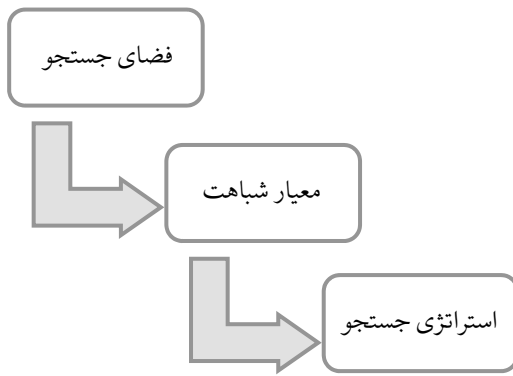
وقتی تصویر حس شده از نظر حرکت انتقالی و چرخش با تصویر مرجع متفاوت باشد از این تبدیل استفاده می‌شود. برای این تبدیل در حالت دوبعدی حداقل نیاز به دو جفت نقطه تطبیق است که روابط بین نقاط تطبیق در تصاویر را می‌توان مطابق رابطه (۷) نوشت [۱۱۴].

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & h \\ 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۷)$$

روابط بین نقاط تطبیق در تبدیل سخت سه‌بعدی می‌توان مطابق رابطه (۸) محاسبه کرد [۱۱۶].

5 Similarity  
6 Affine  
7 Shearing  
8 Non-rigid

1 Transform model estimation  
2 Mapping function  
3 Translation  
4 Rigid



شکل ۸. دیاگرام انطباق مبتنی بر ناحیه

### ۳-۵- نمونه برداری مجدد تصویر و انطباق دو تصویر<sup>۱۲</sup>

تصویر حس شده با استفاده از یک روش درونیابی مناسب، در فضای تصویر مرجع، نمونه برداری مجدد می‌شود. روش‌های متداول برای این منظور، نزدیک‌ترین همسایه<sup>۱۳</sup> و درونیابی دوخطی<sup>۱۴</sup> می‌باشند [۱].

### ۴. دسته‌بندی روش‌های انطباق

واندن السن و همکاران در سال ۱۹۹۳، یک دسته‌بندی برای انطباق تصویر انجام دادند که این دسته‌بندی بر اساس نه معیار، ابعاد، ماهیت انطباق، ماهیت تبدیل، دامنه تبدیل، فرآیند بهینه‌سازی، مودالیت‌ها، تعامل، موضوع و شیء است. این دسته‌بندی، یک دسته‌بندی پایه برای انطباق تصاویر است که برای افراد مبتدی که می‌خواهند با این موضوع آشنا شوند، بسیار حائز اهمیت است اما برای محققانی که می‌خواهند در این زمینه فعالیت داشته باشند، لازم است یک دسته‌بندی جدیدی ارائه شود. شکل ۹، دسته‌بندی جدید بر اساس نوع تطبیق است. در این دسته‌بندی ابتدا بر اساس نوع تصاویر و انحراف‌های بین تصاویر یکی از رویکردهای تطبیق (مبتنی بر ناحیه، مبتنی بر ویژگی) استفاده می‌شود. سپس بر اساس کاربردی (موزاییک تصویر، شناسایی تغییرات) که مدنظر هست، یکی از روش‌های تطبیق (شبه همبستگی، تطبیق تبدیل گراف، SIFT و.....) انتخاب می‌شود. زیرا در برخی از کاربردها لازم است، روشی با پیچیدگی محاسبات کمتر استفاده شود اما در بعضی کاربردها لازم است از روشی استفاده شود که دارای بالاترین دقت باشد.

### ۵. معیارهای ارزیابی در فرآیند انطباق تصویر

در فرآیند انطباق تصویر، صرف‌نظر از نوع تصاویر و روش‌های انطباق استفاده شده خطاهایی نیز ممکن است وجود داشته باشد که سبب کاهش دقت انطباق می‌شود. در ادامه به شرح هر یک از این انواع خطا پرداخته می‌شود.

12 Image resampling and transformation  
13 Nearest neighbor  
14 Bilinear interpolation

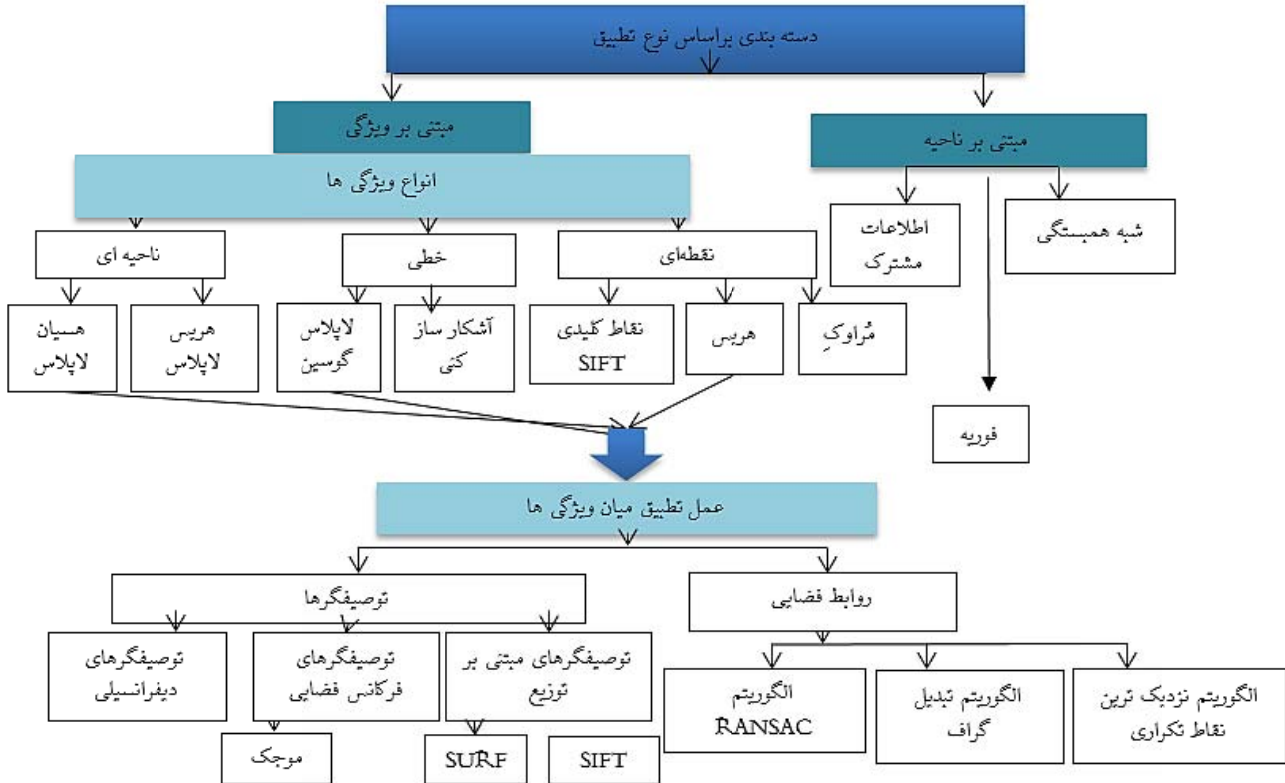
### ۳-۴- بهینه‌سازی

در این مرحله، با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، پارامترهای تابع تبدیل بهینه که برای هم‌ترازی تصاویر ضروری است را به دست می‌آورند. تکنیک‌های بهینه‌سازی به‌طور کلی به دو دسته محلی<sup>۱</sup> و فرامحلی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند [۱۲۲، ۱۲۳]. الگوریتم‌های محلی قدرت کاوش بالایی دارند و به‌خوبی می‌توانند کل فضای جستجو را به دنبال بهینه‌های جستجو کرده و به بهینه سراسری برسند. بهینه‌سازهای محلی ممکن است به‌جای بهینه سراسری، بهینه محلی را پیدا کنند که از معایب این بهینه‌سازها به‌شمار می‌رود. روش پاول<sup>۳</sup> [۱۲۴]، روش ساده<sup>۴</sup>، گرادیان نزولی<sup>۵</sup> [۱۲۵]، گرادیان مزدوج<sup>۶</sup> [۱۲۶] ولونبرگ-مارکورات<sup>۷</sup> [۱۲۷] نمونه‌ای از روش‌های بهینه‌سازی محلی است که این روش‌ها زمان اجرای کمتری دارند. در [۱۲۸] سه روش گرادیان نزولی، لونبرگ-مارکورات و گرادیان مزدوج جهت انطباق تصویر الاستیک مقایسه شده‌اند که نشان می‌دهد روش لونبرگ-مارکورات عملکرد بهتری دارد. الگوریتم وراثتی [۱۲۹] و سایر الگوریتم‌های تکاملی [۱۲۳] و تیرید شبیه‌سازی شده<sup>۸</sup> [۱۳۰] نمونه‌ای از روش‌های فرامحلی می‌باشند. روش‌های بهینه‌ساز فرامحلی دارای سرعت پایین هستند و در انطباق تصاویر پزشکی زیاد مناسب نیستند [۱۲۳]. در [۱۳۱] الگوریتم وراثتی و الگوریتم تیرید شبیه‌سازی شده جهت انطباق تصویر شبکه‌ی مقایسه شده‌اند که در آن نشان می‌دهد الگوریتم وراثتی از نظر نرخ همگرایی و سرعت عملکرد بهتری دارد. تکنیک‌های بهینه‌سازی در روش‌های انطباق مبتنی بر ناحیه به‌عنوان یکی از مراحل اصلی انطباق است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، ابتدا در مرحله فضای جستجو<sup>۹</sup> بر اساس نوع اعوجاج تصاویر، تبدیلی مناسب برای هم‌ترازی انتخاب می‌شود که نمونه از تبدیلات مورد استفاده تبدیل آفین و چندجمله‌ای است. سپس در مرحله معیار شباهت<sup>۱۰</sup>، یکی از روش تطبیق مبتنی بر ناحیه جهت تناظریابی بین تصاویر انتخاب می‌شود که ضرایب همبستگی و اطلاعات مشترک نمونه‌ای از این معیار است. در نهایت در مرحله راهبرد جستجو<sup>۱۱</sup> با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی، فرآیند تطبیق بین تصاویر را بهینه می‌کند که در این مرحله می‌توان از بهینه‌سازهای محلی یا بهینه‌سازهای فرامحلی جهت بیشینه کردن معیار شباهت برای انطباق استفاده کرد [۱۲۲]. تکنیک بهینه‌سازی در روش‌های انطباق مبتنی بر ویژگی به‌عنوان یک مرحله ضروری نیست.

1 Local optimization  
2 Global optimization  
3 Powell's method  
4 Simplex method  
5 Gradient descent  
6 Conjugate gradient  
7 Levenberg-Marquardt  
8 Annealing simulated  
9 Search space  
10 Similarity metric  
11 Search strategy

می‌نامند. خطای تطبیق منجر به شکست فرآیند انطباق تصویر می‌شود که باید از آن اجتناب کرد [۴].  
خطای هم تراز: تفاوت بین مدل نگاشت استفاده شده برای انطباق و انحراف هندسی واقعی بین تصویر را خطای هم‌ترازی می‌نامند. خطای هم تراز در عمل، همیشه به دو دلیل مختلف وجود دارد. نوع مدل نگاشت انتخاب شده ممکن است مشابه با تحریف واقعی نباشد یا پارامترهای مدل به دقت محاسبه نشود. با توجه به خطاهایی که بیان شد، برای ارزیابی دقت روش‌های انطباق از معیارهای گوناگونی استفاده می‌شود که در اینجا تعدادی از این معیارهای ارزیابی رایج معرفی می‌شوند.

خطای محلی: تغییر مکان مختصات نقاط کنترلی (ویژگی) که ناشی از شناسایی نادرست است را خطای محلی می‌نامند [۴].  
خطای محلی را می‌توان با الگوریتم شناسایی ویژگی بهینه کاهش داد، اما معمولاً توازن بین تعداد نقاط کنترلی منتخب (ویژگی) شناسایی شده و میانگین خطای محلی وجود دارد. بعضی مواقع لازم است، تعداد نقاط کنترلی بیشتری با خطای محلی بیشتری به جای تعداد اندکی نقاط کنترلی با دقت بیشتری شناسایی شود.  
خطای تطبیق: تعداد تطبیق‌های نادرست که در زمان ایجاد تطابق، بین نقاط کنترلی منتخب (ویژگی) به وجود می‌آید را خطای تطبیق



شکل ۹ دسته‌بندی فرآیند انطباق تصویر بر اساس نوع تطبیق

این معیارهای پایه، به صورت دستی و بر اساس ایجاد ماتریس ارتباط به دست می‌آید. از این معیارهای پایه برای ارزیابی روش‌های انطباق کمتر استفاده می‌شود چون محاسبه ماتریس ارتباط بسیار زمان‌بر است. در پیوست مقاله، طریقه محاسبه این معیارها بررسی شده‌اند.

• نرخ مثبت صحیح<sup>۵</sup>

رابطه‌ی (۱۱) نرخ مثبت صحیح است که در این رابطه TP مثبت صحیح است که در بخش معیارهای پایه بررسی شد و P هم تعداد تطبیق‌هایی است که بین آن‌ها ارتباط درستی برقرار شده است که براساس رابطه (۱۲) به دست می‌آید [۱۳۲].

$$TPR = \frac{TP}{P} \quad (11)$$

• معیارهای پایه

- ابتدا چهار معیار پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد که در اکثر معیارهای اصلی ارزیابی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.
- الف. مثبت صحیح<sup>۱</sup>: تعداد تطبیق‌هایی که به درستی ارتباط داده شده‌اند.
  - ب. مثبت اشتباه<sup>۲</sup>: تعداد تطبیق‌هایی که به اشتباه ارتباط داده شده‌اند.
  - ج. منفی صحیح<sup>۳</sup>: تعداد تطبیق‌هایی که به درستی ارتباط داده نشده‌اند.
  - د. منفی اشتباه<sup>۴</sup>: تعداد تطبیق‌هایی که به اشتباه ارتباط داده نشده‌اند.

1 True positive (TP)

2 False positive (FP)

3 True negative (TN)

4 False negative (FN)

5 True positive rate

بیشینه شدت روشنایی در تصویر مرجع است و RMSE ریشه میانگین خطا می‌باشد [۱۳۶].

$$PSNR = 20 \log \frac{I_{\max}}{RMSE} \quad (19)$$

#### • کیفیت توزیع

برای ارزیابی کیفیت توزیع هم‌ترازی نقاط، از دو معیار می‌توان استفاده کرد. معیار اول در [۱۳۷] معرفی شد و براساس خصوصیات هندسی مثلث Delaunay است و معیار دوم براساس آنالیز فاصله نقاط کلیدی می‌باشد [۱۳۸, ۴۰]. در ادامه به شرح هر یک از این معیارها پرداخته می‌شود.

#### معیار D

رابطه‌ی (۲۰) معیار ارزیابی کیفیت توزیع است که نشان‌دهنده توزیع یکنواختی نقاط تطبیق است. در این رابطه  $n$  تعداد کل مثلث‌های Delaunay و  $A_i$ ،  $\max(j_i)$  به ترتیب منطقه و بیشینه زاویه  $i$  امین مثلث است.  $\bar{A}$  میانگین مناطق همه مثلث می‌باشد که مطابق رابطه (۲۱) به دست می‌آید [۱۳۷, ۴۰].

$$D = D_A \times D_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{\bar{A}} - 1 \right)^2}{n-1}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - 1)^2}{n-1}} \quad (20)$$

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (21)$$

$$S_i = \frac{3 \max(j_i)}{\pi}$$

#### معیار S<sub>cat</sub>

این معیار بیان‌کننده‌ی کیفیت توزیع هم‌ترازی نقاط است که در این معیار، ابتدا فاصله هر نقطه‌ی کلیدی نسبت به دیگر نقاط کلیدی باقیمانده محاسبه می‌شود و سپس میانه فاصله به دست آورده می‌شود. در نهایت از میانگین میانه فاصله جهت ارزیابی کیفیت توزیع استفاده می‌شود. براساس [۱۳۸] داشتن میانگین میانه‌ها که از ۹۵ درصد نصف میانگین ابعاد تصویر بزرگ‌تر باشد، یک توزیع خوب را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی روش‌های تطبیق و انطباق، افزایش معیارهای مثبت صحیح، نرخ مثبت صحیح، دقت تطبیق، نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها و PSNR و کاهش مثبت اشتباه، نرخ مثبت اشتباه، ریشه میانگین مربعات خطا و معیار D نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش‌ها است.

## ۶ آزمایش‌ها

در این بخش، چهار مجموعه آزمایش انجام می‌شود که در مجموعه اول عملکرد انطباق روش‌های مبتنی بر ناحیه [۱۳۹] با روش‌های مبتنی بر ویژگی [۵۲]، در مجموعه دوم عملکرد تطبیق الگوریتم SIFT [۳۴]، A<sup>2</sup>SIFT [۴۳]، SURF [۵۲] بررسی می‌شود. سپس در مجموعه سوم و مجموعه چهارم به ترتیب، عملکرد تطبیق با استفاده از روابط فضایی، عملکرد تطبیق تصاویر چندمودی سنجش‌ازدور با الگوریتم SIFT [۳۴]

$$P = TP + FN \quad (12)$$

#### • نرخ مثبت اشتباه<sup>۱</sup>

رابطه‌ی (۱۳) نرخ مثبت اشتباه است که در این رابطه FP مثبت اشتباه و TN منفی اشتباه می‌باشد که در بخش معیارهای پایه بررسی شد و  $N$  هم تعداد تطبیق‌هایی است که در بین آن‌ها ارتباط نمی‌باشد و براساس رابطه (۱۴) به دست می‌آید [۱۳۲].

$$FPR = \frac{FP}{N} \quad (13)$$

$$N = FP + TN \quad (14)$$

#### • دقت تطبیق<sup>۲</sup>

رابطه‌ی (۱۵) مربوط به دقت تطبیق است که در این رابطه  $M$  تعداد تطبیق‌های صحیح و  $M$  تعداد کل تطبیق‌های انجام‌شده می‌باشد [۱۳۳].

$$\text{precision} = \frac{TM}{M} \quad (15)$$

#### • نرخ تطبیق‌های نادرست

رابطه‌ی (۱۶) مربوط به نرخ تطبیق‌های نادرست است که در این رابطه  $FM$  تعداد تطبیق‌های نادرست و  $M$  تعداد کل تطبیق‌های انجام‌شده می‌باشد [۹۴].

$$FMR = \frac{FM}{M} \quad (16)$$

#### • نرخ تکرارپذیری ویژگی

رابطه‌ی (۱۷) مربوط به نرخ تکرارپذیری ویژگی است که در این رابطه  $TM$  تعداد تطبیق‌های صحیح و  $N_{ref}$ ،  $N_{sens}$  به ترتیب، تعداد ویژگی‌های شناسایی‌شده در تصویر مرجع و حس شده می‌باشند [۱۳۴].

$$F_t = \frac{TM}{\min(N_{ref}, N_{sens})} \quad (17)$$

#### • ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup>

برای محاسبه‌ی ریشه میانگین مربعات خطا می‌توان از تمام مختصات نقاط تطبیق یا تعدادی از این مختصات استفاده کرد و این معیار از رابطه‌ی (۱۸) به دست می‌آید [۱۳۵].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum ((x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2)}{n}} \quad (18)$$

که در این رابطه  $x$  و  $y$  مختصات نقاط کلیدی در تصویر مرجع  $x'$  و  $y'$  مختصات نقاط کلیدی تبدیل یافته است که  $n$  تعداد کل تطبیق‌ها یا تعدادی از تطبیق‌ها می‌باشد.

#### • PSNR

رابطه‌ی (۱۹) مقدار PSNR است که در این رابطه  $I_{\max}$  مقدار

1 False positive rate

2 precision

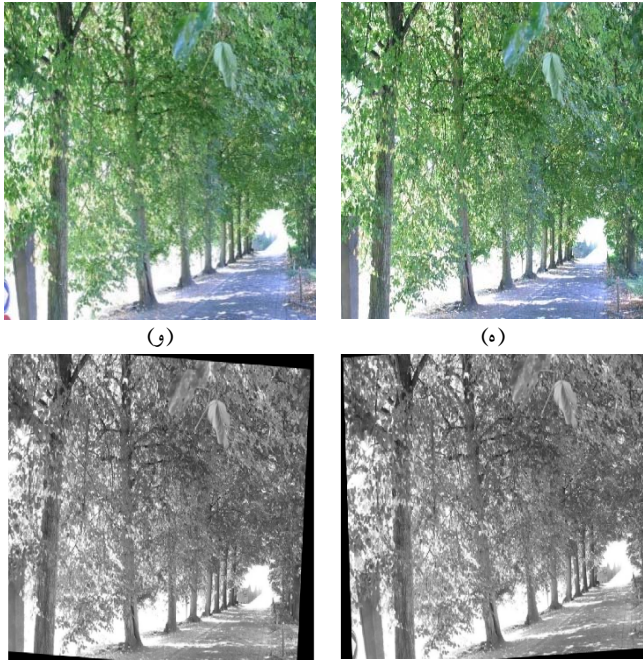
3 Root-mean square error (RMSE)



و SRSIFT [۱۴۰] بررسی می‌شود. در الگوریتم SIFT مقدار آستانه TC جهت استخراج تعداد ویژگی‌های مناسب مطابق به پیشنهاد لا و ۰/۰۱ و مقدار آستانه  $T_{ED}$  در این الگوریتم جهت حذف تطبیق‌های نادرست مطابق به پیشنهاد لا و ۰/۸ در نظر گرفته شد. در الگوریتم  $A^2SIFT$  پنج مقدار آستانه کنتراست مطابق به پیشنهاد لنگا (۰/۰، ۰۱/۰۵) در نظر گرفته می‌شود. مقدار خطای آستانه در الگوریتم RANSAC مطابق به [۱۴۱]، ۱ در نظر گرفته می‌شود. معیارهای ارزیابی در این آزمایش‌ها، نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها، RMSE، دقت تطبیق، نرخ مثبت صحیح و معیارهای بصری است. این روش‌ها بر روی کامپیوتر شخصی با مشخصات Intel corei 5 Duo 2، 27GHz با ظرفیت حافظه ۴ گیگابایت RAM و با نرم‌افزار MATLAB 2015 a اجرا شد.

### ۶-۱- بررسی عملکرد روش‌های مبتنی بر ویژگی بر ناحیه روش‌های مبتنی بر ناحیه

در این بخش جهت مقایسه عملکرد انطباق در روش‌های مبتنی بر ناحیه [۱۳۹] با روش‌های مبتنی بر ویژگی، آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. در این آزمایش‌ها از روش‌های مبتنی بر ناحیه در [۱۳۹] و الگوریتم مبتنی بر ویژگی SURF [۵۲] استفاده شده است که برای بررسی این آزمایش می‌توان از الگوریتم‌های دیگر از جمله SIFT و الگوریتم‌های بهبود یافته آن و دیگر روش‌ها می‌توان استفاده کرد اما به دلیل اینکه الگوریتم SURF عملکردی شبیه به الگوریتم SIFT داشته و نسبت الگوریتم SIFT سرعت بالاتری دارد، انتخاب شده است. تصاویر با تغییرات مقیاس، چرخش، انحراف‌های آفین و تصاویری که با تغییرات روشنایی همراه است، مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مثال، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دو نمونه از نتایج این تصاویر را نشان می‌دهد.



(و)

(ه)



(ح)



(ز)

شکل ۱۰ بررسی عملکرد الگوریتم‌های مبتنی بر ویژگی با الگوریتم‌های مبتنی بر ناحیه در تصاویری با مشکلات رادیومتری. (الف) و (ب) تصویر مرجع و حس شده با تغییرات روشنایی (ج) انطباق مبتنی بر ویژگی [۵۲]، (د) انطباق مبتنی بر ناحیه [۱۳۹]، (ه) و (و) تصویر مرجع و حس شده با تغییر محوشدگی، (ز) انطباق مبتنی بر ویژگی [۵۲]، (ح) انطباق مبتنی بر ناحیه [۱۳۹]



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



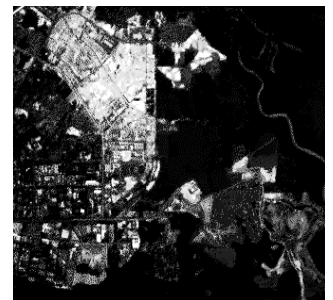
(و)



(ه)



(ب)



(الف)



(د)

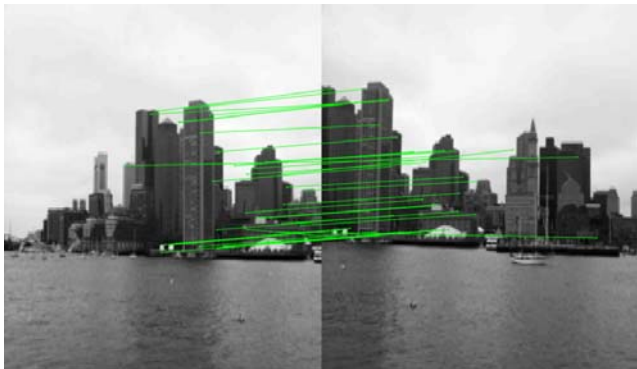


(ج)

الگوریتم  $A^2SIFT$  پیشنهاد شد. الگوریتم SURF با توجه به اینکه نتایج مطلوبی را در ارزیابی‌های موردنظر نشان می‌دهد و با توجه به سرعت بالاتر آن برای کاربردهای بلادرنگ مناسب است.

## ۲-۲-۶- بررسی عملکرد تطبیق در تصاویری با مقیاس متفاوت

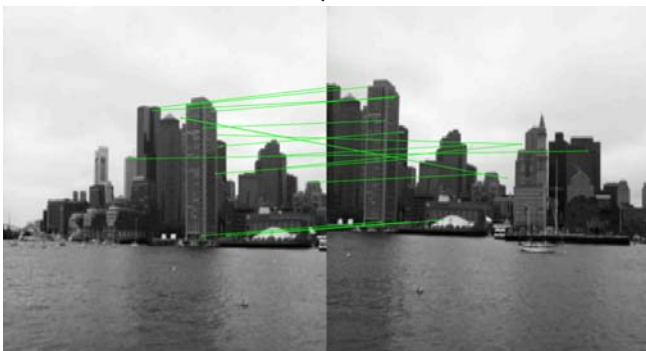
در این آزمایش، جهت بررسی عملکرد تطبیق از پنج جفت تصویر با مقیاس متفاوت استفاده می‌شود که نتایج دقت تطبیق روی این پنج جفت تصویر در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، عملکرد دقت تطبیق در الگوریتم SIFT بهتر از دیگر روش‌هاست اما پیچیدگی محاسباتی در الگوریتم SIFT، بیشتر از  $A^2SIFT$  و SURF است. عملکرد دقت تطبیق روی یک جفت تصویر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



(الف)

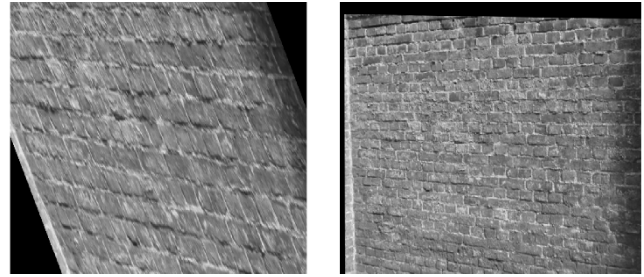


(ب)



(ج)

شکل ۱۲ بررسی عملکرد تطبیق نسخه‌های متفاوت SIFT، (الف) عملکرد تطبیق با الگوریتم SIFT [۳۴]، (ب) عملکرد تطبیق با الگوریتم SURF [۵۲]، (ج) عملکرد تطبیق با الگوریتم  $A^2SIFT$  [۴۳]



(ح)

(ز)

شکل ۱۱ بررسی عملکرد الگوریتم‌های مبتنی بر ویژگی با الگوریتم‌های مبتنی بر ناحیه در تصاویری با مشکلات هندسی. (الف) و (ب) تصویر مرجع و حس شده با تغییر مقیاس و چرخش، (ج) انطباق مبتنی بر ویژگی [۵۲]، (د) انطباق مبتنی بر ناحیه [۱۳۹]، (ه) و (و) تصویر مرجع و حس شده با تغییر زاویه، (ز) انطباق مبتنی بر ویژگی [۵۲]، (ح) انطباق مبتنی بر ناحیه [۱۳۹]

با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان گفت در تصاویری که مشکلات هندسی و رادیومتری در آن‌ها زیاد است، عملکرد الگوریتم‌های انطباق مبتنی بر ناحیه خوب نیست اما در تصویری که فقط تغییرات روشنایی دارد، عملکرد مناسبی دارد.

## ۲-۶- بررسی عملکرد تطبیق در نسخه‌های مختلف الگوریتم SIFT

در این بخش، جهت بررسی عملکرد تطبیق در نسخه‌های مختلف الگوریتم SIFT، از جمله SURF [۵۲]،  $A^2SIFT$  [۴۳] دو مجموعه آزمایش انجام می‌شود. در مجموعه آزمایش اول از تصاویری با زاویه متفاوت و در مجموعه دوم از تصاویری با مقیاس متفاوت جهت بررسی عملکرد تطبیق استفاده می‌شود. در این آزمایش هدف این است که نشان داده شود از لحاظ دقت الگوریتم SIFT مناسب‌تر است اما از لحاظ سرعت الگوریتم SURF نسبت به دیگر روش‌های بهبودیافته SIFT (SIFT, SRSIFT, SRSIFT, ASIFT, ...) بهتر است. از آنجایی که الگوریتم  $A^2SIFT$  نسبت به دیگر الگوریتم‌های ذکر شده پیچیدگی محاسباتی کمتر و پیاده‌سازی راحت‌تری دارد از این الگوریتم استفاده شد.

## ۲-۶-۱- بررسی عملکرد تطبیق در تصاویری با زاویه متفاوت

در این آزمایش از یک جفت تصویر با زاویه متفاوت استفاده می‌شود که نتایج عملکرد تطبیق در شکل ۱۲ و در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

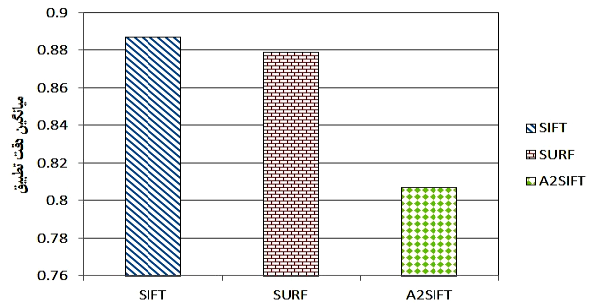
نتایج ارزیابی و مقایسه‌ها نشان دادند که الگوریتم SIFT در برابر اعوجاج‌های هندسی (تغییر مقیاس، تغییر زاویه و...) نسبت به الگوریتم‌های SURF،  $A^2SIFT$  از نظر دقت تطبیق بهتر است اما در الگوریتم SIFT تعداد زیادی ویژگی شناسایی می‌شوند که علاوه بر زمان‌بر شدن فرآیند شناسایی و تطبیق ویژگی‌ها باعث افزایش دقت هم‌ترازی می‌شود که در این زمینه

### ۳-۶- بررسی عملکرد تطبیق با استفاده از روابط فضایی

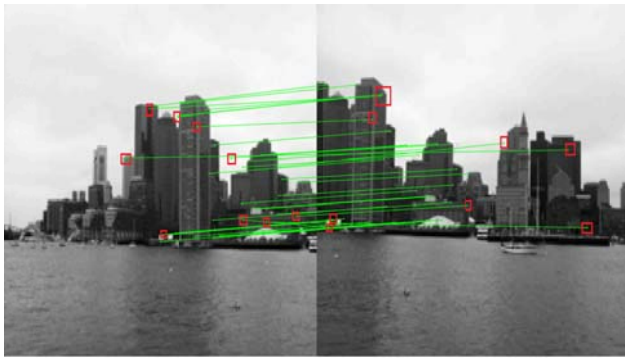
در این آزمایش، جهت بررسی روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیفگر با روش‌های تطبیق مبتنی بر روابط فضایی سعی شد در هر روش از الگوریتم‌های که بیشترین استفاده و بالاترین دقت را دارند، استفاده شود. به همین دلیل از توصیفگر SIFT که جز روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیفگر هست و الگوریتم RANSAC [۸۲] که جز روش‌های مبتنی بر روابط فضایی استفاده شد که جهت بررسی این آزمایش می‌توان از الگوریتم دیگر در هر روش استفاده کرد اما به دلیل اینکه الگوریتم RANSAC در تصاویر نویزی عملکرد مناسبی دارد و در اکثر مقالات از آن به‌عنوان روش پایه استفاده می‌شود و توصیفگر SIFT در برابر تغییرات روشنایی و تغییر زاویه تصویر عملکرد مناسبی دارد و اکثر محققین از این توصیفگر استفاده می‌کنند در این آزمایش از آن‌ها استفاده شد. نتایج در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۱ ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SIFT [۳۴]، SURF [۵۲]، A<sup>2</sup>SIFT [۴۳] با معیارهای پایه

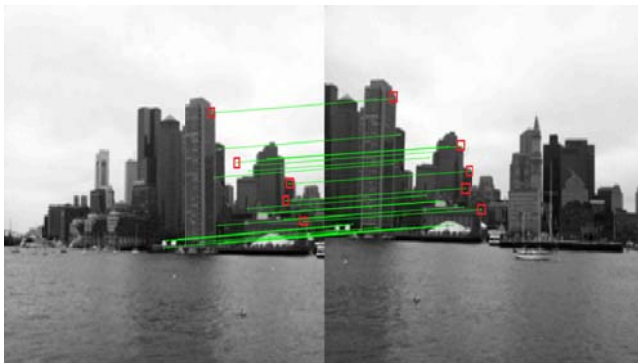
معیارها / روشها	دقت تطبیق (پیکسل)	نرخ تکرار پذیری ویژگی (پیکسل)	RMSE (پیکسل)	زمان اجرا (ثانیه)
SIFT [۳۴]	۰/۸۴۷	۰/۲۴۰	۴۱/۸۳	۰/۰۲۹
SURF [۵۲]	۰/۸۳	۰/۳۲	۸۵/۲۵	۰/۰۱۰
A <sup>2</sup> SIFT [۴۳]	۰/۷۶۱	۰/۱۸۵	۴۱/۶۲	۰/۰۱۰



شکل ۱۳ نتایج میانگین دقت تطبیق بر روی پنج جفت تصویر



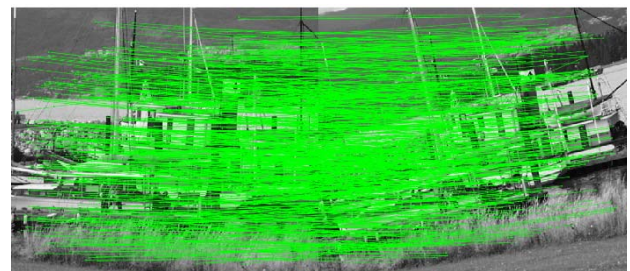
(الف)



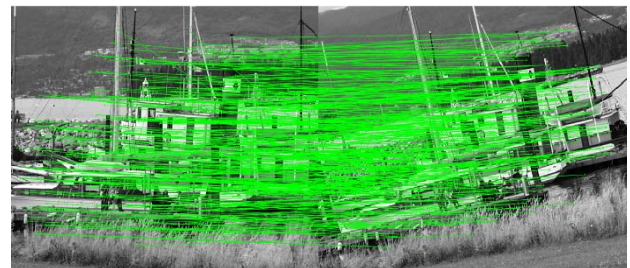
(ب)

شکل ۱۵ مقایسه عملکرد روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیفگرها با روش ترکیبی مبتنی بر توصیفگرها و روابط فضایی SIFT-RANSAC، (الف) تطبیق با الگوریتم SIFT [۳۴]، (ب) تطبیق با الگوریتم SIFT-RANSAC

همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، تعداد بسیار زیادی تطبیق نادرست در الگوریتم SIFT، وجود دارد که در الگوریتم RANSAC تعدادی از این تطبیق‌های نادرست حذف شده‌اند. پس نتیجه می‌شود که ترکیبی از روش‌های تطبیق مبتنی بر



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴ بررسی عملکرد تطبیق نسخه‌های متفاوت SIFT، (الف) عملکرد تطبیق با الگوریتم SIFT [۳۴]، (ب) عملکرد تطبیق با الگوریتم SURF [۵۲]، (ج) عملکرد تطبیق با الگوریتم A<sup>2</sup>SIFT [۴۳]

جهت این محدودیت بهبود یابد به همین دلیل از الگوریتم SIFT و الگوریتم SRSIFT که برای تصاویر چند مودی بهبود یافته، استفاده شد. برای بررسی این آزمایش می‌توان از الگوریتم‌های دیگر نظیر [۴۰] URSIFT و ABSIFT [۴۵] جهت مقایسه استفاده کرد. به دلیل اینکه این دو الگوریتم ذکر شده به ترتیب در مرحله شناسایی ویژگی‌ها و توصیفگر SIFT بهبود یافتند در حالی که الگوریتم SRSIFT در مرحله شناسایی ویژگی‌ها و تطبیق سبب بهبود الگوریتم SIFT شده است. علاوه بر این، الگوریتم SRSIFT به آسانی پیاده‌سازی می‌شود، از آن استفاده شده است. در شکل ۱۶ از یک جفت تصویر با حسگرها و باندهای طیفی متفاوت استفاده شده است. در این شکل، تطبیق‌هایی که با مربع مشخص شده‌اند، تطبیق‌های نادرستی است که با الگوریتم SIFT [۳۴] و SRSIFT [۱۴۰] ایجاد شده است. جدول ۳ مشخصات تصاویر مورد آزمایش را نشان می‌دهد و جدول ۴ بیانگر نتایج این آزمایش بر روی شش جفت تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، به علت شباهت توصیفگرها با یکدیگر در الگوریتم SIFT، تعداد زیادی تطبیق‌های نادرست به جود آمده است. تعداد تطبیق‌های نادرست در الگوریتم SRSIFT نسبت به الگوریتم SIFT پایه کمتر است که این نشان‌دهنده عملکرد بهتر الگوریتم SRSIFT نسبت به الگوریتم SIFT پایه در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور است.

توصیفگرها و تطبیق مبتنی بر روابط فضایی سبب بهبود دقت تطبیق می‌شود. در جدول ۲ نتایج عملکرد این روش‌ها مشاهده می‌شود.

عملکرد تطبیق با استفاده از ترکیب روش‌های تطبیق مبتنی بر توصیفگرها و روابط فضایی با افزایش دقت تطبیق و نرخ مثبت صحیح، کاهش نرخ تطبیق‌های نادرست همراه است که این نشان‌دهنده عملکرد مناسب این روش ترکیبی می‌باشد.

جدول ۲ ارزیابی عملکرد تطبیق SIFT [۳۴]، SIFT-RANSAC با معیارهای پایه

زمان اجرا (ثانیه)	نرخ مثبت صحیح (پیکسل)	نرخ تطبیق‌های نادرست (پیکسل)	دقت تطبیق (پیکسل)	معیارها / روشها
۰/۳۱۴	۰/۶۰۴	۰/۳۶۹	۰/۶۳۰	SIFT
۰/۸۹۲	۰/۵۲۰	۰/۲۶۴	۰/۷۳۵	SIFT+RANSAC

#### ۴-۶- بررسی عملکرد تطبیق در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور

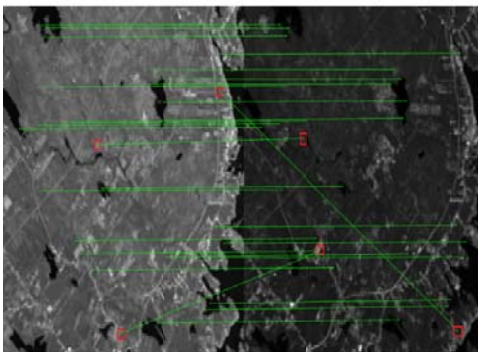
در این آزمایش، برای بررسی عملکرد تطبیق الگوریتم SIFT [۳۴] با الگوریتم SRSIFT [۱۴۰] در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور از شش جفت تصویر استفاده شده است. یک نمونه از نتایج تطبیق در شکل ۱۶ نشان داده شده است. هدف آزمایش این است که نشان داده شود الگوریتم SIFT در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور مناسب نیست و لازم است این الگوریتم در



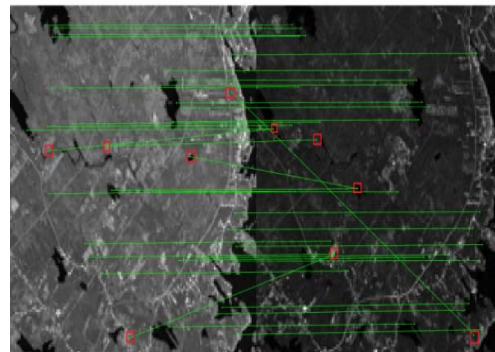
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۶ بررسی عملکرد الگوریتم SIFT با الگوریتم SRSIFT در تصاویر چند مودی سنجنش‌ازدور، (الف) و (ب) تصویر مرجع و حس شده، (ج) تطبیق با الگوریتم SIFT [۳۴]، (د) تطبیق با الگوریتم SRSIFT [۱۴۰]

جدول ۳ مشخصات تصاویر چند مودی سنجنش ازدور [۴۵, ۴۰]

موقعیت اخذ تصویر	زمان اخذ تصویر	تعداد بیت در هر پیکسل	اندازه پیکسل زمینی (متر)	ابعاد تصویر	وضعیت طیفی	نوع ماهواره	مجموعه داده
چین	۲۰۰۱	۸	۲۰	۶۱۱×۱۲۳۵	Multi spectral-band: 1	Spot4	مجموعه داده اول
چین	۲۰۰۴	۸	۳۰	۶۴۸×۱۲۳۰	Multi Spectral-band: 3	Landsat TM	
کانادا	۲۰۰۶	۸	۱۰	۱۳۱۱×۱۲۱۵	panchromatic	SPOT5	مجموعه داده دوم
کانادا	۱۹۹۹	۸	۳۰	۴۴۰×۴۱۰	Multi Spectral-band: 3	Landsat ETM <sup>+</sup>	
تهران	۱۹۹۸	۸	۵	۱۳۴۶×۱۱۳۵	panchromatic	IRS-IC	مجموعه داده سوم
تهران	۱۹۹۶	۸	۱۰	۷۰۰×۵۹۰	panchromatic	SPOT4	
شیراز	۲۰۰۱	۱۱	۱	۱۲۸۸×۱۰۸۲	panchromatic	IKONOS	مجموعه داده چهارم
شیراز	۲۰۰۶	۱۰	۲/۵	۶۵۱×۵۴۸	panchromatic	IRS-P <sub>6</sub>	
تهران	۱۹۹۸	۶	۵	۱۱۲۲×۱۰۳۲	Pan	IRS-IC	مجموعه داده پنجم
تهران	۱۹۹۹	۸	۱۰	۵۶۸×۵۲۲	Pan	SPOT4	
اسپانیا	۲۰۱۲	۱۱	۱/۵	۷۹۲×۷۲۹	Pan	SPOT6	مجموعه داده ششم
اسپانیا	۲۰۰۹	۸	۲/۵	۵۹۸×۵۵۱	Pan	SPLIT5	

### ۷ جمع‌بندی و جهت‌دهی آینده

انطباق تصویر یکی از ابزارهای بسیار مهم در یکپارچه‌سازی و آنالیز تصاویر در شرایط مختلف تصویربرداری است. این فرآیند، یک مرحله پایه (اساسی) در ترکیب تصاویر، شناسایی تغییرات و دسته‌بندی تصاویر و غیره می‌باشد. در این مقاله، ضمن تعریف مفاهیم اولیه انطباق تصویر، مروری بر روش‌ها و مراحل پایه آن انجام شد و روش‌های انطباق به روز و دسته‌بندی جدید براساس روش‌های تطبیق مورد بررسی قرار گرفت. از ویژگی‌های دیگر این مقاله، مشخص کردن سوگیری تحقیقات در این زمینه است. با توجه به تحقیق‌های زیادی که جهت انطباق تصویر انجام شده است، اما هنوز به دلیل متنوع بودن تصاویر (تصاویر طبیعی، سنجنش‌ازدور اپتیکی، سنجنش‌ازدور SAR، پزشکی) و وجود دلایل مختلف کاهش کیفیت در تصاویر، یک روش عمومی و کامل جهت انجام این فرآیند وجود ندارد. پس برای انجام انطباق تصویر، باید به نوع تصاویر هم توجه کرد زیرا انحراف‌های که بین تصاویر وجود دارد، بستگی به ماهیت تصاویر دارد. بر این اساس، بررسی‌هایی بین روش اطلاعات مشترک (جزء روش‌های مبتنی بر ناحیه) و الگوریتم SIFT (جزء روش‌های مبتنی بر ویژگی) در محدوده‌ی سال‌های (۲۰۱۵-۲۰۱۰) در پایگاه IEEE انجام شد. با توجه به این بررسی، می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های مبتنی بر ناحیه (۵۷ مقاله) در تصاویر پزشکی بیشتر از روش‌های مبتنی بر ویژگی کاربرد دارد. روش‌های مبتنی بر ویژگی (۲۵ مقاله) در

جدول ۴ ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های SIFT [۳۴] و SRSIFT [۱۴۰] با معیارهای پایه

زمان اجرا (ثانیه)	نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها (پیکسل/۱)	دقت تطبیق (پیکسل)	روش‌ها	مجموعه داده
۰/۲۳۶	۰/۱۴۸	۰/۸۰	SIFT [۳۴]	مجموعه داده اول
۰/۲۸۴	۰/۱۲۰	۰/۸۱۲	SRSIFT [۱۴۰]	
۰/۶۶۲	۰/۱۵۷	۰/۸۷۵	SIFT [۳۴]	مجموعه داده دوم
۰/۷۴۵	۰/۱۳۰	۰/۹۰۶	SRSIFT [۱۴۰]	
۰/۸۹۱	۰/۱۲۴	۰/۸۲۷	SIFT [۳۴]	مجموعه داده سوم
۰/۸۹۶	۰/۱۳۹	۰/۹۶۴	SRSIFT [۱۴۰]	
۲/۳۲۱	۰/۰۶۱	۰/۵۳	SIFT [۳۴]	مجموعه داده چهارم
۲/۳۳۷	۰/۰۴۴	۰/۵۵۵	SRSIFT [۱۴۰]	
۱۰/۴۹۵	۰/۲۱۷	۰/۶۶	SIFT [۳۴]	مجموعه داده پنجم
۱۰/۵۲۵	۰/۱۷۳	۰/۷۲	SRSIFT [۱۴۰]	
۸/۷۹	۰/۵۶۸	۰/۷۶	SIFT [۳۴]	مجموعه داده ششم
۹/۲۹	۰/۵	۰/۸۲۸	SRSIFT [۱۴۰]	

### پیوست

محاسبه‌ی معیارهای پایه در الگوریتم SIFT

در این بخش، با ذکر یک مثال به شرح محاسبه هر یک از این معیارهای پایه در الگوریتم SIFT پرداخته می‌شود. فرض کنید الگوریتم SIFT در تصویر مرجع، چهار نقطه کلیدی  $d, c, b, a$  و در تصویر حس شده نیز تعداد سه نقطه کلیدی بانام‌های  $c', b', a'$  پیدا کند. تعداد کل تطبیق‌های مختلفی که ممکن است بین این نقاط ایجاد شود  $4 \times 3$  یعنی ۱۲ حالت است که در جدول ۵ مشاهده می‌شود

جدول ۵ تعداد کل تطبیق‌های ممکن با استفاده از نقاط کلیدی

SIFT در مثال خاص

تعداد تطبیق- های ممکن	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
نقاط کلیدی در تصویر مرجع	a	a	a	b	b	b	c	c	c	d	d	d
نقاط کلیدی در تصویر حس	a'	b'	c'	a'	b'	a'	c'	b'	a'	c'	b'	a'

حال فرض کنید ماتریس ارتباط که با استفاده از نقاط کلیدی SIFT که به صورت دستی ایجاد شده و نشان‌دهنده ارتباط‌های صحیح است به صورت جدول ۶ باشد.

جدول ۶ تعداد تطبیق‌های صحیح به صورت دستی ایجاد شده در

مثال خاص

تعداد تطبیق‌ها که به صورت دستی ایجاد شده	۱	۲	۳
نقاط کلیدی در تصویر مرجع	a	b	c
نقاط کلیدی در تصویر حس شده	a'	b'	c'

سپس فرض می‌شود الگوریتم SIFT، سه نقطه کلیدی را تطبیق می‌دهد که در جدول ۷ مشاهده می‌شود.

جدول ۷ تعداد تطبیق‌های الگوریتم SIFT در مثال خاص

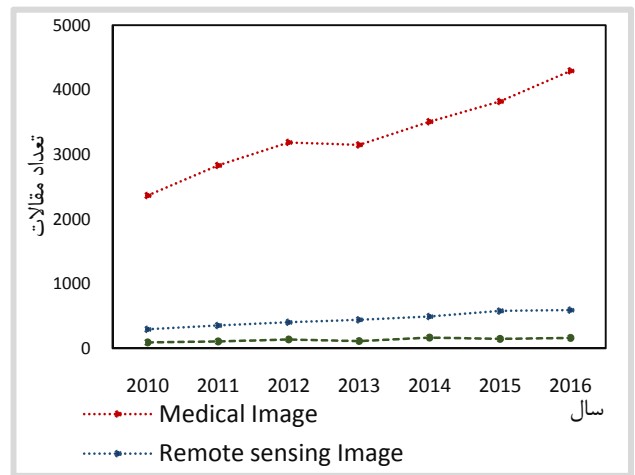
تعداد تطبیق‌های که SIFT ایجاد کرده	۱	۲	۳
نقاط کلیدی در تصویر مرجع	a	b	c
نقاط کلیدی در تصویر حس شده	a'	c'	b'

در این حالت  $TP=1$  و  $FP=2$  است چون تطبیق  $(a, a')$  که در SIFT ایجاد شده، در ماتریس ارتباط هم ایجاد شده است که نشان‌دهنده تطبیق درست می‌باشد اما دو تطبیق دیگر الگوریتم SIFT که عبارت است از  $(b, c')$ ،  $(c, b')$  می‌باشد، نشان‌دهنده تطبیق‌های نادرست می‌باشد که الگوریتم SIFT آن‌ها را تطبیق داده است. سپس با توجه به جدول ۵، از ۱۲ حالت ممکن، غیر از حالات ۱، ۶، ۸ که با دایره مشخص شده‌اند که الگوریتم SIFT بین آن‌ها ارتباط ایجاد کرده است، ۹ حالت است که الگوریتم SIFT بین آن‌ها ارتباط ایجاد نکرده است حال، از این ۹ حالت سه حالت است که این عدم برقراری ارتباط اشتباه است.  $(FN=2)$  که حالت‌های ۵، ۹، در جدول ۵ می‌باشد. برای محاسبه  $TN$  می‌توان از رابطه‌ی (۲۲) استفاده کرد.

$$TN = FN - \text{تعداد تطبیق‌های ایجاد شده در SIFT} - \text{تعداد کل تطبیق‌های ممکن} = 12 - 3 - 2 = 7$$

(۲۲)

تصاویر سنجنش‌ازدور بیشتر از روش‌های مبتنی بر ناحیه (۱۲) مقاله) کاربرد دارد. بیشترین چالش‌ها در این فرآیند، در تصاویر با حسگرهای متفاوت، تصاویر با انحراف‌های هندسی و رادیومتریکی پیچیده و تعیین مدل تبدیل مناسب در تصاویر پزشکی است. شکل ۱۷ نمودار تعداد مقالات ژورنال از پایگاه ساینس دایرکت در تصاویر متفاوت برحسب سال است. با توجه به این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در آینده زمینه‌های کاری بر روی تصاویر پزشکی و سنجنش‌ازدور اپتیکی بیشتر خواهد بود. در تصاویر پزشکی علاقه دانشمندان به سمت تصاویر با حسگرهای متفاوت و بهبود مرحله سوم انطباق یعنی برآورد مدل تبدیل خواهد رفت. در تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی علاقه دانشمندان در جهت روش مبتنی بر ویژگی که بتواند کاملاً در برابر مشکلات هندسی و رادیومتری مستقل باشد، خواهد رفت.



شکل ۱۷ نمودار تعداد مقالات در تصاویر متفاوت برحسب سال

همان‌طور که مشخص شد، کاربردهای انطباق تصویر در تصاویر پزشکی بیشتر از زمینه‌های دیگر تصاویر سنجنش‌ازدور اپتیکی و تصاویر سنجنش‌ازدور SAR مورد اقبال محققین است. یکی از زمینه‌های دیگری که می‌تواند مورد توجه پژوهشگران این زمینه قرار گرفته و مبنای تحقیقات بعدی باشد، استفاده از روش‌های ترکیبی تطبیق و روش‌های بهینه‌سازی بهبود یافته که بتوان به نتایج قابل قبولی در انطباق تصاویر خصوصاً در تصاویر پزشکی رسید که بتواند در تشخیص و درمان بیماری‌ها کمک شایانی به پزشکان کرد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از آقای دکتر امین صداقت جهت در اختیار قرار دادن تصاویر سنجنش‌ازدور، آقای مهندس علی‌پور جهت در اختیار قرار دادن تصاویر هوایی و از داوران و سردبیر محترم به خاطر نظرات مفیدشان که باعث افزایش کیفیت مقاله شده است، اعلام می‌دارند.

- [12] M. A. Viergever, J. A. Maintz, S. Klein, K. Murphy, M. Staring, and J. P. Pluim, "A survey of medical image registration—under review," *Medical Image Analysis*, vol. 33, pp. 140–144, 2016.
- [13] S. Matl, R. Brosig, M. Baust, N. Navab, and S. Demirci, "Vascular image registration techniques: A living review," *Medical image analysis*, vol. 35, pp. 1–17, 2017.
- [14] V. Tavakoli and A. A. Amini, "A survey of shaped-based registration and segmentation techniques for cardiac images," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 117, pp. 966–989, 2013.
- [15] F. Alam, S. U. Rahman, S. Khusro, S. Ullah, and A. Khalil, "Evaluation of Medical Image Registration Techniques Based on Nature and Domain of the Transformation," *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, vol. 47, pp. 178–193, 2016.
- [16] Y. Bentoutou, N. Taleb, K. Kpalma, and J. Ronsin, "An automatic image registration for applications in remote sensing," *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 43, pp. 2127–2137, 2005.
- [17] L. M. Fonseca and B. Manjunath, "Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery," *PE & RS- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, pp. 1049–1056, 1996.
- [18] D. L. Hill, P. G. Batchelor, M. Holden, and D. J. Hawkes, "Medical image registration," *Physics in medicine and biology*, vol. 46, vol. 46, pp. 1–45, 2001.
- [19] J. A. Maintz and M. A. Viergever, "A survey of medical image registration," *Medical image analysis*, vol. 2, pp. 1–36, 1998.
- [20] B. D. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," *Intl Joint Conf on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp. 121–130, 1981.
- [21] E. Sansosti, P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, and G. Fornaro, "Geometrical SAR image registration," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, p. 2861, 2006.
- [22] D. I. Barnea and H. F. Silverman, "A class of algorithms for fast digital image registration," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 100, pp. 179–186, 1972.
- [23] K. A. Sallal and A.-M. S. Rahma, "Feature Based Registration for Panoramic Image Generation," *IJCSI International Journal of Computer Science*, vol. 10, pp. 132–138, 2013.
- [1] B. Zitova and J. Flusser, "Image registration methods: a survey," *Image and vision computing*, vol. 21, pp. 977–1000, 2003.
- [2] Y. Ye and J. Shan, "A local descriptor based registration method for multispectral remote sensing images with non-linear intensity differences," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 90, pp. 83–95, 2014.
- [3] R. J. Radke, S. Andra, O. Al-Kofahi, and B. Roysam, "Image change detection algorithms: a systematic survey," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 294–307, 2005.
- [4] Q. Zhang, L. Wang, H. Li, and Z. Ma, "Similarity-based multimodality image fusion with shiftable complex directional pyramid," *Pattern recognition letters*, vol. 32, pp. 1544–1553, 2011.
- [5] C.-L. Tsai, C.-Y. Li, G. Yang, and K.-S. Lin, "The edge-driven dual-bootstrap iterative closest point algorithm for registration of multimodal fluorescein angiogram sequence," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 636–649, 2010.
- [6] M. V. Wyawahare, P. M. Patil, and H. K. Abhyankar, "Image registration techniques: an overview," *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 2, pp. 11–28, 2009.
- [7] V. Mani, "Survey of medical image registration," *Journal of Biomedical Engineering and Technology*, vol. 1, pp. 8–25, 2013.
- [8] F. P. Oliveira and J. M. R. Tavares, "Medical image registration: a review," *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, vol. 17, pp. 73–93, 2014.
- [9] S. Klein, M. Staring, K. Murphy, M. A. Viergever, and J. P. Pluim, "Elastix: a toolbox for intensity-based medical image registration," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 29, pp. 196–205, 2010.
- [10] A. Sotiras, C. Davatzikos, and N. Paragios, "Deformable medical image registration: A survey," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 32, pp. 1153–1190, 2013.
- [11] P. Markelj, D. Tomaževič, B. Likar, and F. Pernuš, "A review of 3D/2D registration methods for image-guided interventions," *Medical image analysis*, vol. 16, pp. 642–661, 2012.

- [36] F. Dellinger, J. Delon, Y. Gousseau, J. Michel, and F. Tupin, "SAR-SIFT: A SIFT-Like Algorithm for SAR Images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 453-466, 2015.
- [37] J. Fan, Y. Wu, F. Wang, Q. Zhang, G. Liao, and M. Li, "SAR image registration using phase congruency and nonlinear diffusion-based sift," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 562-566, 2015.
- [38] 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.
- [39] F. Wang, H. You, and X. Fu, "Adapted anisotropic Gaussian SIFT matching strategy for SAR registration," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 160-164, 2015.
- [40] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, and H. Ebadi, "Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 4516-4527, 2011.
- [41] R. Song and J. Szymanski, "Well-distributed SIFT features," *Electronics letters*, vol. 45, pp. 1-2, 2009.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Z. Yi, C. Zhiguo, and X. Yang, "Multi-spectral remote image registration based on SIFT," *Electronics Letters*, vol. 44, pp. 107-108, 2008.
- [45] A. Sedaghat and H. Ebadi, "Remote Sensing Image Matching Based on Adaptive Binning SIFT Descriptor," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, vol. 53, pp. 5283-5293, 2015.
- [46] 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.
- [47] X. Wang and W. Fu, "Optimized SIFT image matching algorithm," in *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2008, pp. 843-847.
- [24] D. Rueckert and J. A. Schnabel, "Medical image registration," in *Biomedical Image Processing*, ed: Springer, 2011, pp. 131-154.
- [25] D. Loeckx, P. Slagmolen, F. Maes, D. Vandermeulen, and P. Suetens, "Nonrigid image registration using conditional mutual information," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 19-29, 2010.
- [26] D. Rueckert, L. I. Sonoda, C. Hayes, D. L. Hill, M. O. Leach, and D. J. Hawkes, "Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 712-721, 1999.
- [27] J. P. Pluim, J. A. Maintz, and M. Viergever, "Mutual-information-based registration of medical images: a survey," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 986-1004, 2003.
- [28] ا. حیدری، ر. خورسندی، ع. ف. زاده، "انطباق غیر صلب تصاویر مالتی مودال به آناتومیکی مغز براساس اطلاعات متقابل و توابع پایه Bspline به همراه آنالیز حساسیت"، هفدهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران صفحه ۱-۶ سال ۱۳۸۹.
- [29] P. Lukashevich, B. Zalesky, and S. Ablameyko, "Medical image registration based on surf detector," *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 21, pp. 519-521, 2011.
- [30] G.-J. Wen, J.-j. Lv, and W.-x. Yu, "A high-performance feature-matching method for image registration by combining spatial and similarity information," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1266-1277, 2008.
- [31] A. Wong and D. Clausi, "ARRSI: automatic registration of remote-sensing images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1483-1493, 2007.
- [32] A. A. Goshtasby, "2-D and 3-D image registration for medical," *Remote Sensing, and Industrial Applications*, pp. 34-39, 2005.
- [33] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," in *Alvey vision conference*, 1988, pp. 147-152.
- [34] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 91-110, 2004.
- [35] R. Zhang, W. Zhou, Y. Li, S. Yu, and Y. Xie, "Nonrigid registration of lung CT images based on tissue features," *Computational and mathematical methods in medicine*, vol. 2013, pp. 1-8, 2013.



- Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on*, 2010, pp. 2184–2188.
- [60] J.-W. Hsieh, H.-Y. M. Liao, K.-C. Fan, M.-T. Ko, and Y.-P. Hung, "Image registration using a new edge-based approach," *Computer vision and image understanding*, vol. 67, pp. 112–130, 1997.
- [61] J. Inglada and F. Adragna, "Automatic multi-sensor image registration by edge matching using genetic algorithms," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2313–2315.
- [62] H. Li, B. Manjunath, and S. K. Mitra, "A contour-based approach to multisensor image registration," *IEEE transactions on image processing*, vol. 4, pp. 320–334, 1995.
- [63] M. A. Ali and D. A. Clausi, "Automatic registration of SAR and visible band remote sensing images," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 1331–1333.
- [64] M. Ali and D. Clausi, "Using the Canny edge detector for feature extraction and enhancement of remote sensing images," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2298–2300.
- [65] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, pp. 679–698, 1986.
- [66] K. Mikolajczyk and C. Schmid, "An affine invariant interest point detector," in *European conference on computer vision*, 2002, pp. 128–142.
- [67] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla, "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions," *Image and vision computing*, vol. 22, pp. 761–767, 2004.
- [68] W. Chao, H. Zhang, Y. Tang, and B. Zhang, "SAR image registration based on extremal scattering regions in multiscale framework," in *Synthetic Aperture Radar (AP SAR), 2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on*, 2015, pp. 338–341.
- [69] T. Tuytelaars and L. Van Gool, "Content-based image retrieval based on local affinity invariant regions," in *Visual Information and Information Systems*, 1999, pp. 656–656.
- [70] K. Mikolajczyk and C. Schmid, "Indexing based on scale invariant interest points," in *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on*, 2001, pp. 525–531.
- [48] B. Kupfer, N. S. Netanyahu, and I. Shimshoni, "An Efficient SIFT-Based Mode-Seeking Algorithm for Sub-Pixel Registration of Remotely Sensed Images," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 379–383, 2015.
- [49] M. Hasan, X. Jia, A. Robles-Kelly, J. Zhou, and M. R. Pickering, "Multi-spectral remote sensing image registration via spatial relationship analysis on sift keypoints," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International*, 2010, pp. 1011–1014.
- [50] Z. Hossein-Nejad and M. Nasri, "RKEM: Redundant keypoint Elimination Method in Image Registration," *IET Image Processing*, vol. 11, pp. 273–284, 2017.
- [51] M. Urschler, J. Bauer, H. Ditt, and H. Bischof, *SIFT and shape context for feature-based nonlinear registration of thoracic CT images*: Springer, pp. 73–84, 2006.
- [52] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Surf: Speeded up robust features," in *Computer vision—ECCV 2006*, ed: Springer, 2006, pp. 404–417.
- [53] Z. L. Song and J. Zhang, "Remote sensing image registration based on retrofitted SURF algorithm and trajectories generated from Lissajous figures," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 7, pp. 491–495, 2010.
- [54] A. Moore, "An introduction tutorial on kd-trees," Tech. Rep 1991.
- [55] L. Huang, C. Chen, H. Shen, and B. He, "Adaptive registration algorithm of color images based on SURF," *Measurement*, vol. 66, pp. 118–124, 2015.
- [56] L. Juan and O. Gwun, "A comparison of sift, pca-sift and surf," *International Journal of Image Processing (IJIP)*, vol. 3, pp. 143–152, 2009.
- [57] Y. Ke and R. Sukthankar, "PCA-SIFT: A more distinctive representation for local image descriptors," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*, 2004, pp. II–506–II–513, Vol. 2.
- [58] F. Remondino, S. El-Hakim, A. Gruen, and L. Zhang, "Turning images into 3-D models," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 25, pp. 55–65, 2008.
- [59] H. Lin, P. Du, W. Zhao, L. Zhang, and H. Sun, "Image registration based on corner detection and affine transformation," in *Image and Signal*

- cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, pp. 381–395, 1981.
- [83] A. Goshtasby and G. C. Stockman, "Point pattern matching using convex hull edges," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, pp. 631–637, 1985.
- [84] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-D shapes," in *Robotics-DL tentative*, 1992, pp. 586–606.
- [85] A. Hast, J. Nysjö, and A. Marchetti, "Optimal ransac-towards a repeatable algorithm for finding the optimal set," vol.21, pp.21–30, 2013.
- [86] J.-M. Frahm and M. Pollefeys, "RANSAC for (quasi-) degenerate data (QDEGSAC)," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, 2006, pp. 453–460.
- [87] M. Kang, J. Gao, and L. Tang, "Nonlinear RANSAC optimization for parameter estimation with applications to phagocyte transmigration," in *Machine Learning and Applications and Workshops (ICMLA), 2011 10th International Conference on*, 2011, pp. 501–504.
- [88] P. Bhattacharya and M. Gavrilova, "Improving RANSAC feature matching with local topological information," in *Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD), 2012 Ninth International Symposium on*, 2012, pp. 17–23.
- [89] L. Cheng, M. Li, Y. Liu, W. Cai, Y. Chen, and K. Yang, "Remote sensing image matching by integrating affine invariant feature extraction and RANSAC," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 38, pp. 1023–1032, 2012.
- [90] G. Shi, X. Xu, and Y. Dai, "SIFT Feature Point Matching Based on Improved RANSAC Algorithm," in *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2013 5th International Conference on*, 2013, pp. 474–477.
- [91] Y. Zhao, R. Hong, and J. Jiang, "Visual summarization of image collections by fast RANSAC," *Neurocomputing*, pp. 48–52, 2015.
- [92] B. Li, D. Ming, W. Yan, X. Sun, T. Tian, and J. Tian, "Image matching based on two-column histogram hashing and improved RANSAC," *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 11, pp. 1433–1437, 2014.
- [93] Y. Wu, W. Ma, M. Gong, L. Su, and L. Jiao, "A novel point-matching algorithm based on fast sample consensus for image registration," *Geoscience and*
- [71] K. Mikolajczyk and C. Schmid, "Scale & affine invariant interest point detectors," *International journal of computer vision*, vol. 60, pp. 63–86, 2004.
- [72] K. Mikolajczyk, T. Tuytelaars, C. Schmid, A. Zisserman, J. Matas, F. Schaffalitzky, et al., "A comparison of affine region detectors," *International journal of computer vision*, vol. 65, pp. 43–72, 2005.
- [73] L. Cheng, J. Gong, X. Yang, C. Fan, and P. Han, "Robust affine invariant feature extraction for image matching," *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, vol. 5, pp. 246–250, 2008.
- [74] 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.
- [75] G. Wolberg and S. Zokai, "Image registration for perspective deformation recovery," in *AeroSense 2000*, 2000, pp. 259–270.
- [76] E. De Castro and C. Morandi, "Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, pp. 700–703, 1987.
- [77] P. Viola and W. M. Wells III, "Alignment by maximization of mutual information," *International journal of computer vision*, vol. 24, pp. 137–154, 1997.
- [78] J. P. Pluim, J. A. Maintz, and M. A. Viergever, "Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information," in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 2000, pp. 452–461.
- [79] P. Thévenaz and M. Unser, "A pyramid approach to sub-pixel image fusion based on mutual information," in *Image Processing, 1996. Proceedings., International Conference on*, 1996, pp. 265–268.
- [80] C. Studholme, D. L. Hill, and D. J. Hawkes, "An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment," *Pattern recognition*, vol. 32, pp. 71–86, 1999.
- [81] ع. م. دهنوی، ر. ه. وحید، "انطباق تصاویر CT اسکن و MRI به روش اطلاعات متقابل" مجله دانشکده پزشکی اصفهان، سال ۱۳۹۱، صفحه ۷۴۳–۷۵۰.
- [82] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated

- [104] S. Lazebnik, C. Schmid, and J. Ponce, "Sparse texture representations using affine-invariant neighborhoods," in *In Proc. IEEE Conf. Comp. Vision Patt. Recog.*, 2003.
- [105] S. Belongie, J. Malik, and J. Puzicha, "Shape matching and object recognition using shape contexts," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 509-522, 2002.
- [106] M. Vetterli and J. Kovacevic, *Wavelets and subband coding*: Prentice-hall, 1995.
- [107] A. Calderbank, I. Daubechies, W. Sweldens, and B.-L. Yeo, "Wavelet transforms that map integers to integers," *Applied and computational harmonic analysis*, vol. 5, pp. 332-369, 1998.
- [108] D. Gabor, "Theory of communication. Part 1: The analysis of information," *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, vol. 93, pp. 429-441, 1946.
- [109] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, pp. 1-31, 1987.
- [110] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 11, pp. 674-693, 1989.
- [111] W. T. Freeman and E. H. Adelson, "The design and use of steerable filters," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, pp. 891-906, 1991.
- [112] F. Schaffalitzky and A. Zisserman, "Multi-view matching for unordered image sets, or "How do I organize my holiday snaps?," in *Computer Vision—ECCV 2002*, ed: Springer, 2002, pp. 414-431.
- [113] A. Gholipour, N. Kehtarnavaz, R. Briggs, M. Devous, and K. Gopinath, "Brain functional localization: a survey of image registration techniques," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 26, pp. 427-451, 2007.
- [114] A. A. Goshtasby, *image registration*, Springer Science & Business Media, ISBN. 144712457X, 2012.
- [115] J. Ashburner and K. J. Friston, "Rigid body registration," *Statistical parametric mapping: The analysis of functional brain images*, pp. 49-62, 2007.
- [116] J. V. Hajnal, D. L. G. Hill, and D. J. Hawke, "Medical Image Registration," *Physics in medicine and biology*, ISBN.0-8493-0064-9, pp. 1-394, 2001.
- [117] D. Rueckert, L. I. Sonoda, C. Hayes, D. L. Hill, M. O. Leach, and D. J. Hawkes, "Nonrigid registration *Remote Sensing Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 43-47, 2015.
- [94] ز. حسین نژاد، م. نصری، "روشی جدید در انطباق تصاویر بر اساس تبدیل RANSAC وقتی "دومین کنفرانس مهندسی مخابرات ایران ICCE2016، سال ۱۳۹۴، صفحه ۱-۶.
- [95] 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.
- [96] Z. Hossein-Nejad and M. Nasri, "An adaptive image registration method based on SIFT features and RANSAC transform," *Computers & Electrical Engineering*, [doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.11.034](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.11.034) 2016.
- [97] G. Yang, C. V. Stewart, M. Sofka, and C.-L. Tsai, "Alignment of challenging image pairs: Refinement and region growing starting from a single keypoint correspondence," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell*, vol. 23, pp. 1973-1989, 2007.
- [98] W. Aguilar, Y. Frauel, F. Escolano, M. E. Martinez-Perez, A. Espinosa-Romero, and M. A. Lozano, "A robust graph transformation matching for non-rigid registration," *Image and Vision Computing*, vol. 27, pp. 897-910, 2009.
- [99] M. Izadi and P. Saeedi, "Robust weighted graph transformation matching for rigid and nonrigid image registration," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 4369-4382, 2012.
- [100] Y.-j. Zhong and S.-F. Chen, "An Improved Algorithm Based on SIFT and Graph Transformation for Mammogram Registration," *Journal of Convergence Information Technology*, vol. 7, pp. 279-285, 2012.
- [101] L. Wiskott, J.-M. Fellous, N. Kuiger, and C. Von Der Malsburg, "Face recognition by elastic bunch graph matching," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 19, pp. 775-779, 1997.
- [102] W. Aguilar, M. E. Martinez-Perez, Y. Frauel, F. Escolano, M. A. Lozano, and A. Espinosa-Romero, "Graph-based methods for retinal mosaicing and vascular characterization," in *Graph-Based Representations in Pattern Recognition*, ed: Springer, 2007, pp. 25-36.
- [103] K. Mikolajczyk and C. Schmid, "A performance evaluation of local descriptors," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 1615-1630, 2005.

- [128] J. Kybic and M. Unser, "Fast parametric elastic image registration," *IEEE transactions on image processing*, vol. 12, pp. 1427–1442, 2003.
- [129] J.-M. Rouet, J.-J. Jacq, and C. Roux, "Genetic algorithms for a robust 3-D MR-CT registration," *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, vol. 4, pp. 126–136, 2000.
- [130] P. J. Van Laarhoven and E. H. Aarts, "Simulated annealing," in *Simulated annealing: Theory and applications*, ed: Springer, 1987, pp. 7–15.
- [131] G. K. Matsopoulos, N. A. Mouravliansky, K. K. Delibasis, and K. S. Nikita, "Automatic retinal image registration scheme using global optimization techniques," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 3, pp. 47–60, 1999.
- [132] A. A. Goshtasby, *Image registration: Principles, tools and methods*: Springer Science & Business Media, 2012.
- [133] 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, 2014.
- [134] C. Schmid, R. Mohr, and C. Bauckhage, "Evaluation of interest point detectors," *International Journal of computer vision*, vol. 37, pp. 151–172, 2000.
- [135] 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, 2017.
- [136] Y. Zhu, S. Cheng, V. Stanković, and L. Stanković, "Image registration using BP-SIFT," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 24, pp. 448–457, 2013.
- [137] Q. Zhu, B. Wu, and Z.-X. Xu, "Seed point selection method for triangle constrained image matching propagation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, pp. 207–211, 2006.
- [138] H. Gonçalves, J. A. Gonçalves, and L. Corte-Real, "Measures for an objective evaluation of the geometric correction process quality," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, pp. 292–296, 2009.
- [139] M. KHUNT and Y. MAKWANA, "Image Registration Using Intensity Based Technique." *Journal of information, knowledge and* using free-form deformations: application to breast MR images," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 18, pp. 712–721, 1999.
- [118] F. L. Bookstein, "Principal warps: Thin-plate splines and the decomposition of deformations," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 11, pp. 567–585, 1989.
- [119] C. Broit, "Optimal registration of deformed images," *scholarly commons*, pp.1–24, 1981.
- [120] R. Bajcsy and S. Kovačič, "Multiresolution elastic matching," *Computer vision, graphics, and image processing*, vol. 46, pp. 1–21, 1989.
- [121] X. Lu, S. Zhang, W. Yang, and Y. Chen, "SIFT and shape information incorporated into fluid model for non-rigid registration of ultrasound images," *Computer methods and programs in biomedicine*, vol. 100, pp. 123–131, 2010.
- [122] M. P. Wachowiak, R. Smolíková, Y. Zheng, J. M. Zurada, and A. S. Elmaghraby, "An approach to multimodal biomedical image registration utilizing particle swarm optimization," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 8, pp. 289–301, 2004.
- [123] M. Jenkinson and S. Smith, "A global optimisation method for robust affine registration of brain images," *Medical image analysis*, vol. 5, pp. 143–156, 2001.
- [124] C. R. Meyer, G. S. Leichtman, J. A. Brunberg, R. L. Wahl, and L. E. Quint, "Simultaneous usage of homologous points, lines, and planes for optimal, 3-D, linear registration of multimodality imaging data," *IEEE Transactions on medical imaging*, vol. 14, pp. 1–11, 1995.
- [125] J. Bernon, V. Boudousq, J. Rohmer, M. Fourcade, M. Zanca, M. Rossi, *et al.*, "A comparative study of Powell's and Downhill Simplex algorithms for a fast multimodal surface matching in brain imaging," *Computerized medical imaging and graphics*, vol. 25, pp. 287–297, 2001.
- [126] F. Maes, D. Vandermeulen, and P. Suetens, "Comparative evaluation of multiresolution optimization strategies for multimodality image registration by maximization of mutual information," *Medical image analysis*, vol. 3, pp. 373–386, 1999.
- [127] H. S. Sawhney and R. Kumar, "True multi-image alignment and its application to mosaicing and lens distortion correction," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 235–243, 1999.

*research in electronics and communication engineering*, vol. 2, pp. 607-609, 2012.

- [140] Z. Yi, C. Zhiguo, and X. Yang, "Multi-spectral remote image registration based on SIFT," *Electronics Letters*, vol. 44, pp. 1-2, 2008.
- [141] 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*, pp.299-303, 2010.



**زهرا حسین نژاد** در سال ۱۳۶۹ در شیراز متولد شد. مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد جهرم دریافت نمود. سپس مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق-مخابرات گرایش سیستم در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان کسب کرد. در حال حاضر نیز، دانشجوی دکتری در رشته مهندسی برق- مخابرات گرایش سیستم می باشد. زمینه ی پژوهشی مورد علاقه او، پردازش تصویر است.



**مهدی نصری** در سال ۱۳۶۱ در اصفهان متولد شد. مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی پزشکی در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه اصفهان و کارشناسی ارشد مهندسی برق- کنترل در سال ۱۳۸۵ و دکتری مهندسی برق-مخابرات را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه شهید باهنر کرمان دریافت کرد. از سال ۱۳۹۲ تا کنون ایشان به عنوان استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر اصفهان مشغول به کار می باشند. ایشان مولف بیش از ۴۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس های معتبر بوده و داور بیش از ۲۰ مجله معتبر ISI از جمله *IEEE trans. Image Processing*, *IEEE Signal processing Letters*, *IET Image processing*, *Computers and Electrical Engineering* می باشد. زمینه های تحقیقاتی ایشان، پردازش تصویر و رایانش نرم است.