



سجش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۶
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.9, No. 4, Winter 2018

۷۳-۹۴



روشی جدید در تناظریابی مبتنی بر روابط فضایی در تصاویر چندسنجندۀ سنجش از دوری

زهرا حسین نژاد^۱ و مهدی نصری^{۲*}

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی برق، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان
۲. استادیار باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۴/۱۹

چکیده

فرایند انطباق تصویر یکی از شاخه‌های مهم در زمینه پردازش تصویر است که پیش‌پردازشی ضروری، جهت استفاده از اطلاعات تصاویر چندسنجندۀ سنجش از دوری محسوب می‌شود. الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت (SIFT) از رایج‌ترین روش‌های مبتنی بر ویژگی است که به‌طور گسترده، برای انطباق این تصاویر استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف این الگوریتم ایجاد تناظرهای نادرست بسیار زیاد است. در این مقاله، به‌منظور افزایش دقت انطباق تصویر چندسنجندۀ سنجش از دوری، روش جدیدی براساس روابط فضایی نقاط متناظر SIFT پیشنهاد شده است که تناظرهای نادرست را به تناظرهای درست تبدیل می‌کند. در ابتدا، مشخص کردن نقاط کلیدی و تناظریابی اولیه، با استفاده از الگوریتم SIFT، انجام می‌شود. سپس، با استفاده از روش پیشنهادی مبتنی بر تبدیل افاین، تناظرهای نادرست اصلاح و فرایند انطباق صورت می‌گیرد. نوآوری دیگر مقاله پیشنهاد دو معیار جدید برای ارزیابی کارایی روش‌های انطباق تصویر، علاوه بر معیارهای کلاسیک دقت تناظریابی، نرخ تکرارپذیری ویژگی و تعداد تناظرهای درست است که بیان می‌کند، به‌دلیل ضعف معیارهای کلاسیک، تعداد کل تناظرها را در نظر نمی‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی مقاله باعث بهبود میانگین ۱۱/۴۸ درصدی در نرخ تکرارپذیری و میانگین ۱۴/۲۰ درصدی ضریب همبستگی در مقایسه با روش رانساک شده و این روش پیشنهادی می‌تواند به‌منزله روشی جدید و کارآ در بهبود تناظریابی این تصاویر به‌کار رود.

کلیدواژه‌ها: انطباق تصویر، تناظریابی، تبدیل افاین، تصویر چندسنجندۀ سنجش از دوری.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان. تلفن: ۰۰۹۳۵۲۶۵۷۴۵۲-۰۳۱-۳۳۶۶۰۰۱۱

۱- مقدمه

ویژگی‌ها و توصیفگرهای آن انجام شده است که در ادامه، بهبودهایی که در این مرحله، برای افزایش دقت تناظریابی صورت گرفته، بررسی می‌شود. مورنو و همکاران^۹ (۲۰۰۹) از فیلترهای هموارکننده مشتق‌گیر مبتنی بر توابع فرد گابور، جهت محاسبه مقادیر گرادیان‌ها، به جای تفاضل پیکسل‌ها به منظور افزایش کارایی توصیفگر SIFT استفاده کردند. ونگ و فو^{۱۰} (۲۰۰۸) از ترکیب خطی فاصله منهن به جای فاصله اقلیدسی میان توصیفگرهای SIFT، برای فرایند تناظریابی، استفاده کردند. این روش باعث کاهش زمان اجرای الگوریتم و بهبود دقت تناظریابی می‌شود اما در این روش تعداد کل تناظرها، به نسبت الگوریتم SIFT پایه، کاهش می‌یابد. کوپر و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۵) یک الگوریتم جست‌وجوی مد مؤثر بر پایه SIFT، برای انطباق تصاویر سنجش از دوری، پیشنهاد کردند. در این روش، برای حذف نقاط دورافتاده، از جست‌وجوی مد^{۱۲} استفاده می‌شود که در برابر مقیاس، اختلاف چرخشی و شیفت‌های افقی و قائم بین همه نقاط کلیدی SIFT مقاوم است. صداقت و عبادی^{۱۳} (۲۰۱۵) توصیفگر AB-SIFT^{۱۴} را برای بهبود تناظریابی تصاویر سنجش از دوری پیشنهاد کردند. در این روش، ابتدا ویژگی‌ها با استفاده از الگوریتم یکنواخت مقاوم هسیان افاین (Mikolajczyk & Schmid, 2004) شناسایی می‌شود و سپس، بر اساس الگوریتم SIFT، برای هر ویژگی یک جهت تعیین می‌شود. در نهایت، توصیفگر AB-SIFT

انطباق تصویر فرایند هم‌مرجع‌سازی دو یا چند تصویر از یک صحنه است که در شرایط گوناگون تصویربرداری از قبیل زمان‌های متفاوت، زوایای متفاوت، حسگرهای متفاوت و نوع و ماهیت منطقه تصویربرداری شده گرفته شده‌اند (Jagadish & Prakash, 2017). این فرایند، از نظر هندسی، دو تصویر مرجع^۱ و مورد انطباق^۲ را هم‌راستا می‌کند. فرایند انطباق پیش‌پردازشی اصلی در بسیاری از کاربردهای سنجش از دوری از جمله شناسایی تغییرات، موزائیک تصویر، طبقه‌بندی و نظارت محیطی محسوب می‌شود (Zhang et al., 2011). در میان کاربردهای انطباق تصویر در سنجش از دوری، انطباق تصاویر چندسنجنده از اهمیت بسزایی برخوردار است. از کاربردهای آن می‌توان به تهیه نقشه، پیش‌بینی بلایای طبیعی، مشاهده سطح زمین، برنامه‌ریزی شهری و کاوش مواد معدنی و نفتی اشاره کرد (Moigne et al., 2011). روش‌های متعددی برای انطباق تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری وجود دارد که به‌طور کلی، به دو دسته روش‌های مبتنی بر ناحیه^۳ (Kim et. al. 2008) و روش‌های مبتنی بر ویژگی^۴ (Hsu & Beuker, 2000) تقسیم می‌شوند. امروزه، روش‌های مبتنی بر ویژگی^۵ در این نوع تصاویر بیشتر کاربرد دارند چون این روش‌ها در برابر انحراف‌های هندسی^۶ و تغییرات شدت روشنایی^۷ مقاوم‌ترند (Xu et al., 2013).

الگوریتم تبدیل ویژگی مقیاس ثابت^۸ یکی از متداول‌ترین روش‌های مبتنی بر ویژگی است که در برابر تغییرات مقیاس و چرخش ثابت است و در برابر تغییرات روشنایی و انحراف‌های افاین و نویز نیز پایدار می‌ماند (Lowe, 2004). این مزایا سبب اهمیت این الگوریتم در فرایند تناظریابی شده است اما ماهیت پیچیده تصاویر سنجش از دوری سبب ایجاد تناظرهای نادرست بسیار زیادی می‌شود. تحقیقات بسیاری به‌منظور بهبود دقت تناظریابی در مرحله استخراج

۱. تصویری که به‌منزله مبنا برای انطباق تصویر استفاده می‌شود.

۲. تصویری که اطلاعات آن به‌نوعی روی تصویر مرجع قرار می‌گیرد و بر تصویر مرجع منطبق می‌شود.

3. area

4. feature

5. methods based on feature

6. Distortion Geometric

7. illumination

8. SIFT

9. Moreno et al.

10. Wang and Fu

11. Kupfer et al.

12. mode seeking

13. Sedaghat and Ebadi

14. adaptive binning SIFT

دیگر، تمامی روش‌های مرور شده، با کاهش تعداد کل تناظرها، باعث افزایش دقت تناظریابی شده‌اند؛ در صورتی که تعداد کل تناظرها در فرایندهای بعدی بسیار تأثیرگذار است. برای نمونه، هرچه تعداد کل تناظرهای درست بیشتر باشد، فرایند انطباق ارتقا می‌یابد. از این رو، امروزه استفاده از الگوریتم‌هایی که بتواند پس از الگوریتم SIFT تناظرهای نادرست را حذف یا اصلاح کند و همچنین، از تعداد کلی تناظرها کاسته نشود، از زمینه‌های تحقیقاتی مهم به‌شمار می‌رود و محققان بسیاری روی آن کار کرده‌اند (Fischler and Bolles, 1981; Yi et al., 2008; Hasan et al., 2010; Ma et al., 2017). یکی از این روش‌های پرکاربرد الگوریتم RANSAC^۱ (Fischler and Bolles, 1981) است.

الگوریتم RANSAC را فیشر، با هدف حذف تناظرهای نادرست معرفی کرد که در برابر نویز هم پایدار است اما این الگوریتم محدودیت‌هایی دارد؛ همچون زمان بر بودن و کارآیی نداشتن آن در زمانی که تعداد تناظرهای درست کمتر از ۵۰٪ باشد. همچنین، افزون‌بر تناظرهای نادرست، تعدادی از تناظرهای درست را حذف می‌کند که سبب کاهش تعداد این تناظرها می‌شود. در مراجع (Li et al., 2011) از این الگوریتم برای حذف تناظرهای نادرست در تصاویر چندطیفی سنجش از دوری استفاده کرده‌اند. یکی از پارامترهای مهم برای حذف تناظرهای نادرست در الگوریتم RANSAC مقدار آستانه است که در هر مقاله، به‌صورت تجربی و با توجه به تصاویر، در نظر

به‌کار می‌رود. این روش تصاویر چندحسگر و چندزمانه را به‌خوبی تطبیق می‌دهد و از نظر دقت و ریشه میانگین مربعات خطا، از توصیفگرهای دیگر، مانند GLOH (Mikolajczyk & Schmid, 2005)، بهتر است. یی و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، با استفاده از اصلاح جهت گردایان نقاط کلیدی^۲ و معیار محدودیت مقیاس^۳، تعدادی از تناظرهای نادرست را حذف کردند که این امر سبب بهبود الگوریتم SIFT در تصاویر چندسنجندة سنجش از دوری شد. هرچند این روش سبب افزایش نرخ تناظرهای درست و دقت انطباق می‌شود، پیچیدگی محاسباتی بالایی دارد. لینگائو و همکاران^۴ (۲۰۰۹) روش خوددوفقی SIFT برای بهبود عملگر SIFT در تصاویر هوایی را پیشنهاد دادند. در این روش، ضریب بافت محلی برای هر ویژگی محاسبه می‌شود. سپس، پنج مقدار آستانه تمایز در بازه (۰/۰۵، ۰/۰۱) در نظر گرفته می‌شود و براساس مقدار ضریب بافت محلی، یک مقدار آستانه تمایز به هر ویژگی اختصاص می‌یابد. برای هر نوع تصویر، تعداد و مقدار آستانه تمایز متفاوت است که از معایب این روش به‌شمار می‌رود. حسن و همکاران^۵ (۲۰۱۰) از اطلاعات همسایه برای بهبود تناظریابی SIFT استفاده کردند. حسین‌نژاد و نصری^۶ (۲۰۱۷) روش RKEM-SIFT را پیشنهاد کردند. در این روش، با حذف نقاط کلیدی زائد، فرایند تناظریابی بهبود می‌یابد. ما و همکاران^۷ (۲۰۱۷)، به‌قصد ارتقای دقت تناظریابی، از موقعیت، مقیاس و جهت هر نقطه کلیدی برای فرایند تناظریابی استفاده کردند. از مزایای این روش عملکرد مناسب آن در تصاویر چندسنجنده و چندطیفی سنجش از دوری و افزایش تعداد تناظرهای درست در تصاویر سنجش از دوری است. از معایب آن می‌توان به افزایش زمان اجرا و کاهش تعداد کل تناظرها اشاره کرد. اگرچه این بهبودها باعث افزایش دقت تناظریابی شده‌اند؛ از سویی، هنوز تعدادی تناظر نادرست در الگوریتم SIFT وجود دارد که در بعضی از کاربردها، از جمله شناسایی اشیا، حتی یک تناظر نادرست باعث تداخل در این فرایند می‌شود. از سوی

1. Yi et al.
2. gradient orientation modification
3. scale restriction criteria
4. Lingua et al.
5. Hasan et al.
6. Hossein-Nejad and Nasri
7. Ma et al.
8. random sample consensus

گرفته شده است. برای نمونه، در مقاله ژانگ و همکاران^۱

فرایند انطباق و افزایش تناظرهای درست در تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری می‌شود. سازماندهی ادامه مقاله بدین صورت است که در بخش دوم، مواد و روش‌ها بررسی می‌شود. در این بخش، ابتدا الگوریتم SIFT معرفی و پس از آن، روش پیشنهادی بررسی خواهد شد. بخش سوم مقاله به بررسی نتایج می‌پردازد و در انتها، جمع‌بندی مقاله در بخش چهارم خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ضمن معرفی الگوریتم SIFT در بخش ۲-۱، روش پیشنهادی در بخش ۲-۲ بررسی می‌شود.

۲-۱- معرفی الگوریتم SIFT

الگوریتم SIFT را دیوید لاو^۳ در سال ۲۰۰۴ معرفی کرد. این الگوریتم را می‌توان در سه مرحله استخراج ویژگی، ایجاد توصیفگر و تناظریابی میان ویژگی‌ها دسته‌بندی کرد.

۲-۱-۱- استخراج ویژگی با الگوریتم SIFT

مرحله استخراج ویژگی در این الگوریتم خود شامل سه مرحله است: استخراج اکستریم‌های فضای مقیاس، بهبود دقت موقعیت و حذف اکستریم‌های ناپایدار و در آخر، تخصیص جهت به هر ویژگی ایجاد شده. در ادامه، جزئیات هریک از این مراحل را شرح می‌دهیم.

• استخراج اکستریم‌های فضای مقیاس

اولین مرحله از فرایند استخراج ویژگی در الگوریتم SIFT شناسایی موقعیت‌هایی از تصویر است که مستقل از تغییر مقیاس تصویرند. برای این منظور، ویژگی‌های پایدار تصویر در مقیاس‌های متفاوت آن، با استفاده از «فضای مقیاس»^۴، استخراج می‌شوند. فضای مقیاس نمایش‌دهنده ساختارهای تصویر در مقیاس‌های

(۲۰۱۵)، مقدار ۵۰ و در مقاله^۲ یه و شان (۲۰۱۴)، مقدار ۱ در نظر گرفته شده است. تعیین مقدار آستانه مناسب در الگوریتم RANSAC امری بسیار مهم محسوب می‌شود چون اگر مقدار کوچکی انتخاب شود، به کاهش نرخ تناظرهای درست می‌انجامد و در صورتی که برای آن مقدار بزرگی انتخاب شود، نرخ تناظرهای نادرست افزایش می‌یابد که در نهایت، تأثیری جدی در نتیجه فرایند انطباق تصویر می‌گذارد. در مقاله حسین‌نژاد و نصری (۲۰۱۶)، مقدار آستانه به صورت وفقی، براساس طبقه‌بندی تناظرهای درست و تناظرهای نادرست، تعیین می‌شود. در این روش، بیشترین تناظرهای نادرست و کمترین تناظرهای درست حذف می‌شوند اما این روش، در تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری، کاربردی نیست چون شدت روشنایی تصاویر سنجش از دوری، به دلیل حسگرها و طیف‌های گوناگون، تفاوت فراوانی دارند که سبب ایجاد تناظرهای نادرست زیاد و تناظرهای درست اندکی می‌شود. در نهایت، فرایند انطباق با تعداد اندک تناظرهای درست با شکست مواجه می‌شود. این امر انگیزه پیشنهاد روشی جدید برای بهبود فرایند تناظریابی در این نوع تصاویر را فراهم می‌کند تا بتواند تناظرهای نادرست را به تناظرهای درست تبدیل کند.

در این مقاله، روشی پیشنهاد شده است که طبق آن، افزون بر حفظ تمام تناظرهای درست، تناظرهای نادرستی که در الگوریتم SIFT ایجاد می‌شود، به تناظرهای درست تبدیل می‌شود. بدین منظور، ابتدا با استفاده از انحراف بین تصاویر چندسنجنده سنجش از دور، مدل تبدیل افاین انتخاب می‌شود. سپس، در فرایندی تکراری، بهترین پارامترهای تبدیل بین نقاط متناظر محاسبه می‌شود و در نهایت، نقاط متناظر در تصویر مرجع، با بهترین مدل تبدیل در تصویر مورد انطباق، تناظر می‌یابند. این روش، با استفاده از روابط فضایی بین نقاط متناظر، تناظرهای نادرست را به تناظرهای درست تبدیل می‌کند که سبب بهبود دقت تناظریابی و

1. Zhang et al. 2. Ye and Shan
3. Lowe 4. scale space

آن، با نمونه‌برداری مجدد، نصف می‌گردد و به صورت تصویر ابتدایی اکتاو بعدی در نظر گرفته می‌شود. هدف از ایجاد فضای مقیاس، استخراج ویژگی‌هایی است که مستقل از مقیاس‌اند؛ بنابراین، برای استخراج موقعیت‌های پایدار میانی تصاویر DOG، در هر اکتاو (تصاویر سطح اول و آخر در هر اکتاو بررسی نمی‌شوند)، با هشت پیکسل همسایگی خود و نه پیکسل در همسایگی تصویر DOG بالایی و نیز نه پیکسل در همسایگی تصویر DOG پایینی مقایسه می‌شود و مقدار اکستریم (بیشینه یا کمینه) آن همچون ویژگی کاندیدا^۴ ذخیره می‌شود. در این مرحله، برای هر ویژگی استخراج‌شده براساس مقیاس تصویر DOG که از آن استخراج شده‌اند، پارامتر مقیاس انتخاب می‌شود. پس از این مرحله، باید اکستریم‌های ناپایدار حذف شوند که در ادامه شرح داده می‌شود.

• بهبود دقت موقعیت و حذف اکستریم‌های ناپایدار در طول این فرایند، ویژگی‌های دارای کنتراست پایین و ویژگی‌های قرار گرفته روی لبه حذف می‌شوند. الگوریتم، با درون‌یابی از داده‌ی مجاور هر نقطه کلیدی، محل دقیق این نقاط را تعیین می‌کند. درون‌یابی با استفاده از بسط سری تیلور درجه دوم از تابع تفاضل گوسی فضای مقیاس $D(x, y, \sigma)$ با نقطه کلیدی کاندیدا انجام می‌شود. این بسط تیلور مطابق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$D(X) = D + \frac{\delta D^T}{\delta X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\delta^2 D}{\delta X^2} X \quad \text{رابطه (۴)}$$

D و مشتقات آن در نقطه کلیدی ارزیابی می‌شوند و $X(x, y, \sigma)$ آفست این نقطه است. به منظور تعیین موقعیت اکستریم \hat{X} ، از رابطه (۴) به X مشتق گرفته می‌شود و برابر صفر قرار داده می‌شود؛ در نتیجه، \hat{X} مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

گوناگون است و مجموعه‌ای از تصاویر گوسی و تصاویر تفاضل گوسی^۱ در ابعاد متفاوت را تشکیل می‌دهد که در لایه‌های گوناگونی، با عنوان اکتاو^۲، مرتب‌شده‌اند (Lowe, 2004). شکل ۱ فضای مقیاس ایجادشده را نشان می‌دهد.

در ابتدا به منظور افزایش تعداد ویژگی‌های پایدار تصویر، با استفاده از درون‌یابی دوخطی، ابعاد تصویر دوبرابر می‌شود و به منزله تصویر سطح اکتاو اول در نظر گرفته می‌شود. پس از آن، تصویر سطح اول در روندی تکراری با کرنل گوسی پیچش^۳ می‌شود تا تصاویر گوسی فضای مقیاس در هر اکتاو پدید آید (تصاویر ستون چپ در شکل ۱)؛ بنابراین، تصاویر گوسی فضای مقیاس با استفاده از رابطه (۱) ایجاد می‌شوند.

رابطه (۱) $L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \otimes I(x, y)$ در این رابطه، $I(x, y)$ تابع تصویر، $G(x, y, \sigma)$ کرنل گوسی و \otimes بیانگر عملگر پیچش است. کرنل گوسی مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

پارامتر σ بیانگر مقیاس هر تصویر و مقدار اولیه آن برابر $\sigma_0 = 1/6$ است که با استفاده از یک پارامتر ثابت k ، در یک روند افزایش در سطوح گوناگون هر اکتاو، افزایش می‌یابد. در ادامه، تصاویر تفاضل گوسی با استفاده از تفاضل دو تصویر گوسی مجاور با رابطه (۳) محاسبه می‌شوند (مجموعه تصاویر ستون راست در شکل ۱).

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، $L(x, y, \sigma)$ تصویر گوسی با مقیاس σ و $L(x, y, k\sigma)$ تصویر گوسی با مقیاس $k\sigma$ در هر اکتاو محسوب می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۳) ملاحظه می‌کنید، مقیاس تصویر کوچک‌تر به منزله مقیاس تصویر DOG حاصل در نظر گرفته می‌شود. پس از ایجاد هر اکتاو، تصاویر گوسی که مقیاس آن دوبرابر مقیاس اولیه است، انتخاب می‌شود. سپس ابعاد

1. Difference of Gaussian (DOG)
2. octave 3. convolution
4. candidate

$$r = \frac{\alpha}{\beta} \quad \text{رابطه (۸)}$$

طبق پیشنهاد لاو، نقاطی که میزان نسبت میان مقادیر ویژه آنها بیشتر از ۱۰ باشد حذف می‌شوند. پس از حذف ویژگی‌های ناپایدار، باید به هر یک از ویژگی‌های پایدار باقی‌مانده یک جهت تخصیص داد که در ادامه به‌طور کامل شرح داده می‌شود.

• تخصیص جهت به هر ویژگی

در این مرحله، به‌منظور انجام‌دادن عمل تناظریابی مستقل از چرخش، برای هر یک از ویژگی‌هایی که از مرحله قبل استخراج شده‌اند، یک پارامتر جهت تعیین می‌شود. مراحل فرایند تخصیص جهت به‌ترتیب بدین‌صورت است که ابتدا، پنجره‌ای دایره‌ای شکل در اطراف هر ویژگی، در تصویر گوسی مربوط به آن، انتخاب می‌شود. مقدار شعاع دایره متناسب با مقیاس هر ویژگی و سه‌برابر مقیاس آن در نظر گرفته می‌شود. سپس، مقادیر اندازه و جهت گرادیان برای پیکسل‌های درون ناحیه محاسبه و مقادیر اندازه آن‌ها، با استفاده از یک تابع گوسی با انحراف معیار یک‌ونیم‌برابر مقیاس آن، وزن‌دهی می‌شوند.

۲-۱-۲- ایجاد توصیفگر با SIFT

پس از استخراج نقاط کلیدی در الگوریتم SIFT، مرحله بعدی ایجاد توصیفگر ویژگی‌ها به‌منزله ابزاری برای ایجاد تناظریابی میان تصاویر است. برای ایجاد توصیفگر در الگوریتم استاندارد SIFT، در ابتدا، ناحیه‌ای به‌صورت یک شبکه ۴×۴ در اطراف هر ویژگی در تصویر گوسی مربوط به آن در نظر گرفته می‌شود. ابعاد این ناحیه مطابق با مقیاس هر ویژگی و به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که هر سلول^۱ به‌صورت مربعی با ضلعی معادل با سه‌برابر مقیاس ویژگی باشد. سپس مختصات شبکه، معادل با جهت اصلی ویژگی مورد نظر، می‌چرخد.

$$\hat{X} = - \left(\frac{\delta^2 D}{\delta X^2} \right)^{-1} \frac{\delta D}{\delta X} \quad \text{رابطه (۵)}$$

سپس، میزان آفست \hat{X} به نقطه کلیدی کاندیدا افزوده و اندازه تابع نیز در این موقعیت اکسترمم، با استفاده از رابطه (۶)، بیان می‌شود.

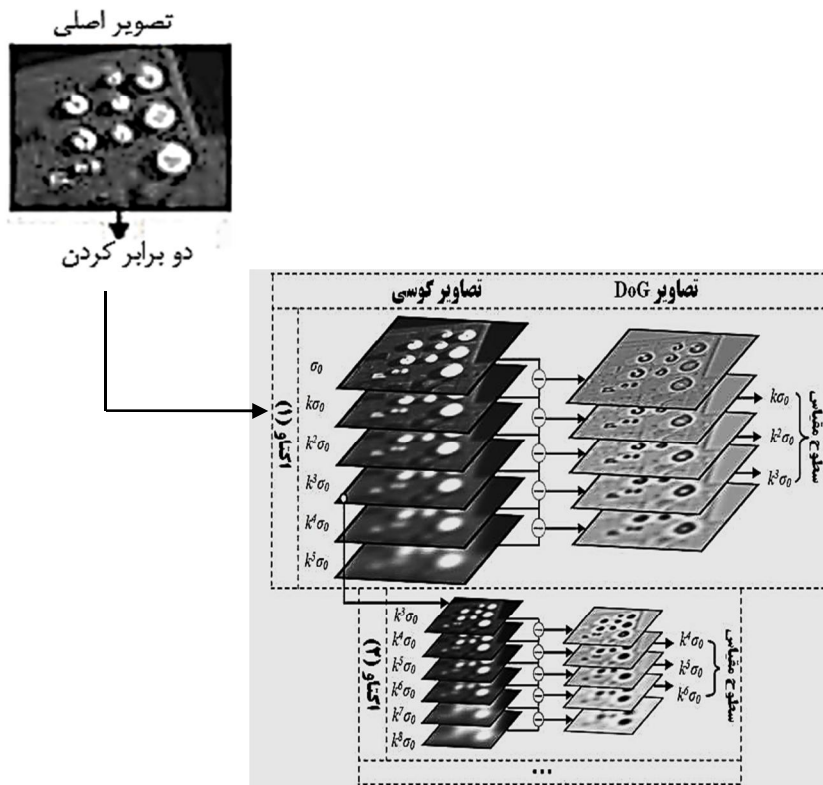
$$D(\hat{X}) = D + \frac{1}{2} \frac{\partial D^2}{\partial X} \hat{X} \quad \text{رابطه (۶)}$$

بدین‌ترتیب، موقعیت مکانی ویژگی در حد زیر پیکسل محاسبه و میزان مقیاس دقیق آن نیز برآورد می‌شود. اندازه قدر مطلق تابع در موقعیت اکسترمم $|D(\hat{X})|$ به‌منزله میزان کنتراست هر ویژگی در نظر گرفته می‌شود و برای حذف ویژگی‌های ناپایدار به‌کار می‌رود. مطابق با پیشنهاد لاو، ویژگی‌هایی که میزان کنتراست آن‌ها از مقدار آستانه ($\tau_c = 0/03$) کمتر باشد، ناپایدار و حساس به نویزند و حذف می‌شوند. در این مرحله، پس از حذف ویژگی‌هایی که کنتراست پایینی دارند، لازم است ویژگی‌هایی که روی لبه‌ها قرار دارند حذف شوند چون به نویز و تغییرات کوچک در همسایگی خود حساس‌اند (Lowe, 2004). بدین‌منظور، از نسبت میان مقادیر ویژه ماتریس هسیان برای تشخیص و حذف نقاط واقع بر لبه‌ها استفاده می‌شود. ماتریس هسیان ماتریس مشتق‌های جزئی مرتبه دوم به‌نسبت x و y است و مطابق رابطه (۷) برآورد می‌شود.

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه، D_{xx} مشتق دوم نقاط کاندیدا به‌نسبت x روی تصویر DOG، D_{xy} و D_{yx} مشتق دوم نقاط کاندیدا به‌نسبت x, y روی تصویر DOG، D_{yy} مشتق دوم نقاط کاندیدا به‌نسبت y روی تصویر DOG شمرده می‌شوند. فرض شده است که α مقدار ویژه بزرگ و β مقدار ویژه کوچک ماتریس هسیان باشد؛ بنابراین، نسبت این مقادیر ویژه مطابق با رابطه (۸) به‌دست می‌آید.

1. bin



شکل ۱. فضای مقیاس SIFT
منبع: Sedaghat et al., 2011

اولین و دومین همسایه نزدیک، برای ایجاد تناظرهای درست، استفاده می‌شود که این معیار مطابق رابطه (۹) است.

$$\frac{\|D_A - D_B\|}{\|D_A - D_C\|} < t \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه، t مقدار آستانه، D_B توصیفگر نزدیک‌ترین همسایه به توصیفگر D_A و D_C توصیفگر دومین همسایه نزدیک به این توصیفگر است. اگر فاصله بین نزدیک‌ترین همسایه تا توصیفگر، در مقایسه با فاصله دومین همسایه نزدیک تا توصیفگر مفروض، کمتر از حد آستانه باشد؛ عمل تناظریابی انجام می‌شود. در الگوریتم SIFT، مقدار t برابر 0.8 در نظر گرفته شده است (Lowe, 1999)

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، فرایند تناظریابی با استفاده از الگوریتم SIFT در تصاویر چندسنجنده سنسجش از دوری سبب ایجاد تعدادی تناظرهای نادرست

مقادیر اندازه و جهت گرادیان پیکسل‌های درون ناحیه‌ای چرخیده محاسبه و جهت گرادیان‌ها نیز، معادل با جهت اصلی ویژگی مورد نظر، چرخش داده می‌شود. در نهایت، توصیفگر SIFT به صورت برداری با 128 مؤلفه ایجاد می‌شود (Lowe, 2004).

۲-۱-۳- تناظریابی میان ویژگی‌ها در الگوریتم SIFT

ایجاد تطابق بین دو یا چند تصویر از یک صحنه را تناظریابی می‌گویند که در بینایی کامپیوتر، فتوگرامتری، بازیابی سه‌بعدی، ترکیب تصویر، انطباق تصویر و دیگر موارد کاربرد دارد (Song et al., 2014; Liu et al., 2012). فرایند تناظریابی در این الگوریتم با استفاده از فاصله اقلیدسی، بعد از استخراج ویژگی‌ها و ایجاد توصیفگرها در هر دو تصویر (تصویر مرجع و مورد انطباق)، انجام می‌شود. پس از محاسبه فاصله اقلیدسی میان توصیفگرها، از معیار تناظریابی مبتنی بر نسبت

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در این روابط، (x_1, y_1) ، (x_2, y_2) و (x_3, y_3) مختصات نقاط متناظر در تصویر مرجع و (x'_1, y'_1) ، (x'_2, y'_2) و (x'_3, y'_3) مختصات نقاط متناظر در تصویر مورد انطباق است و a, b, c, d, e, f پارامترهای مدل تبدیل اند.

گام دوم: ابتدا سه نقطه متناظر تصادفی برای محاسبه پارامترهای تبدیل انتخاب می‌شوند. سپس، براساس پارامترهای به دست آمده، مدل تبدیل مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. این مرحله به تعداد دفعات معین تکرار می‌شود.

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x'_1 = ax_1 + by_1 + c \\ y'_1 = dx_1 + ey_1 + f \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

در این روابط، a, b, c, d, e, f پارامترهای تبدیل، (x_1, y_1) مختصات نقاط متناظر در تصویر مرجع و (x'_1, y'_1) مختصات مدل تبدیل در تصویر مورد انطباق است. این مدل تبدیل را می‌توان به صورت HP_e هم نوشت که H همان پارامترهای تبدیل است. Pe نیز نقاط متناظر در تصویر مرجع شمرده می‌شود.

گام سوم: با هدف انتخاب بهترین مدل تبدیل، در هر تکرار، برای هر نقطه متناظر در تصویر مرجع، فاصله بین (P, HP_e) در تصویر مورد انطباق محاسبه می‌شود (مطابق رابطه (۱۴)). مدل تبدیلی که طبق رابطه (۱۵)، کمترین مقدار را داشته باشد بهترین مدل انتخاب خواهد شد.

$$T_m = \sum_{i=1}^n \|P_i - HP_{ei}\| \quad m = 1, \dots, e \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

می‌شود که در بخش بعدی، این تناظرها بهبود می‌یابند.

۲-۲- روش پیشنهادی

در این روش، از روابط فضایی میان ویژگی‌های متناظر برای انطباق تصاویر چندسنگنده استفاده می‌شود. تصاویر چندسنگنده سنجش از دور به تصاویری گفته می‌شود که از یک منطقه با حسگرهای متفاوت گرفته شده‌اند. این تصاویر ممکن است از نظر زمان اخذ، مقیاس و باندهای طیفی با هم تفاوت داشته باشند. در ادامه، جزئیات روش پیشنهادی شرح داده می‌شود.

گام نخست: ابتدا، براساس انحرافی که بین تصاویر چندسنگنده سنجش از دوری وجود دارد، مدل تبدیل مناسبی انتخاب می‌شود که براساس مدل تبدیل انتخاب شده، تعداد نقاط متناظر مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای تبدیل مطابق با رابطه (۱۰) است. تصاویر چندسنگنده سنجش از دوری معمولاً از نظر مقیاس، حرکت انتقالی و برش با هم متفاوت‌اند که این انحرافها بر اثر حرکت سنجندها و موارد دیگری پدید می‌آید. با توجه به نوع تصاویر و انحرافهایی که بین تصاویر وجود دارد، باید نوعی تبدیل مناسب انتخاب شود. بهترین تبدیل، برای استفاده در این تصاویر، تبدیل افاین است. تبدیل افاین در موارد دیگری، همچون محاسبه ریشه میانگین مربعات خطا، و روش رانساک برای مدل کردن نقاط تناظر در تصاویر سنجش از دوری به‌طور متداول استفاده می‌شود (Sedaghat et al., 2011; Li & Zhang, 2012).

$$q = \frac{p}{2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

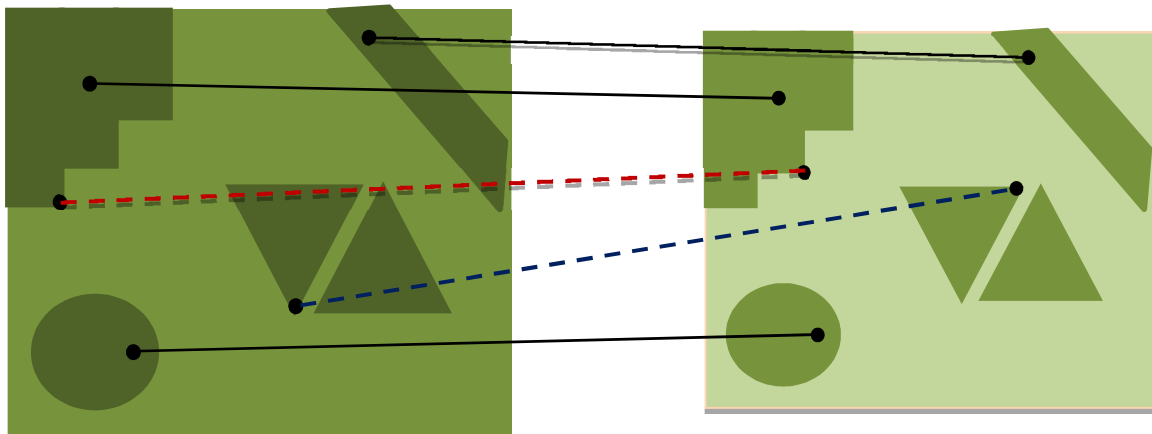
در این رابطه، q کمینه تعداد نقاط متناظر مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای تبدیل است و p تعداد پارامترها در مدل تبدیل افاین به‌شمار می‌رود. برای محاسبه پارامترهای تبدیل، به‌طور تصادفی، سه نقطه متناظر مطابق رابطه (۱۱) و (۱۲) انتخاب می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲-الف مشاهده می‌شود، فرایند تناظریابی با استفاده از الگوریتم SIFT دارای دو تناظر نادرست (خطوط آبی و قرمز) است. طبق شکل ۲-ب، با استفاده از روابط فضایی بین نقاط متناظر در روش پیشنهادی، تناظرهای نادرست به تناظرهای درست تبدیل شده‌اند. روش پیشنهادی سبب کاهش نرخ تناظرهای نادرست و افزایش تناظرهای درست می‌شود که در نهایت، به بهبود دقت تناظریابی و ارتقای فرایندهای بعدی، از جمله فرایند انطباق، می‌انجامد. شکل ۳ فلوجارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

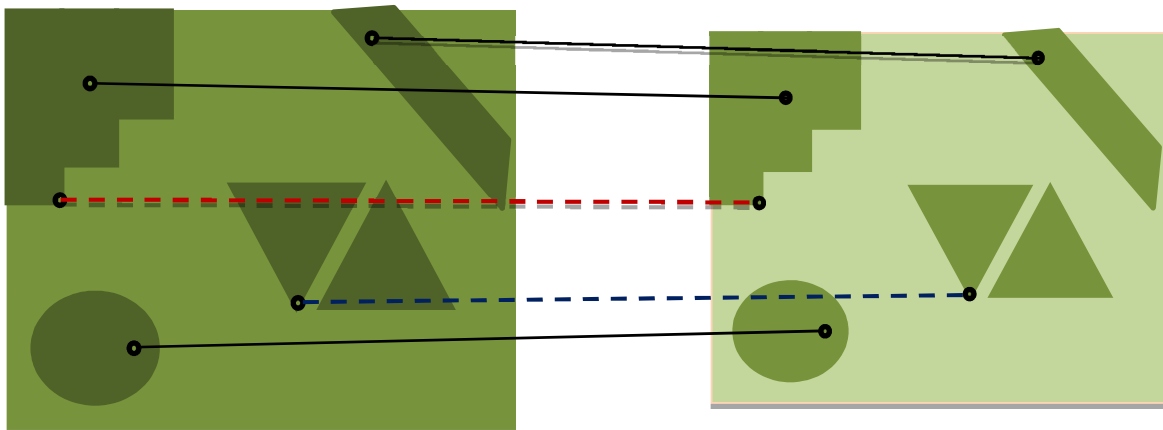
$$\text{bestT} = \min (T_m) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در این روابط، n تعداد نقاط متناظر، P_i ، I آمین تناظر در تصویر مورد انطباق و HP_{ei} آمین مدل تبدیل تناظر مرجع در تصویر مورد انطباق است. e تعداد تکرارها و T_m مجموع فاصله مدل تبدیل در تکرار m است.

گام چهارم: نقاط متناظر در تصویر مرجع با بهترین مدل تبدیل در تصویر مورد انطباق، که در گام قبل به دست آمده، تناظر می‌یابند. شکل ۲ عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. بررسی عملکرد روش پیشنهادی. (الف) فرایند تناظریابی با استفاده از SIFT؛ (ب) فرایند تناظریابی با استفاده از روش پیشنهادی

۳-۱- معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی کارایی روش‌های انطباق تصویر، از معیارهای ارزیابی کلاسیک تعداد تناظرهای درست و دقت تناظریابی مطابق رابطه (۱۶)، نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها مطابق رابطه (۱۷) و ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (Kupfer et al., 2015) مطابق رابطه (۱۸) استفاده می‌شود. هرچه مقدار دقت تناظریابی، نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها و تعداد تناظرهای درست بیشتر و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کمتر باشد، مناسب‌تر است.

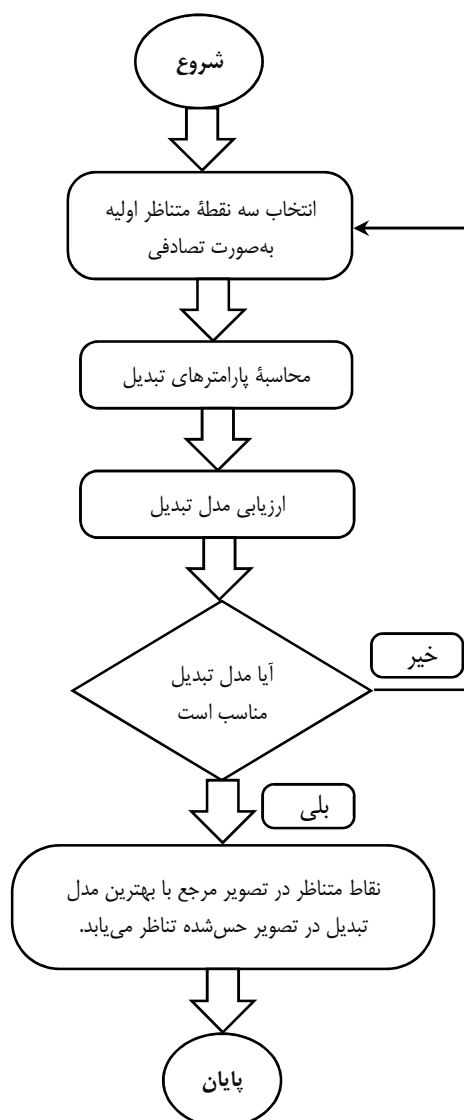
$$\text{precision} = \frac{NB_{CM}}{NB_{TM}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$F_r = \frac{NB_{CM}}{\min(N_{ref}, N_{sens})} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}_i)^2 + (y_i - \tilde{y}_i)^2} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در این روابط، NB_{CM} تعداد تناظرهای صحیح، NB_{TM} تعداد کل تناظرها، N_{ref} تعداد ویژگی‌ها در تصویر مرجع، N_{sens} تعداد ویژگی‌ها در تصویر مورد انطباق، (x_i, y_i) مختصات نقاط تناظر در تصویر مرجع، $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ مختصات نقاط تناظر تبدیل‌شده و N تعداد نقاط تناظریابی است.

برای ارزیابی روش‌های انطباق تصویر، افزون‌بر سه معیاری که بیان شد، تعداد کل تناظرها نیز می‌تواند اثر بسزایی در عملکرد داشته باشد. برای پی‌بردن به اهمیت تعداد کل تناظرها، دو مثال را شرح می‌دهیم. برای نمونه، حالتی که در آن فقط سه تناظر در تصاویر انجام شود و هیچ‌یک از تناظرها اشتباه نباشد، از حالتی که در صد تناظر، هیچ تناظر اشتباهی وجود نداشته باشد بدتر است. در دو حالت، نرخ تناظرهای اشتباه صفر است اما حالت دوم بر حالت اول برتری دارد چون دارای تعداد تناظرهای بیشتری است و در برابر تعداد



شکل ۳. فلوجارت روش پیشنهادی

۳- نتایج

در این بخش، ابتدا معیارهای ارزیابی روش‌های انطباق تصویر بررسی خواهند شد و پس از آن، معیارهای ارزیابی پیشنهادی مقاله معرفی خواهد شد. در نهایت، نتایج عملی انطباق تصاویر سنجش از دوری با روش پیشنهادی و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک آخرین زیربخش این قسمت خواهد بود.

1. Root-Mean-Square Error

$$SITMMR = \frac{NB_{EM} + 1}{NB_{TM}} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$SITMMC = \frac{NB_{CM} - 1}{NB_{TM}} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

۳-۱-۲- ارزیابی رادیومتریکی روش پیشنهادی

در این مقاله، از توصیفگر SIFT استفاده می‌شود که، در تناظریابی تصاویر در مقابل اعوجاج‌های هندسی و رادیومتری، بالاترین کارایی را دارد (Belongie et al., 2002). اما چون از روشی مبتنی بر تبدیل افاین جهت اصلاح تناظرهای نادرست به تناظرهای درست استفاده می‌شود، لازم است نقاط متناظر به دست آمده از جهت اعوجاج رادیومتری نیز بررسی شوند زیرا تبدیل افاین بر اعوجاج‌های هندسی تمرکز دارد.

در این بخش، جهت ارزیابی روش پیشنهادی در برابر اعوجاجات رادیومتری، از معیار ضریب همبستگی^۳ (Zhang et al., 2013)، (Yang et al., 2013) استفاده می‌شود. روش همبستگی در برابر تغییرات روشنایی، تغییرات مقیاس و چرخش تصاویر به خوبی عمل می‌کند و اساساً برای تناظریابی تصاویر چندسنگده استفاده می‌شود (Zitova & Flusser, 2003). در این معیار، با در نظر گرفتن پنجره‌ای اطراف نقاط متناظر در تصویر مرجع و تصویر مورد انطباق، مقدار همبستگی شدت روشنایی بین آنها محاسبه می‌شود. ضرایب همبستگی مطابق رابطه (۲۱) به دست می‌آید.

$$CC = \frac{\sum_{(i,j)} (A(i,j) - \bar{A})(B(i,j) - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{(i,j)} (A(i,j) - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{(i,j)} (B(i,j) - \bar{B})^2}} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

1. Sum of Inverse Total Number of Matching and Mismatching Ratio
2. Sum of Inverse Total Number of Matching and Mismatching Correctness
3. Cross- Correlation Coefficient

تناظرهای بیشتر، تناظر اشتباهی ندارد. این مثال در مورد تناظرهای درست هم صادق است. مثلاً حالتی که از چهار تناظر، هر چهار تناظر درست باشد بدتر از حالتی است که از چهار تناظر، هر چهار تناظر درست باشد. در این مثال، هر چند درستی تناظریابی (دقت تناظریابی) در دو حالت با هم برابر است، تعداد کل تناظرها در حالت نخست بسیار کم است و تعداد تناظرها در عملکرد فرایند انطباق تصاویر چندسنگده سنجش از دوری بسیار اهمیت دارد. با توجه به دو مثالی که بیان شد، درصد پیشنهاد معیارهای جدیدی برآمدیم که بتواند تعداد کل تناظرها را در نرخ تناظرهای اشتباه و درستی تناظریابی لحاظ کند. در بخش بعدی، این معیارهای پیشنهادی جدید را شرح می‌دهیم.

۳-۱-۱- معیارهای ارزیابی پیشنهادی

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، برای اینکه تعداد کل تناظرها را در نرخ تناظرهای نادرست و درستی تناظریابی (دقت تناظریابی) لحاظ کنیم، معیارهای جدیدی با نام‌های حاصل جمع معکوس تعداد کل تناظرها به علاوه نرخ تناظرهای نادرست (SITMMR)^۱، مطابق رابطه (۱۹)، و حاصل تفریق معکوس تعداد کل تناظرها منهای دقت تناظریابی (SITMMC)^۲، مطابق رابطه (۲۰)، پیشنهاد شد. هرچه مقدار معیار SITMMR، که مطابق رابطه (۱۹) است، کمتر باشد، این معیار مناسب‌تر است. برای پی بردن به لحاظ کردن تعداد تناظرها در این معیار، مثالی را با دو حالت شرح می‌دهیم. فرض کنید در حالت اول، از سه نقطه تناظر، هیچ‌یک از تناظرها اشتباه نباشد که مقدار SITMMR برابر ۰/۳۳ است. فرض کنید در حالت دوم، از صد تناظر، سه تا از تناظرها نادرست باشد که مقدار SITMMR برابر ۰/۰۴ است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حالت دوم بهتر از حالت اول بود و پاسخ بهتری نیز در پی داشت. این مثال در مورد معیار SITMMC هم صادق است و هرچه مقدار این معیار بیشتر باشد، مناسب‌تر است.

به صورت تجربی ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش‌ها، با معیارهای ارزیابی تعداد تناظرهای درست، دقت تناظریابی، نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها، ضرایب همبستگی، RMSE، معیارهای ارزیابی پیشنهادی SITMMR و SITMMC بررسی می‌شوند.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، زمان اخذ تصویر میان هر جفت از آنها چندین سال است که باعث می‌شود، علاوه بر تغییر شکل ناشی از تغییر موقعیت تصویربرداری، تغییراتی را که بر اثر گذر زمان رخ داده است شامل شود. اعوجاج‌های هندسی و رادیومتری بین این تصاویر بارز است چون، در هر جفت از تصاویر، حسگرهای متفاوتی به کار رفته است.

۳-۲-۱- بررسی عملکرد روش پیشنهادی در فرایند تناظریابی

در این آزمایش، از شش جفت تصویر چندسنجنده سنسجش از دوری استفاده شده و دو نمونه از نتایج تناظریابی در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. در شکل ۴، یک جفت تصویر با حسگرها و باندهای طیفی متفاوت و در شکل ۵، یک جفت تصویر با حسگرها و حد تشخیص رادیومتریکی متفاوت به کار رفته است. در شکل‌های ۴ و ۵، تناظرهایی که با مربع مشخص شده‌اند تناظرهایی نادرست‌اند که با الگوریتم SIFT (Lowe, 2004) و SRSIFT (Yi et al., 2008) ایجاد شده‌اند.

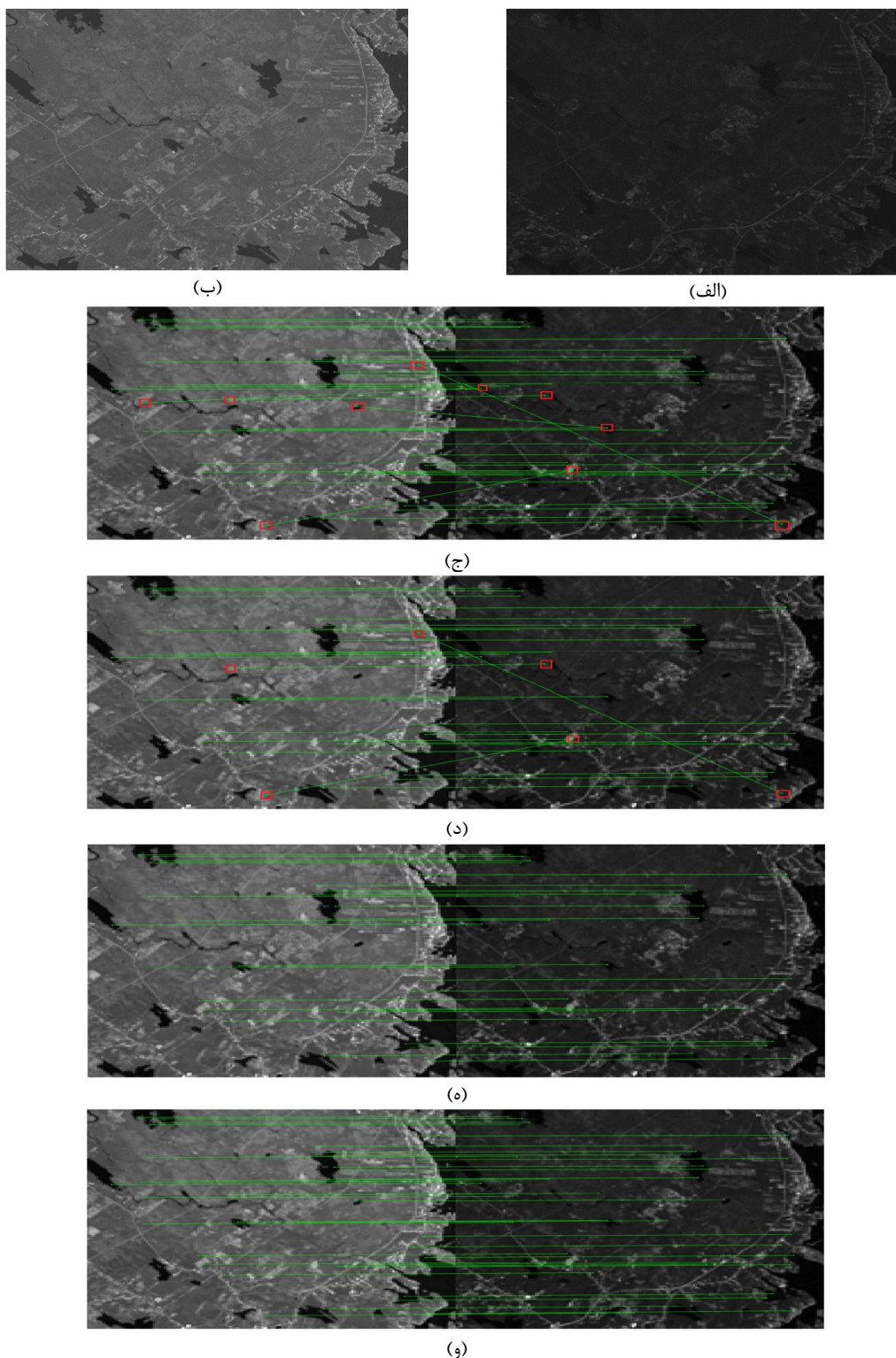
در این رابطه، A و B مقدار شدت روشنایی در تصویر مرجع و تصویر مورد انطباق، \bar{A} و \bar{B} میانگین شدت روشنایی و (i, j) ابعاد پنجره‌ای است که اطراف نقاط متناظر قرار می‌گیرد. هر چه مقدار ضریب همبستگی بیشتر باشد، مناسب‌تر است.

۳-۲-۲- نتایج و آزمایش‌ها

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با الگوریتم SIFT کلاسیک (Lowe, 2004)، الگوریتم SRSIFT (Yi et al, 2008) و الگوریتم RANSAC (Fischler & Bolles, 1981)، سه مجموعه آزمایش انجام می‌شود. در مجموعه آزمایش نخست، برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در فرایند تناظریابی، از شش جفت تصاویر چندسنجنده سنسجش از دوری با شرایط بافت گوناگون، همچون مناطق شهری و مناظر طبیعی، استفاده شده که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است. در مجموعه آزمایش دوم، فرایند انطباق این مجموعه تصاویر انجام و کارایی آنها بررسی می‌شود. در مجموعه سوم، عملکرد روش پیشنهادی روی تصاویر شبیه‌سازی شده با نویز اسپکل بررسی می‌شوند. در این آزمایش‌ها، مقدار پارامتر T_C در الگوریتم SIFT برای استخراج تعداد ویژگی، به پیشنهاد لاو (Lowe, 2004)، 0.3 و مقدار پارامتر t در این الگوریتم برای حذف تناظرهای نادرست، مطابق پیشنهاد لاو (Lowe, 2004)، 0.8 در نظر گرفته شده است. تعداد دفعات در روش پیشنهادی

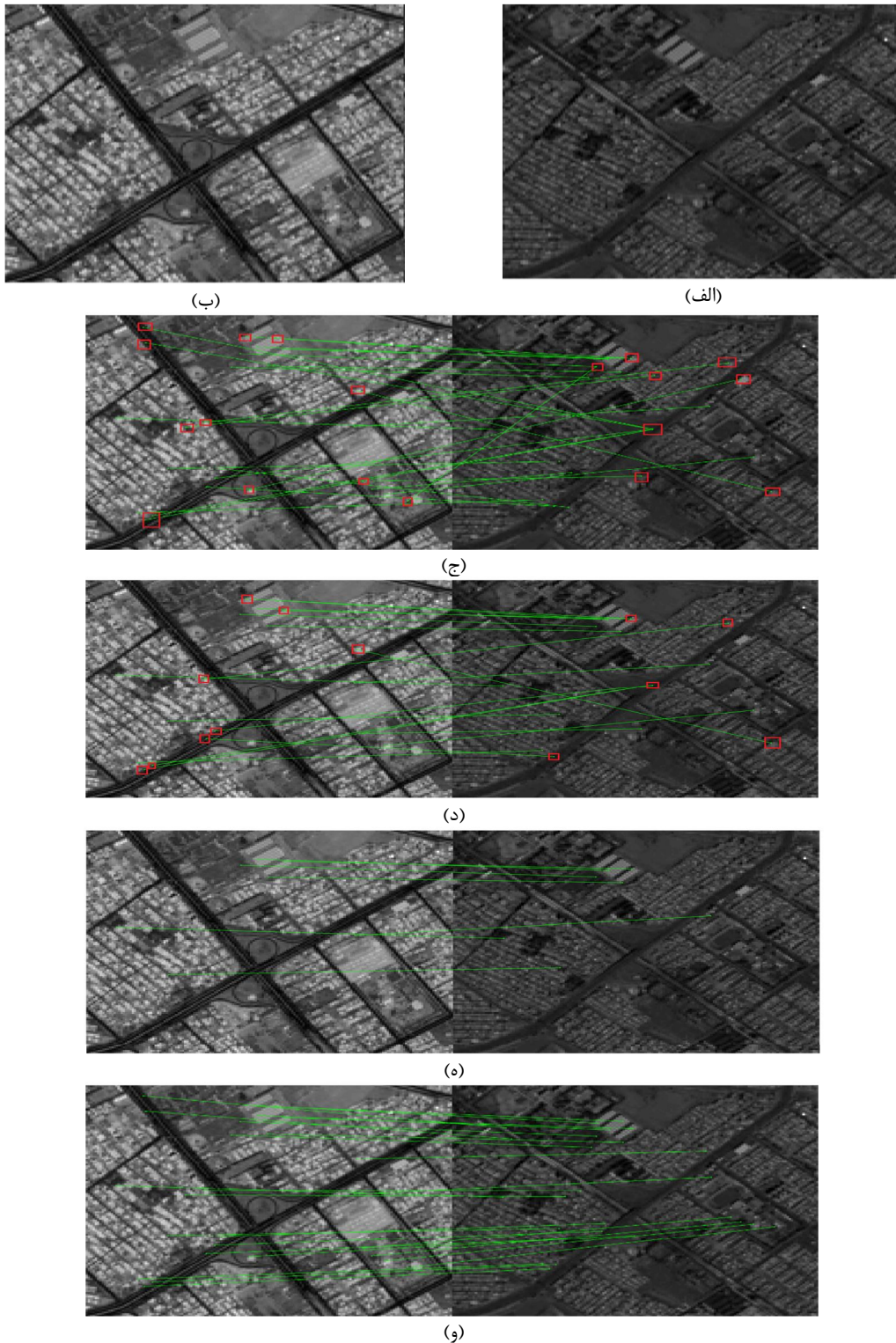
جدول ۱. مشخصات تصاویر چندسنجنده سنسجش از دوری

مجموعه داده	نوع ماهواره	وضعیت طیفی	ابعاد تصویر	اندازه پیکسل زمینی (متر)	تعداد بیت در هر پیکسل	زمان اخذ تصویر	موقعیت اخذ تصویر
مجموعه داده اول	SPOT4	Multi Spectral-band:1	۱۲۳۵×۶۱۱	۲۰	۸	۲۰۰۱	چین
مجموعه داده دوم	Landsat TM	Spectral-band:3 Multi	۱۲۲۰×۶۴۸	۳۰	۸	۲۰۰۴	چین
مجموعه داده پنجم	SPOT5	Panchromatic	۱۲۱۵×۱۳۱۱	۱۰	۸	۲۰۰۶	کانادا
مجموعه داده ششم	Landsat ETM ⁺	Spectral-band:3 Multi	۴۱۰×۴۴۰	۳۰	۸	۱۹۹۹	کانادا
مجموعه داده هفتم	IRS-1C	Panchromatic	۱۱۳۵×۱۳۴۶	۵	۸	۱۹۹۸	تهران
مجموعه داده هشتم	SPOT4	Panchromatic	۵۹۰×۷۰۰	۱۰	۸	۱۹۹۶	تهران
مجموعه داده نهم	IKONOS	Panchromatic	۱۰۸۲×۱۲۸۸	۱	۱۱	۲۰۰۱	شیراز
مجموعه داده دهم	IRS-P ₆	Panchromatic	۵۴۸×۶۵۱	۲/۵	۱۰	۲۰۰۶	شیراز
مجموعه داده یازدهم	IRS-1C	Panchromatic	۱۰۳۲×۱۱۲۲	۵	۶	۱۹۹۸	تهران
مجموعه داده دوازدهم	SPOT4	Panchromatic	۵۲۲×۵۶۸	۱۰	۸	۱۹۹۹	تهران
مجموعه داده سیزدهم	SPOT6	Panchromatic	۷۲۹×۷۹۲	۱/۵	۱۱	۲۰۱۲	اسپانیا
مجموعه داده چهاردهم	SPOT5	Panchromatic	۵۵۱×۵۹۸	۲/۵	۸	۲۰۰۹	اسپانیا



شکل ۴. بررسی فرایند تناظریابی در تصاویر با حسگرها و باندهای طیفی متفاوت. الف) تصویر مورد انطباق Landsat ETM+؛ ب) تصویر مرجع SPOT5؛ ج) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم SIFT (Lowe, 2004)؛ د) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم SRSIFT (Yi et al., 2008)؛ ه) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم RANSAC (Fischler & Bolles, 1981)؛ و) تناظریابی تصاویر با روش پیشنهادی

روشی جدید در تناظریابی مبتنی بر روابط فضایی ...



شکل ۵. بررسی فرایند تناظریابی در تصاویری با حسگرها و حد تشخیص رادیومتریکی متفاوت. الف) تصویر مورد انطباق IKONOS؛ ب) تصویر مرجع IRSP6؛ ج) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم SIFT (Lowe, 2004)؛ د) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم SRSIFT (Yi et al., 2008)؛ ه) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با الگوریتم RANSAC (Fischler & Biles, 1981)؛ و) تناظریابی تصاویر مرجع و مورد انطباق با روش پیشنهادی

تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری نشان می‌دهد. در روش پیشنهادی، هیچ تناظر نادرستی وجود ندارد و این امر سبب افزایش دقت تناظریابی و افزایش SITMMC و کاهش SITMMR می‌شود که در نهایت، به بهبود فرایند انطباق تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری می‌انجامد. جدول ۲ نتایج ارزیابی فرایند تناظریابی را نشان می‌دهد.

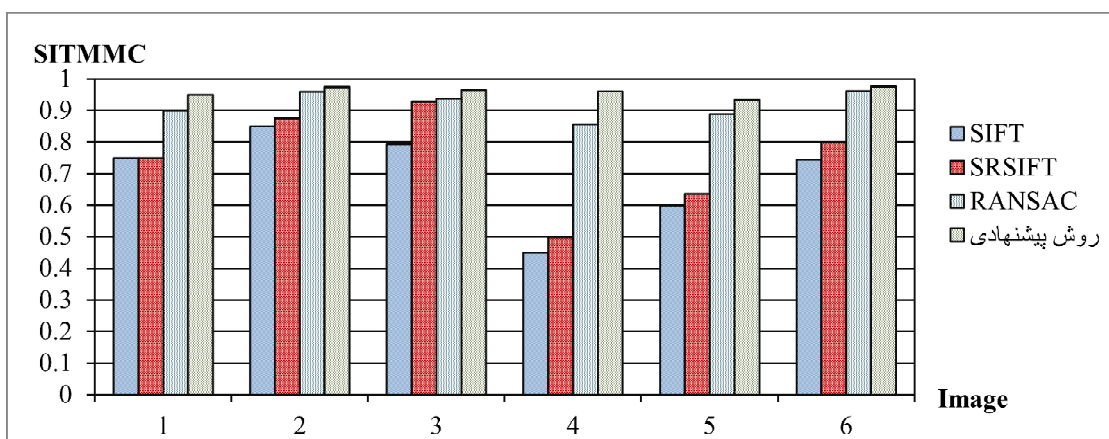
همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، به‌علت شباهت توصیفگرها با یکدیگر در الگوریتم SIFT، تناظرهای نادرست زیادی به‌وجود آمده است. تعداد تناظرهای نادرست در الگوریتم SRSIFT کمتر از الگوریتم SIFT کلاسیک است که این نکته عملکرد بهتر الگوریتم SRSIFT را، در مقایسه با الگوریتم SIFT کلاسیک، در

جدول ۲. نتایج آزمایش در تصاویر سنجش از دوری، با معیارهای ارزیابی دقت تناظریابی و تعداد تناظرهای درست و معیارهای ارزیابی پیشنهادی

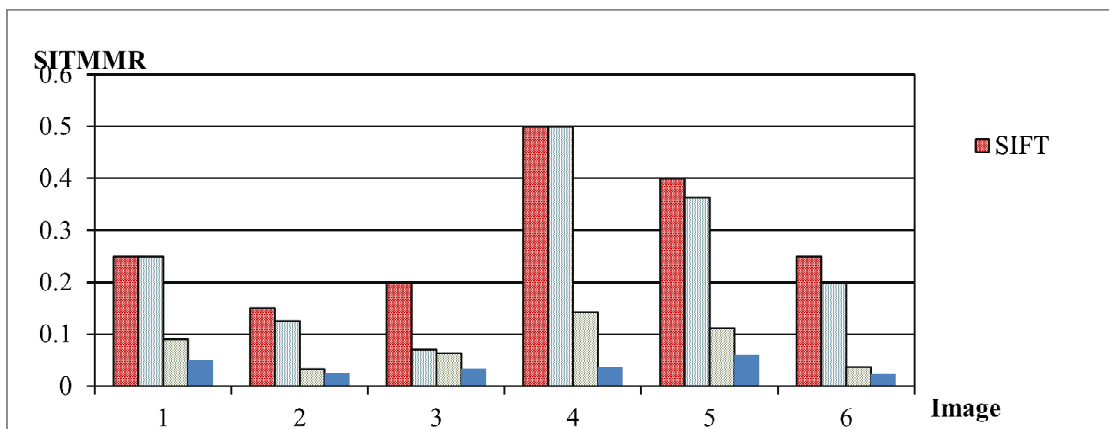
مجموعه داده	روش‌ها	تعداد کل تناظرها	تعداد تناظرهای درست	دقت تناظریابی	نرخ تکرارپذیری ویژگی‌ها	CC
مجموعه داده اول	SIFT (Lowe, 2004)	۲۰	۱۶	۰/۸۰	۰/۱۴۸	۰/۲۳۶
	al., 2008) SRSIFT (Yi et	۱۶	۱۳	۰/۸۱۲	۰/۱۲۰	۰/۳۰۳
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۱۱	۱۱	۱	۰/۱۰۱	۰/۳۴۸
	روش پیشنهادی	۲۰	۲۰	۱	۰/۱۸۵	۰/۴۲۵
مجموعه داده دوم	SIFT (Lowe, 2004)	۴۰	۳۵	۰/۸۷۵	۰/۱۵۷	۰/۵۳۰
	SRSIFT (Yi et al., 2008)	۳۲	۲۹	۰/۹۰۶	۰/۱۳۰	۰/۷۷۱
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۳۰	۳۰	۱	۰/۱۳۵	۸۱۴/۰
	روش پیشنهادی	۴۰	۴۰	۱	۰/۱۸۰	۹۰۲/۰
مجموعه داده سوم	SIFT (Lowe, 2004)	۲۹	۲۴	۰/۸۲۷	۰/۱۲۴	۳۴۳/۰
	SRSIFT (Yi et al., 2008)	۲۸	۲۷	۰/۹۶۴	۰/۱۳۹	۰/۳۵۷
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۱۶	۱۶	۱	۰/۸۲/۰	۶۰۶/۰
	روش پیشنهادی	۲۹	۲۹	۱	۱۵۰/۰	۶۱۰/۰
مجموعه داده چهارم	SIFT (Lowe, 2004)	۲۶	۱۴	۰/۵۳	۰/۰۶۱	۰/۷۱۱
	SRSIFT (Yi et al., 2008)	۱۸	۱۰	۰/۵۵۵	۰/۰۴۴	۷۱۳/۰
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۷	۷	۱	۰/۰۳۰	۸۱۶/۰
	روش پیشنهادی	۲۶	۲۶	۱	۰/۱۱۵	۹۰۴/۰
مجموعه داده پنجم	SIFT (Lowe, 2004)	۱۵	۱۰	۰/۶۶	۰/۲۱۷	۳۵۵/۰
	SRSIFT (Yi et al., 2008)	۱۱	۸	۰/۷۲	۰/۱۷۳	۴۹۷/۰
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۹	۹	۱	۰/۱۹۵	۶۵۲/۰
	روش پیشنهادی	۱۵	۱۵	۱	۰/۳۲۶	۹۲۴/۰
مجموعه داده ششم	SIFT (Lowe, 2004)	۴۳	۳۳	۰/۷۶	۵۶۸/۰	۰/۳۹۱
	SRSIFT (Yi et al., 2008)	۳۵	۲۹	۰/۸۲۸	۰/۵	۰/۴۳۹
	RANSAC (Fischler & Blles, 1981)	۲۷	۲۷	۱	۰/۴۶۵	۰/۶۹۲
	روش پیشنهادی	۴۳	۴۳	۱	۰/۷۴۱	۷۲۱/۰

همان گونه که در شکل ۶ می‌بینید، روش پیشنهادی روی شش جفت تصویر، به نسبت معیار ارزیابی SITMMC بیشترین مقدار و به نسبت معیار ارزیابی پیشنهادی SITMMR کمترین مقدار را دارد که موفقیت عملکرد این شیوه را در تناظریابی نشان می‌دهد. روش‌های دیگر، از جهت موفقیت در تناظریابی به نسبت معیارهای پیشنهادی SITMMC و SITMMR، به ترتیب، RANSAC و SRSIFT و در نهایت، SIFT به شمار می‌روند.

مطابق با جدول ۲، تعداد تناظرهای درست، دقت تناظریابی، نرخ تکرارپذیری و ضریب همبستگی در روش پیشنهادی، در مقایسه با الگوریتم SIFT کلاسیک و SRSIFT، بیشترین مقدار را دارند. الگوریتم RANSAC و روش پیشنهادی، از نظر دقت تناظریابی، عملکرد یکسانی دارند اما عملکرد روش پیشنهادی، از لحاظ تعداد تناظرهای درست و دیگر معیارهای ارزیابی، بهتر است. شکل ۶ روش پیشنهادی و روش‌های دیگر را با معیارهای ارزیابی پیشنهادی مقایسه می‌کند.



(الف)



(ب)

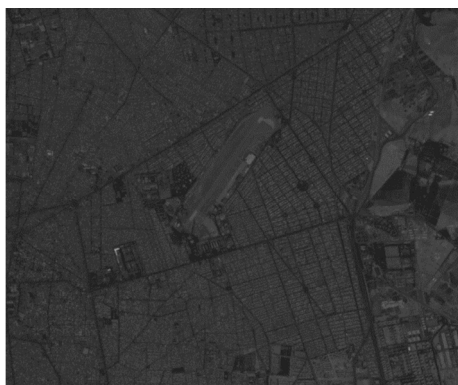
شکل ۶. نتایج آزمایش چهار روش تناظریابی روی جفت تصویر سنجش از دور. (الف) نتایج ارزیابی چهار روش تناظریابی با معیار پیشنهادی SITMMC؛ (ب) نتایج ارزیابی چهار روش تناظریابی با معیار پیشنهادی SITMMR

۳-۲-۲- بررسی عملکرد روش پیشنهادی در

فرایند انطباق

در این آزمایش، از یک جفت تصویر چندسنجنده سنجش از دوری استفاده شده است. عملکرد فرایند

انطباق بر روش پیشنهادی، روش SIFT کلاسیک و SRSIFT به صورت بصری و با معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی می‌شود. نتایج در شکل ۷ و جدول ۳ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۷. عملکرد فرایند انطباق تصویر. الف) تصویر مورد انطباق IRS-IC؛ ب) تصویر مرجع SPOT4؛ ج) فرایند انطباق با الگوریتم SIFT کلاسیک (Lowe, 2004)؛ د) فرایند انطباق با الگوریتم SRSIFT (Yi et al., 2008)؛ ه) فرایند انطباق با روش پیشنهادی

واریانس متغیر بین صفر تا یک، به تصویر سنجش از دوری (مجموعه داده دوم) می‌افزاییم و عملکرد روش پیشنهادی را با الگوریتم RANSAC، که در برابر نویز عملکرد مناسبی دارد، بررسی می‌کنیم. نتایج در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

نمودار شکل ۸ نشان می‌دهد تعداد تناظرهای درست، در هر دو روش، با افزایش واریانس کاهش می‌یابد اما تعداد تناظرهای درست در روش پیشنهادی بیشتر از الگوریتم RANSAC است که این نکته عملکرد مناسب روش پیشنهادی در برابر نویز اسپکل را می‌رساند. براساس نتایج این آزمایش و نیز با توجه به اینکه تصاویر SAR معمولاً نویز اسپکل دارند، پیش‌بینی می‌شود این روش پیشنهادی برای تناظریابی تصاویر مورد نظر، که نوع دیگری از تصاویر سنجش از دوری است، عملکرد مناسبی داشته باشد.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله، روشی به‌منظور بهبود عملکرد فرایند تناظریابی در تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری مطرح شد. فرایند تناظریابی تصاویر چندسنجنده سنجش از دوری، به‌علت تفاوت سنسورهای تصویربرداری، باندهای طیفی متفاوت و زمان‌های متفاوت تصویربرداری، سبب ایجاد تغییرات شدت

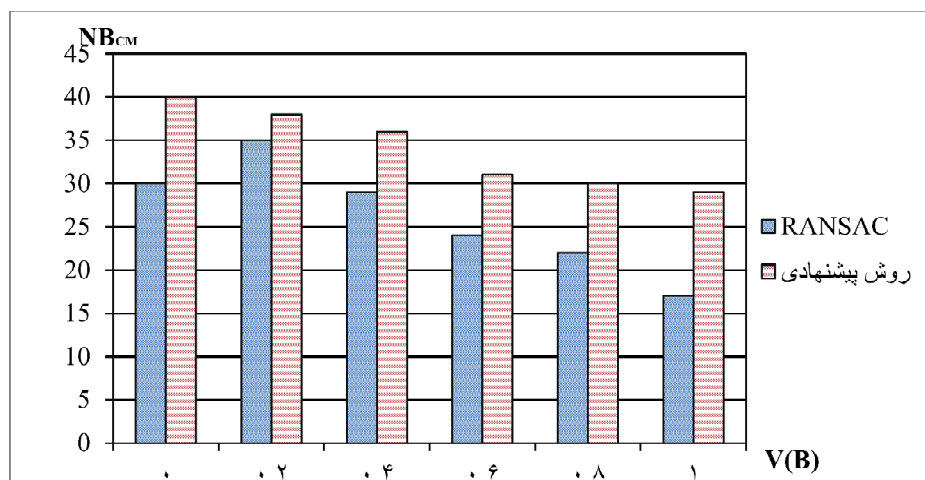
جدول ۳. نتایج آزمایش انطباق تصویر با معیار ارزیابی کلاسیک

روش‌ها	RMSE
SIFT (Lowe, 2004)	۰/۶۶
SRSIFT (Yi et al., 2008)	۰/۵۵
RANSAC (Fischler & Billes, 1981)	۰/۴۸
Proposed method	۰/۴۲

در نواحی مشکی شکل ۷-ج و ۷-د، ملاحظه می‌شود که انطباق به‌خوبی انجام نشده است. انطباق ناموفق در الگوریتم SIFT کلاسیک و الگوریتم SRSIFT به‌دلیل تناظرهای نادرست است. در روش پیشنهادی، به‌دلیل بهبود دقت تناظریابی و افزایش تناظر درست، فرایند انطباق به‌خوبی صورت گرفته است (شکل ۷-ه). براساس مقدار ریشه میانگین مربعات خطا، که یکی از معیارهای مهم در فرایند انطباق به‌شمار می‌رود، نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی دارد.

۳-۲-۳- بررسی روش پیشنهادی با نویز اسپکل شبیه‌سازی شده

در این بخش، به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در برابر نویز اسپکل، نویز اسپکل را، با میانگین یک و



شکل ۸. تعداد تناظرهای درست چهار روش تناظریابی روی تصویر شبیه‌سازی شده با نویز اسپکل

- Using Shape Contexts**, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24, PP. 509-522.
- Fischler, M.A. & Bolles, R.C., 1981, **Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography**, Communications of the ACM, 24, PP. 381-395.
- Hasan, M., Jia, X., Robles-Kelly, A., Zhou, J.R. & Pickering, M., 2010, **Multi-Spectral Remote Sensing Image Registration via Spatial Relationship Analysis on Sift Keypoints**, in Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International, PP. 1011-1014.
- Hosseini-Nejad, Z. & Nasri, M., 2017, **RKEM: Redundant Keypoint Elimination Method in Image Registration**, IET Image Processing, 11, PP. 273-284.
- Hosseini-Nejad, Z. & Nasri, M., 2016, **Image Registration Method Based on SIFT Features and Adaptive RANSAC Transform**, Communication and Signal Processing (ICCSP), 2016 International Conference, PP.1087-1091.
- Hsu C.-T. & Beuker, R.A., 2000, **Multiresolution Feature-Based Image Registration**, in Visual Communications and Image Processing, PP. 1490-1498.
- Jagadish, H. & Prakash, J., 2017, **Adaptive Markov Random Field Model for Area Based Image Registration and Change Detection**, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM), 6, PP. 50-58.
- Kupfer, B., Netanyahu, N.S. & Shimshoni, I., 2015, **An Efficient SIFT-Based Mode-Seeking Algorithm for Sub-Pixel Registration of Remotely Sensed Images**, Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 12, PP. 379-383.
- Kim, Y.S., Lee, J. H., & Ra, J. B., 2008, **Multi-sensor image registration based on intensity and edge orientation information, Pattern recognition**, Vol. 41, No.11, PP. 3356-3365.
- روشنایی می‌شود که این امر به کاهش دقت تناظریابی می‌انجامد. تکنیک اصلی در روش پیشنهادی ارتقای دقت تناظریابی و بهبود فرایند انطباق تصاویر است. به‌منظور حل مسئله افزایش تناظرهای درست و ارتقای فرایند انطباق تصاویر، از روابط فضایی نقاط متناظر SIFT استفاده می‌شود. روش پیشنهادی میانگین ۱۱/۴۸ درصدی در نرخ تکرارپذیری، میانگین ۷۳ درصدی تعداد تناظرهای درست و میانگین ۱۴/۲۰ درصدی ضریب همبستگی را، به‌نسبت الگوریتم RANSAC، بهبود بخشیده است. در مطالعات آتی، تلاش می‌شود با به‌کارگیری روش پیشنهادی در سایر نسخه‌های بهبودیافته الگوریتم SIFT، مانند الگوریتم‌های RKEM-SIFT و URSIFT، و نیز با استفاده از روش‌های تطبیق دیگر، همچون تطبیق دوگانه، بتوان به بیشینه بهبود فرایند انطباق در تصاویر چندسنجندة سنجش از دوری دست یافت.
- ۵- سپاسگزاری**
- نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از آقای دکتر امین صداقت، جهت در اختیار قراردادن تصاویر چندسنجندة سنجش از دوری، و از داوران و سردبیر محترم، به‌دلیل دیدگاه‌های مفیدشان که باعث افزایش کیفیت مقاله شده است، اعلام می‌دارند.
- ۶- منابع**
- صداقت، ا.، عبادی، ح.، مختارزاده، م.، ۱۳۸۹، **بهبود الگوریتم SIFT به‌منظور تناظریابی تصاویر ماهواره‌ای**، سنجش از دور و GIS ایران، سال دوم، شماره ۴، صص. ۱۰۰-۸۳.
- فلاح یخدانی، م.، عزیزی، ع.، ۱۳۹۰، **هم‌مرجع‌نمودن تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 و IRS-P6 براساس الگوریتم SIFT**، همایش ژئوماتیک ۹۰، دوره اول، شماره ۲، صص. ۶۷-۷۸.
- Belongie, S., Malik, J. & Puzicha, J., 2002, **Shape Matching and Object Recognition**

- Liu, Z., An, J. & Jing, Y., 2012, **A Simple and Robust Feature Point Matching Algorithm Based on Restricted Spatial Order Constraints for Aerial Image Registration**, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50, PP. 514-527.
- Li, Q., Zhang, H. & Wang, T., 2011, **Multispectral Image Matching Using Rotation-Invariant Distance**, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 8, PP. 406-410.
- Li, D. & Zhang, Y., 2012, **A Novel Approach for the Registration of Weak Affine Images**, *Pattern Recognition Letters*, 33, PP. 1647-1655.
- Lingua, A., Marenchino, D. & Nex, F., 2009, **Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications**, *Sensors*, 9, PP. 3745-3766.
- Lowe, D.G., 1999, **Object Recognition from Local Scale-Invariant Features**, in *Computer Vision, 1999, The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, PP. 1150-1157.
- Lowe, D.G., 2004, **Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints**, *International Journal of Computer Vision*, 60, PP. 91-110.
- Ma, K., Wen, Z., Wu, Y., Jiao, L., Gong, M. & Zheng, Y., 2017, **Remote Sensing Image Registration With Modified SIFT and Enhanced Feature Matching**, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14, PP. 3-7.
- Mikolajczyk, K. & Schmid, C., 2002, **An Affine Invariant Interest Point Detector**, in *Computer Vision—ECCV 2002*, ed: Springer, PP. 128-142.
- Mikolajczyk, K., & Schmid, C., 2004, **Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors**, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, PP. 63-86.
- Mikolajczyk, K. & Schmid, C., 2005, **A Performance Evaluation of Local Descriptors**, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 27, no. 10, PP. 1615–1630.
- Moigne, J.Le., Netanyahu, N.S. & Eastman, R.D., 2011, **Image Registration for Remote Sensing**, Cambridge University Press.
- Moreno, P., Bernardino, A. & Santos-Victor, J., 2009, **Improving the SIFT Descriptor with Smooth Derivative Filters**, *Pattern Recognition Letters*, 30, PP. 18-26.
- Murphy, J.M., Moigne, J.Le. & Harding, D.J., 2016, **Automatic Image Registration of Multimodal Remotely Sensed Data With Global Shearlet Features**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54, PP. 1685-1704.
- Sedaghat, A., Mokhtarzade, M. & Ebadi, H., 2011, **Uniform Robust Scale-Invariant Feature Matching for Optical Remote Sensing Images**, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 49, PP. 4516-4527.
- Sedaghat, A. & Ebadi, H., 2015, **Remote Sensing Image Matching Based on Adaptive Binning SIFT Descriptor**, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 53, PP. 5283-5293.
- Song, Z., Zhou, S. & Guan, J., 2014, **A Novel Image Registration Algorithm for Remote Sensing under Affine Transformation**, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 52, PP. 4895-4912.
- Yang, X., Pei, J. & Sun, W., 2013, **Elastic Image Registration Using Hierarchical Spatially Based Mean Shift**, *Computers in Biology and Medicine*, 43, PP. 1086-1097.
- Wang, X. & Fu, W., 2008, **Optimized SIFT Image Matching Algorithm, in Automation and Logistics**, ICAL 2008, IEEE International Conference, PP. 843-847.
- Xu, P., Zhang, L., Yang, K. & Yao, H., 2013, **Nested-SIFT for Efficient Image Matching and Retrieval**, *IEEE MultiMedia*, 20, PP. 34-46.
- Ye, Y. & Shan, J., 2014, **A Local Descriptor Based Registration Method for Multispectral Remote Sensing Images with Non-linear Intensity Differences**, *ISPRS*

- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 90, PP. 83-95,.
- Yi, Z., Zhiguo, C. & Yang, X., 2008, **Multi-Spectral Remote Image Registration Based on SIFT**, Electronics Letters, 44, PP. 1-2.
- Zhang, Q., Wang, L., Li, H. & Ma, Z., 2011, **Similarity-Based Multimodality Image Fusion with Shiftable Complex Directional Pyramid**, Pattern Recognition Letters, 32, PP. 1544-1553.
- Zitova, B. & Flusser, J., 2003, **Image Registration Methods: A Survey**, Image and Vision Computing, 21, PP. 977-1000.
- Zhang, R., Zhou, W., Li, Y., Yu, S. & Xie, Y., 2013, **Nonrigid Registration of Lung CT Images Based on Tissue Features, Computational and Mathematical Methods in Medicine**.
- Zhang, Q., Wang, Y. & Wang, L., 2015, **Registration of Images with Affine Geometric Distortion Based on Maximally Stable External Regions and Phase Congruency**, Image and Vision Computing, 36, PP. 23-39.