نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۸

Vol.7, No.1, Spring 2019

۱۹۳-۲۱۰

مقاله پژوهشی

افزایش کارایی و سرعت فرآیند تناظریابی کمترین مربعات در تصاویر رقومی

امین صداقت[1*]، نازیلا محمدی[1*]

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۱۰

چکیده

تناظریابی کمترین مربعات، *LSM*، (*Least Square Matching*) یکی از دقیق‌ترین روش‌های تناظریابی در فتوگرامتری و سنجش‌ازدور است. یکی از محدودیت‌های اساسی این روش پیچیدگی محاسباتی بالا به‌دلیل ابعاد بزرگ معادلات مشاهدات و روند تکراری آن تا دستیابی به جواب است. در این تحقیق روشی جدید به‌منظور بهبود سرعت و کارایی این الگوریتم با عنوان تناظریابی کمترین مربعات سریع، *FLSM* (*Fast Least Square Matching*) ارائه‌شده است. ایده اساسی در روش پیشنهادی کاهش تعداد معادلات مشاهدات در سرشکنی کمترین مربعات به‌منظور افزایش کارایی فرآیند تناظریابی است. برای این منظور پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی با استفاده از یک معیار ویژه با عنوان استحکام رتبه‌بندی شده و درصد مشخصی از پیکسل‌ها با بالاترین استحکام در روند سرشکنی شرکت داده می‌شوند. به‌منظور محاسبه استحکام پیکسل‌ها از ترکیب معیار تناسب فاز و آنتروپی استفاده شده است. روش پیشنهادی بر روی هشت جفت تصویر بردکوتاه، هوایی و ماهواره‌ای در دو دسته شبیه‌سازی‌شده و واقعی پیاده‌سازی شده و نتایج بیانگر بهبود قابل‌توجه سرعت (حدود سه برابر) با حفظ کیفیت فرآیند تناظریابی است.

کلیدواژه‌ها: تناظریابی، کمترین مربعات، استحکام، کارایی

*نویسنده مکاتبه کننده: تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی عمران، گروه مهندسی نقشه‌برداری

تلفن: ۳۳۳۴۲۵۳۳-۰۴۱

Email : am.sedaghat@gmail.com

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

۱- مقدمه

تناظریابی یکی از پردازش‌های اساسی در فتوگرامتری و سنجش‌ازدور است. از جمله کاربردهای مهم تناظریابی می‌توان به بازسازی سه بعدی مناظر [۱]، مثلث‌بندی هوایی [۲ و ۳]، هم‌مرجع‌سازی تصاویر [۳ و ۴]، آشکارسازی تغییرات [۵ و ۶] و شناسایی اهداف مکانی [۷] در تصاویر اشاره کرد. به‌طور کلی روش‌های تناظریابی به دو دسته اصلی روش‌های ناحیه‌مبنا و روش‌های عارضه‌مبنا دسته‌بندی می‌شوند.

روش‌های ناحیه‌مبنا مستقیماً توزیع درجات خاکستری تصاویر را درون پنجره‌هایی با ابعاد یکسان، با استفاده از معیارهای مشابهت (یا تفاوت) مختلف، به‌طور آماری مقایسه و موقعیت ماکزیمم شباهت (یا مینیمم اختلاف) را به‌عنوان متناظر تعیین می‌کنند. عموماً مرکز پنجره‌های متناظر شده به‌عنوان نقاط متناظر در نظر گرفته می‌شود. اساس روش‌های ناحیه‌مبنا بر اساس فرض پیوستگی[1] است [۸]. در واقع فرض بر این است که در سطح معینی از مقیاس که فرآیند تناظریابی انجام می‌گیرد، بیشترین قسمت پنجره تناظریابی، جزئی از یک سطح مسطح و پیوسته از شئ است. تناظریابی بر مبنای معیار ضریب همبستگی[2] یکی از رایج‌ترین روش‌های ناحیه‌مبنا است. این روش نسبتاً سریع بوده و اگر محتوای اطلاعاتی پنجره تناظریابی به اندازه کافی بوده و اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی میان تصاویر کم باشد، کارایی خوبی دارد. از دیگر معیارهای متداول در تناظریابی می‌توان به مجموع قدر مطلق اختلافات و اطلاعات متقابل[3] اشاره کرد.

روش‌های تناظریابی عارضه‌مبنا، مطابقت میان تصاویر را با استفاده از عوارض تصویری و ارتباط میان آن‌ها تعیین می‌کنند. عموماً روش‌های تناظریابی عارضه‌مبنا از سه مرحله اصلی شامل استخراج عوارض، ایجاد توصیفگر و تعیین مطابقت عوارض تشکیل می‌شوند [۹]. در مرحله اول موقعیت‌های متمایز و پایدار تصویر با عنوان عوارض استخراج می‌شوند. به‌طور کلی عوارض تصویری ویژگی‌های برجسته تصویر هستند که نسبت به انواع مختلف از تبدیل‌های هندسی و رادیومتریکی نظیر مقیاس، دوران، تغییر شکل ناشی از تغییرمنظر اخذ تصویر[4]، تغییرات روشنایی، تارشدگی و نویز، پایدار هستند. در مرحله دوم برای هر یک از عوارض مستخرج یک توصیفگر با استفاده از ویژگی‌های ناحیه اطراف هر عارضه مانند درجات خاکستری، مقادیر اندازه و جهت گرادیان، اطلاعات شکل، بافت و لبه‌ها ایجاد می‌شود. در نهایت در مرحله سوم فرآیند مطابقت میان عوارض با مقایسه توصیفگر آن‌ها با یکدیگر انجام شده و در نهایت اشتباهات احتمالی میان آن‌ها حذف می‌شوند. روش‌های مختلفی برای استخراج عوارض، ایجاد توصیفگرها و انجام تناظریابی میان آن‌ها ارائه شده است که در مقالات مروری متعددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند که به‌عنوان نمونه می‌توان به منابع [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴] اشاره نمود.

روش‌های ناحیه‌مبنا، توانایی تناظریابی با دقت‌های بسیار بالا را دارند. به‌منظور افزایش قابلیت‌اطمینان این دسته از روش‌ها، الگوریتم‌های سلسله مراتبی[5] و الگوریتم‌های آرام‌سازی[6] استفاده شده [۱۵] و به‌منظور افزایش کارایی و کاهش فضای جستجو، قیدهای هندسی مختلفی نظیر خط اپی‌پولار در نظر گرفته می‌شوند. بااین‌وجود روش‌های ناحیه‌مبنا دارای ضعف‌هایی نیز هستند. ازجمله محدودیت‌های روش‌های ناحیه‌مبنا می‌توان به پیچیدگی محاسباتی بالا، نیاز به فضای جستجو و مقدار اولیه مناسب،

[1] Continuity Assumption
[2] Cross Correlation Matching
[3] Mutual Information
[4] Viewpoint
[5] Hierarchical Matching
[6] Relaxation

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

حساسیت در برابر تغییرات شدید هندسی و روشنایی و ضعف در مناطق یکنواخت و پنهان‌شدگی اشاره کرد [۱۶].

در مقایسه با روش‌های ناحیه‌مبنا، روش‌های عارضه‌مبنا قابلیت اطمینان بالاتری داشته و در برابر اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی عملکرد بهتری دارند. البته بایستی توجه داشت که قابلیت اطمینان تناظریابی در آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر کیفیت عوارض استخراج شده است. همچنین به‌علت جابه‌جایی موقعیت مکانی عوارض در دو تصویر، دقت تناظریابی در آن‌ها محدود به‌دقت استخراج عوارض است. علاوه بر این همواره تعداد زیادی از تناظرهای انتخاب شده اشتباه هستند و حذف آن‌ها فرآیندی نسبتاً مشکل است.

روش تناظریابی کمترین مربعات (LSM[1]) به‌عنوان یک روش تناظریابی بسیار دقیق به‌منظور پوشش نقاط ضعف روش‌های تناظریابی ناحیه‌مبنا ارائه شده است [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. این روش بر مبنای مجموع مربعات اختلافات درجات خاکستری درون پنجره تناظریابی، با در نظر گرفتن تصحیحات هندسی و رادیومتریکی است. برای این منظور موقعیت و شکل پنجره تناظریابی در یک روند سرشکنی تکراری، تا زمان دستیابی به مینیمم اختلافات درجات خاکستری برآورد می‌شود. روش تناظریابی LSM با در نظر گرفتن قید ارتفاعی، از فضای تصویر به فضای زمین نیز توسعه داده شده است. علاوه بر این قابلیت انجام هم‌زمان فرآیند تناظریابی به‌صورت قیود هندسی چند تصویری (MPGCs[2]) نیز برای بهبود دقت و قابلیت‌اطمینان تناظریابی در آن وجود دارد [۲۰ و ۲۱]. از دیگر تحقیقات انجام شده در مورد تناظریابی کمترین مربعات می‌توان به این موارد اشاره کرد. لین[3] و همکاران [۲۲] از الگوریتم تناظریابی کمترین مربعات برای استخراج شبکه راه‌ها استفاده کرده‌اند. دبلا[4] و کاب[5] [۲۳] از الگوریتم تناظریابی کمترین مربعات برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی و تغییر شکل با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با حد تفکیک بالا و هوایی استفاده کرده‌اند. بثمن[6] و لومن[7] [۲۴] اثر انواع مختلف از مدل‌های هندسی نظیر چندجمله‌ای‌ها را در فرآیند تناظریابی کمترین مربعات بررسی کرده‌اند. هان[8] و همکاران [۲۵] الگوریتم تناظریابی کمترین مربعات با قید مرزی را به‌منظور تناظریابی دقیق و پایدار در تصاویر مایل ارائه کرده‌اند.

با وجود دقت بسیار بالا، پیچیدگی محاسباتی روش تناظریابی کمترین مربعات زیاد بوده و روند محاسباتی با استفاده از آن کند است. در این تحقیق روشی جدید به‌منظور بهبود سرعت و کارایی این روش با عنوان تناظریابی کمترین مربعات سریع (FLSM[9]) ارائه شده است. در روش پیشنهادی تعداد معادلات مشاهدات با بهره‌گیری از یک معیار ویژه مبتنی بر پایداری و تمایز پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی کاهش داده می‌شود. در ادامه در بخش دوم روش تناظریابی کمترین مربعات تشریح شده و سپس در بخش سوم روش پیشنهادی به‌منظور بهبود کارایی آن معرفی می‌شود. سپس در بخش چهارم نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی ارائه شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای تحقیق بیان خواهد شد.

۲- تناظریابی کمترین مربعات

روش تناظریابی کمترین مربعات، LSM، یک روش بسیار دقیق برای تناظریابی انواع مختلف تصاویر است [۱۷، ۱۸ و ۱۹]. مشابه دیگر روش‌های تناظریابی

[1] Least Square Matching
[2] Multiphoto Geometrically Constraints
[3] Lin
[4] Debella
[5] Kääb
[6] Bethmann
[7] Luhmann
[8] Han
[9] Fast Least Square Matching

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

ناحیه‌مبنا، فرآیند تناظریابی در این الگوریتم نیز با مقایسه دو پنجره تناظریابی و الگو در دو تصویر انجام می‌پذیرد. اساس این روش بر مبنای مجموع مربعات اختلافات درجات خاکستری درون پنجره تناظریابی، با در نظر گرفتن تصحیحات هندسی و رادیومتریکی است. برای این منظور تا زمان دستیابی به حالتی که اختلافات درجات خاکستری مینیمم شود، موقعیت و شکل پنجره تناظریابی در یک روند تکراری و از طریق یک فرآیند سرشکنی برآورد می‌شود.

به‌منظور مقایسه پیکسل به پیکسل دو پنجره تناظریابی و الگو، فرض اساسی در روش LSM این است که پنجره‌های موردنظر مربوط به یک ناحیه مسطح از یک منظره هستند. در صورتی که پنجره‌های تناظریابی با ابعاد کوچک در نظر گرفته شوند، به‌عنوان یک ناحیه مسطح قابل تقریب بوده و فرض فوق برقرار است [۲۶ و ۲۷]. فرض کنید $f(x,y)$ بیانگر درجات خاکستری پنجره الگو در تصویر اول و $g(x,y)$ بیانگر درجات خاکستری پنجره تناظریابی در تصویر دوم است. در صورتی که دو پنجره مربوط به دو ناحیه نظیر باشند، آن‌گاه اختلاف درجات خاکستری آن‌ها می‌تواند مربوط به یکی از دو عامل اصلی زیر باشد:

۱- تغییرات روشنایی تصاویر ناشی از عوامل مختلف نظیر تغییر شرایط محیطی در اثر گذر زمان، انعکاس‌های متفاوت از منظرهای مختلف، تفاوت در سیستم ثبت درجات خاکستری، اعوجاجات ناشی از اتمسفر، نویز سنسور یا نویز ایجاد شده در محاسبات

۲- اعوجاجات هندسی ناشی از عوامل مختلف نظیر اختلاف مقیاس، اختلافات دورانی، تغییر شکل ناشی از تغییر موقعیت اخذ تصویر، جابه جایی ناشی از اختلاف ارتفاع و مناطق پنهان شده

با درنظر گرفتن $e(x,y)$ به‌عنوان نویز حاصل از اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی، معادله مشاهده در روش تناظریابی LSM به ترتیب زیر تشکیل می‌شود:

$$f(x,y)-e(x,y)=T_R(g(T_G(x,y))) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن $f(x,y)$ بیانگر درجات خاکستری پنجره الگو، $g(x,y)$ بیانگر درجات خاکستری پنجره تناظریابی، $e(x,y)$ بیانگر نویز، T_R بیانگر مدل تبدیل رادیومتریک و T_G نیز بیانگر مدل تبدیل هندسی است. عموماً یک تابع خطی به‌عنوان تبدیل رادیومتریکی و یک تبدیل افاین به‌عنوان تبدیل هندسی در نظر گرفته می‌شود که در این‌صورت رابطه (۱) به‌صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$f(x,y)-e(x,y)=r_0+r_1\cdot g(x',y') \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن r_0 و r_1 بیانگر دو پارامتر تبدیل خطی رادیومتریکی بوده و x' و y' نیز با استفاده از تبدیل هندسی افاین به ترتیب زیر برآورد می‌شوند:

$$\begin{aligned} x' &= a_0+a_1\cdot x+a_2\cdot y \\ y' &= b_0+b_1\cdot x+b_2\cdot y \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن a_0، a_1، a_2، b_0، b_1، b_2 بیانگر شش پارامتر تبدیل هندسی افاین هستند. معادله مشاهده رابطه (۲) یک معادله غیر خطی بوده و با استفاده از بسط سری تیلور به ترتیب زیر قابل خطی‌سازی است:

$$\begin{aligned} f(x,y)-e(x,y)=g_0(x,y)+g_x\cdot\delta a_0+g_x\cdot x\cdot\delta a_1+g_x\cdot y\cdot\delta a_2+\\ g_y\cdot\delta b_0+g_y\cdot x\cdot\delta b_1+g_y\cdot y\cdot\delta b_2+r_0+r_1\cdot g_0(x,y) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن g_x و g_y بیانگر مشتقات جزئی پنجره تناظریابی در جهت x و y به ترتیب زیر هستند:

رابطه (۵)

$$g_x=\frac{\partial g_0(x,y)}{\partial x} \qquad g_y=\frac{\partial g_0(x,y)}{\partial y}$$

در صورتی که بردار $\hat{\mathbf{x}}$ به‌عنوان بردار مجهولات، ماتریس ضرایب $\mathbf{A}$ به‌عنوان مشتقات جزئی معادلات مشاهدات نسبت به مجهولات، بردار $\mathbf{l}$ به‌عنوان بردار مشاهدات حاصل از اختلاف درجات خاکستری دو پنجره، بردار $\mathbf{v}$ به‌عنوان بردار باقیمانده‌ها و تعداد پیکسل‌های پنجره تناظریابی نیز برابر n باشد،

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

آنگاه تعداد u پارامتر مجهول مسئله با استفاده از روش کمترین مربعات به ترتیب زیر قابل برآورد هستند :

رابطه (۶)
$$\mathbf{l}_{n\times 1}+\mathbf{v}_{n\times 1}=\mathbf{A}_{n\times u}\cdot\hat{\mathbf{x}}_{u\times 1}$$
$$\hat{\mathbf{x}}=(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{l})$$

در این صورت بردار باقیمانده‌ها و فاکتور واریانس ثانویه به ترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

رابطه (۷)
$$\mathbf{v}=\mathbf{A}\cdot\hat{\mathbf{x}}-\mathbf{l}$$
$$\hat{\sigma}_0^2=\frac{\mathbf{v}^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{v}}{n-u}$$

ازآنجاکه معادله مشاهده در تناظریابی LSM یک معادله غیر خطی است، لذا فرآیند سرشکنی کمترین مربعات باید به‌صورت تکراری انجام پذیرد. برای این منظور مقدار تقریبی پارامترهای مجهول به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

رابطه (۸)
$$a_1^0=a_2^0=b_1^0=r_1^0=0$$
$$a_1^0=b_2^0=r_2^0=1$$

در هر تکرار از فرآیند سرشکنی، میزان تصحیحات پارامترهای مجهول برآورد شده و بعد از اعمال آن‌ها، به‌عنوان مقادیر تقریبی تکرار بعدی در نظر گرفته می‌شود. تکرار فرآیند سرشکنی تا زمان دستیابی به معیارهای توقف ادامه پیدا می‌کند. عموماً زمانی که میزان تغییر مختصات نقاط کمتر از یک حد آستانه مشخص (معمولاً برابر ۰/۰۲ پیکسل) شده و یا تعداد تکرارها برابر حداکثر مقدار در نظر گرفته شده (معمولاً برابر ۲۰ تکرار) شود، عملیات سرشکنی پایان می‌پذیرد.

نکته اساسی قابل ذکر این است که در هر تکرار، میزان مختصات‌های برآورد شده حاصل از سرشکنی به‌صورت مقادیر غیر صحیح بوده و ازاین‌رو جهت برآورد مقدار درجه خاکستری مربوط به آن‌ها باید از یک روش درون‌یابی نظیر روش دوخطی[1] استفاده شود. در شکل (۱) یک مثال از فرآیند تناظریابی LSM در یک جفت تصویر نمونه نشان داده شده است

روش تناظریابی LSM دقت تناظریابی بسیار بالایی داشته و در بیشتر نرم‌افزارهای فتوگرامتری و سنجش‌ازدور استفاده شده است. باوجود دقت بالا، روش تناظریابی LSM دارای محدودیت‌هایی نیز است. یک محدودیت مهم آن وابستگی به مقدار تقریبی مناسب برای شروع تناظریابی است. به‌طور کلی برای موفقیت فرآیند تناظریابی با استفاده از الگوریتم LSM، باید حداقل نصف پیکسل‌های درون پنجره تناظریابی و الگو با یکدیگر اشتراک داشته باشند [۲۶]. مشکل بعدی روش LSM روند سرشکنی تکراری آن و زمان محاسباتی بالا برای انجام محاسبات آن است. در بخش بعدی یک روش جدید برای بهبود سرعت تناظریابی کمترین مربعات معرفی خواهد شد.

۳- تناظریابی کمترین مربعات سریع پیشنهادی

در این بخش جزئیات الگوریتم پیشنهادی با نام تناظریابی کمترین مربعات سریع (FLSM) به‌منظور بهبود سرعت و کارایی روش تناظریابی کمترین مربعات بیان می‌شود. ایده اساسی در روش تناظریابی FLSM بر مبنای دو مورد زیر است:

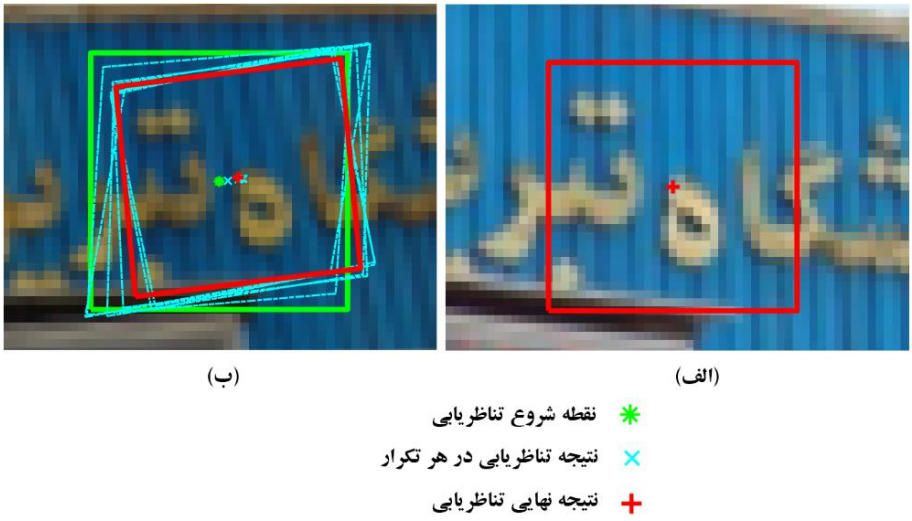
- **گزینش پیکسل‌ها بر مبنای معیار استحکام:** **در روش تناظریابی کمترین** مربعات استاندارد، LSM، تمام پیکسل‌های موجود در پنجره تناظریابی در معادلات مشاهدات فرآیند سرشکنی شرکت داده می‌شوند. در روش پیشنهادی FLSM به‌منظور افزایش کارایی، تعداد پیکسل‌های مورد استفاده برای انجام تناظریابی کمترین مربعات کاهش داده می‌شود. برای این منظور پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی با استفاده از یک معیار ویژه با نام استحکام، رتبه‌بندی شده و تنها تعداد مشخصی از پیکسل‌ها با بالاترین میزان استحکام در فرآیند سرشکنی شرکت داده می‌شوند. این فرآیند باعث کاهش چشمگیر ابعاد معادلات سرشکنی شده و سرعت فرآیند تناظریابی را به میزان بسیار زیادی

[1] Bilinear

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

افزایش می‌دهد. انتظار بر این است که پیکسل‌ها با استحکام پایین مربوط به مناطق یکنواخت تصویر بوده و حذف آن‌ها در فرآیند سرشکنی، علاوه بر افزایش سرعت، قابلیت‌اطمینان تناظریابی را نیز افزایش دهد.

- **سرشکنی وزن‌دار**: فرآیند سرشکنی در روش تناظریابی FLSM به‌صورت وزن‌دار پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که در مورد قبلی بیان شد در روش پیشنهادی برای هر پیکسل از پنجره تناظریابی یک معیار استحکام محاسبه می‌شود. انتظار بر این است که پیکسل‌ها با میزان استحکام بیشتر مربوط به‌عوارض ساختاری و متمایز نظیر لبه‌ها و گوشه‌ها بوده و پایداری بیشتری در برابر اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی داشته باشند. بنابراین به‌منظور تأثیر بیشتر پیکسل‌ها با استحکام بیشتر در فرآیند تناظریابی برای افزایش کارایی و دقت، فرآیند سرشکنی به‌صورت وزن‌دار انجام می‌پذیرد. میزان وزن هر پیکسل در فرآیند سرشکنی برابر میزان استحکام آن در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱۹: یک مثال از روش تناظریابی LSM، (الف) پنجره الگو در تصویر اول، (ب) موقعیت پنجره تناظریابی در تصویر دوم در یک روند تکراری تا زمان همگرایی

با توجه به موارد بالا مهم‌ترین موضوع در روش FLSM، مسئله محاسبه معیار استحکام پیکسل‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها است. انتظار بر این است که عوارضی که استحکام بالاتری دارند، تمایز و پایداری بالاتری داشته و نقش مؤثرتری برای موفقیت در فرآیند تناظریابی در مقایسه با دیگر پیکسل‌ها داشته باشند. با رتبه‌بندی صحیح پیکسل‌ها می‌توان تعداد آن‌ها را کنترل نموده و سرعت و پیچیدگی محاسباتی را به میزان بسیار زیادی بهبود داد. برای محاسبه میزان استحکام هر پیکسل در روش FLSM از دو معیار پایداری و تمایز به ترتیب زیر استفاده می‌شود:

- **معیار پایداری**: این ویژگی، میزان پایداری هر پیکسل را نسبت به تغییرات هندسی و رادیومتریکی تصویر نظیر تغییرات مقیاس، دوران و روشنایی بیان می‌کند. روش‌های متداول برای این منظور از اطلاعات گرادیان‌های مرتبه اول و دوم تصویر در فضای مکان استفاده می‌کنند که پایداری آن‌ها در برابر تغییرات روشنایی نسبتاً محدود است [۲۸]. در مقابل روش‌های مبتنی بر تبدیل فوریه در فضای فرکانس قابل استفاده هستند. یک تصویر با استفاده از تبدیل فوریه به‌صورت دو مؤلفه دامنه و فاز قابل توصیف است. اطلاعات فاز تبدیل فوریه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

پایداری بالایی در برابر تغییرات روشنایی، مقیاس، دوران و دیگر تغییرات هندسی دارد [۲۹]. بر این اساس در این تحقیق از معیار مبتنی بر تناسب فاز [۲۹ و ۳۰] به‌منظور توصیف میزان پایداری پیکسل‌ها در پنجره تناظریابی استفاده می‌شود. معیار تناسب فاز بر این فرض است که ساختارهای نقطه‌ای و خطی پایدار، در مناطقی از تصویر واقع هستند که فاز مؤلفه‌های تبدیل فوریه، ماکزیمم است. در این روش اطلاعات فضای فرکانس در تصویر با استفاده از فیلترهای گابور در مقیاس‌ها و جهت‌های مختلف به‌دست می‌آید. بر این اساس مقدار تناسب فاز، $P(x,y)$، در هر نقطه از تصویر به ترتیب زیر برآورد می‌شود

رابطه (۹)

$$P(x,y)=\frac{\sum_{n} W(x,y)\lfloor A_n(x,y)\Delta\Phi(x,y)-T\rfloor}{\sum_{n} A_n(x,y)+\varepsilon}$$

که در آن

رابطه (۱۰)

$$\Delta\Phi(x,y)=\cos(\varphi_n(x,y)-\bar{\varphi}(x,y))-\left|\sin(\varphi_n(x,y)-\bar{\varphi}(x,y))\right|$$

در رابطه (۹ و ۱۰)، (x,y) بیانگر موقعیت یک نقطه در تصویر، $W(x,y)$ فاکتور وزن بر اساس بسط فرکانس، $A_n(x,y)$ و $\varphi_n(x,y)$ به ترتیب دامنه و فاز تابع تبدیل موجک در مقیاس nام، $\bar{\varphi}(x,y)$ فاز میانگین، T آستانه نویز و ε نیز یک ثابت بسیار کوچک است. عملگر $\lfloor\ \rfloor$ نیز به این صورت عمل می‌کند که عبارت داخل آن اگر مثبت باشد برابر خودش و اگر منفی باشد برابر صفر می‌شود. در ادامه معیار استخراج گشتاور مینیمم[1]، M، با استفاده از مؤلفه‌های اصلی تناسب فاز به ترتیب زیر برآورد می‌شود

رابطه (۱۱)

$$M=0.5(c+a-\sqrt{b^2+(a-c)^2})$$

که در آن

رابطه (۱۲)

$$a=\sum_{\theta}(P_\theta(x,y)\cos(\theta))^2$$

$$b=2\sum_{\theta}(P_\theta(x,y)\cos(\theta))\cdot(P_\theta(x,y)\sin(\theta))$$

$$c=\sum_{\theta}(P_\theta(x,y)\sin(\theta))^2$$

مقدار $P_\theta(x,y)$ در رابطه (۱۲) بیانگر تناسب فاز در جهت θ است. در معیار M هم ساختارهای نقطه‌ای و هم ساختارهای خطی متمایز و پایدار تصویر قابل شناسایی هستند. مدل تناسب فاز پایداری بسیار بالایی در برابر تغییرات روشنایی و کنتراست تصاویر داشته و برای تناظریابی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنجنده‌های مختلف، پیشنهاد شده است [۲۸، ۳۱ و ۳۲].

- **معیار تمایز**: این ویژگی میزان تفکیک‌پذیری پیکسل‌ها را در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. محتوای اطلاعاتی معیاری از میزان تمایز است [۳۳]. به‌منظور توصیف کمی تمایز از معیار آنتروپی درون یک ناحیه در اطراف هر پیکسل به‌ترتیب زیر استفاده می‌شود:

رابطه (۱۳)

$$H=-\sum_{i} P_i\log_2 P_i$$

که در آن P_i احتمال وقوع پیکسل i ام درون ناحیه موردنظر است. در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، برای محاسبه تمایز از یک ناحیه دایره‌ای به شعاع سه پیکسل استفاده می‌شود.

بعد از محاسبه معیارهای پایداری و تمایز، میزان استحکام با استفاده از حاصل‌ضرب دو معیار به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۱۴)

$$R=H\cdot M$$

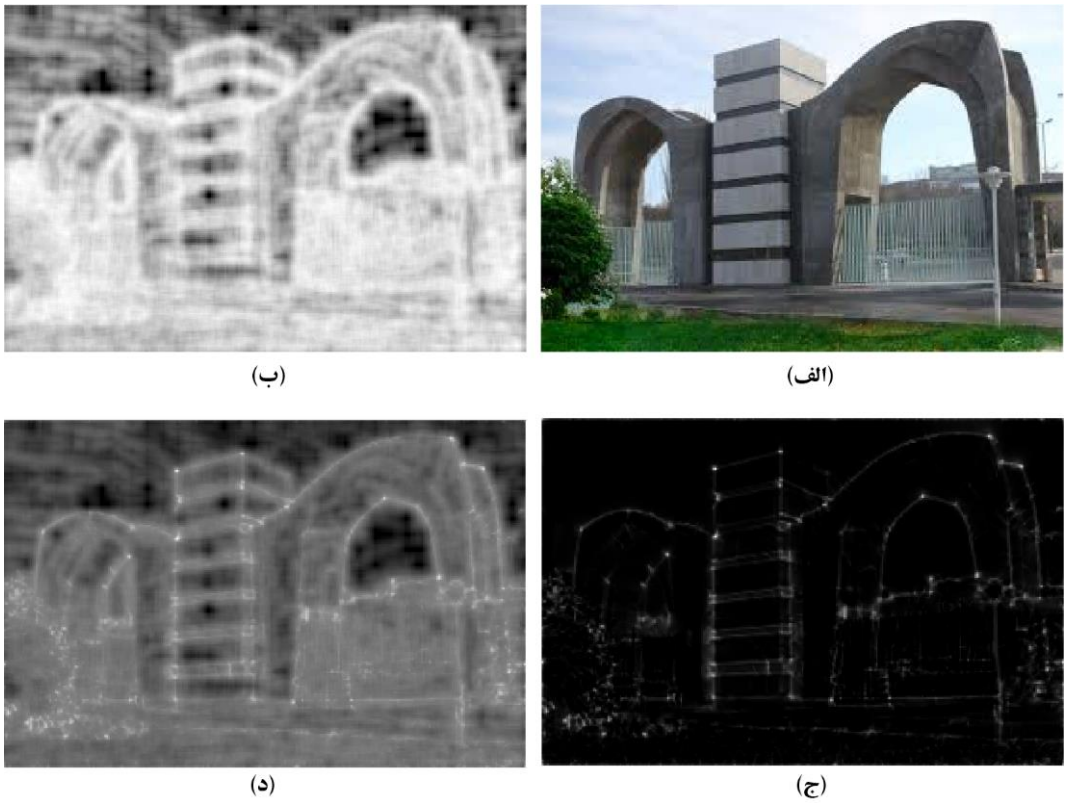
که در آن M بیانگر معیار پایداری حاصل از تناسب فاز و H نیز معیار تمایز حاصل از معیار آنتروپی است. قابل ذکر است که قبل از محاسبه معیار استحکام R، هر یک از معیارهای M و H به‌صورت جداگانه نرمالیزه

[1] Minimum Moments

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

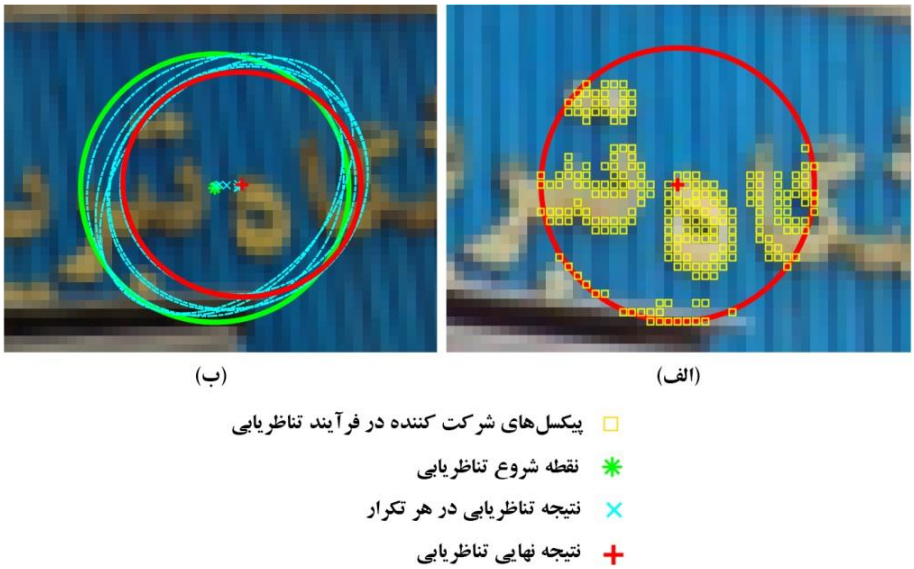
شده و مقدار آن‌ها بین صفر و یک آورده می‌شود. در شکل (۲) یک مثال از محاسبه معیار پایداری، تمایز و استحکام برای یک تصویر نمونه نشان داده شده است.



شکل ۲۰: یک مثال از محاسبه معیارهای پایداری، تمایز و استحکام ، (الف) تصویر ورودی، (ب) معیار تمایز مبتنی بر آنتروپی، (ج) معیار پایداری مبتنی بر تناسب فاز، (د) معیار استحکام

پس از محاسبه معیار استحکام، پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی بر اساس میزان استحکام رتبه‌بندی شده و تعداد S درصد از آن‌ها به‌عنوان پیکسل‌های با استحکام بالا برای شرکت در معادلات مشاهدات سرشکنی کمترین مربعات انتخاب می‌شوند. S بیانگر نرخ انتخاب بوده و در بخش بعدی ارزیابی کاملی از تأثیر مقادیر مختلف آن در عملکرد روش پیشنهادی بیان خواهد شد. قابل ذکر است که در روش تناظریابی پیشنهادی به‌منظور پایداری بهتر در برابر تغییرات هندسی، شکل پنجره به‌صورت دایره‌ای در نظر گرفته شده و پیکسل‌ها با بالاترین استحکام در آن انتخاب می‌شود. در شکل (۳) یک مثال از فرآیند تناظریابی FLSM نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌جای تمام پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی، تنها پیکسل‌ها با بالاترین استحکام در فرآیند تناظریابی شرکت داشته که این موضوع کارایی فرآیند تناظریابی را به میزان بسیار زیادی بهبود می‌دهد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]



شکل ۲۱: یک مثال از روش تناظریابی FLSM ، (الف) پنجره الگو در تصویر اول و پیکسل‌های با استحکام بالای انتخاب شده در آن (نرخ انتخاب، S، برابر ۳۰٪ است)، (ب) نتیجه تناظریابی FLSM در تکرارهای مختلف تا رسیدن به همگرایی

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش تصاویر، معیارهای ارزیابی و همچنین نتایج پیاده‌سازی روش تناظریابی پیشنهادی، FLSM، بیان شده و با روش تناظریابی کمترین مربعات استاندارد، LSM، مقایسه می‌شود.

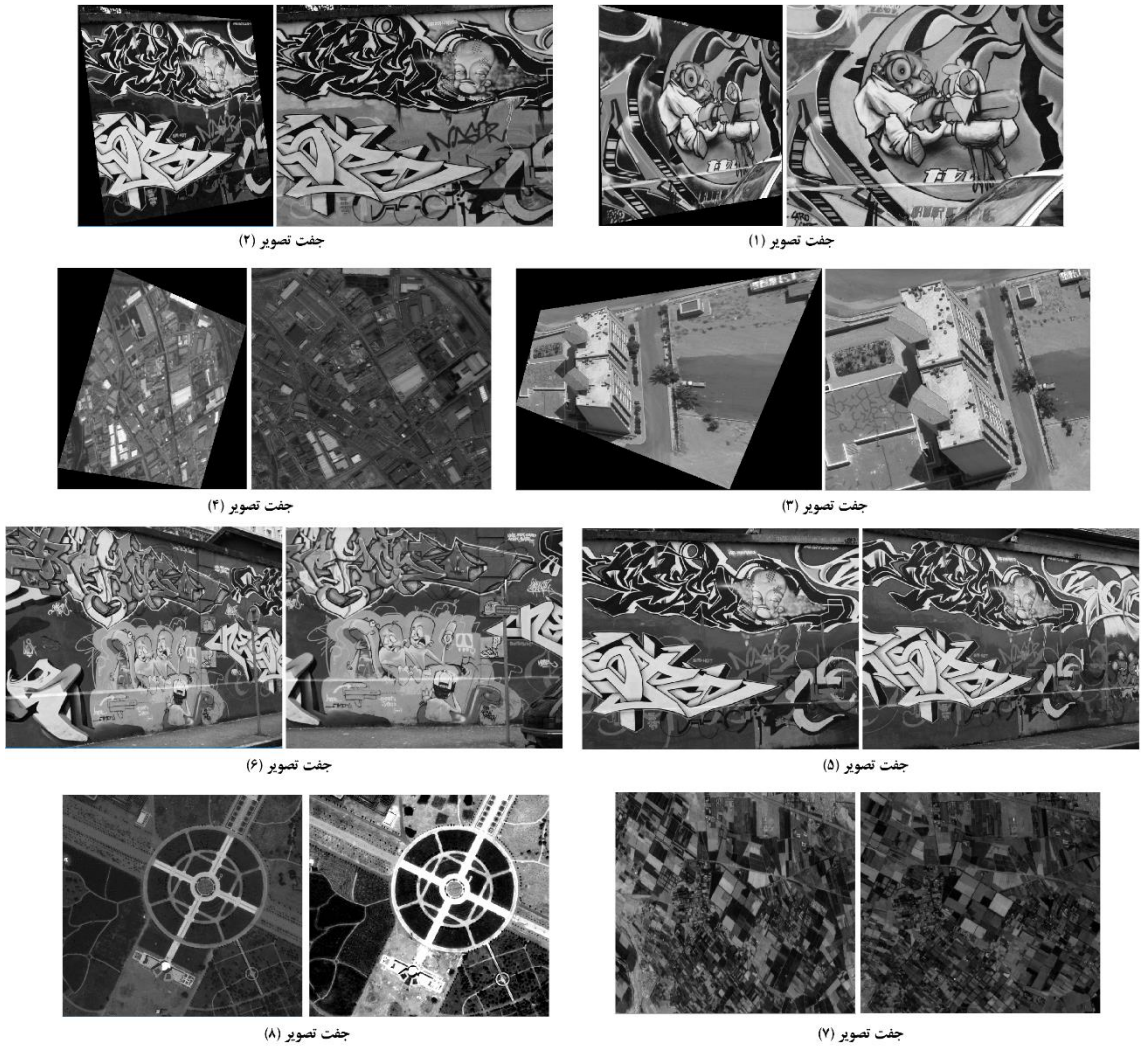
۴-۱- تصاویر و معیارهای ارزیابی

فرآیند ارزیابی بر روی دو دسته از تصاویر شبیه‌سازی شده و واقعی صورت می‌گیرد. در تصاویر شبیه‌سازی شده دو باند طیفی مختلف از یک تصویر چند طیفی انتخاب شده و یکی از آن‌ها با استفاده از یک تبدیل پروژکتیو معلوم برای ایجاد تغییر هندسی ناشی از تغییر موقعیت اخذ تصویر، نمونه‌برداری مجدد می‌شود.

بنابراین علاوه بر تغییرات هندسی، با توجه به‌اینکه تصاویر مربوط به دو باند متفاوت بوده و شدت درجات خاکستری متفاوتی دارند لذا عملکرد روش پیشنهادی در برابر اختلافات رادیومتریکی نیز قابل بررسی خواهد بود. علاوه بر تصاویر شبیه‌سازی شده، تصاویر واقعی اخذ شده از دو موقعیت متفاوت نیز در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مجموع برای ارزیابی روش پیشنهادی از تعداد چهار جفت تصویر شبیه‌سازی شده و چهار جفت تصویر واقعی مطابق با شکل (۴) استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات تصاویر مورد استفاده نشان داده شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]



شکل ۲۲: تصاویر مورد استفاده برای ارزیابی روش پیشنهادی، تصاویر ۱ تا ۴ تصاویر شبیه‌سازی شده و تصاویر ۵ تا ۸ تصاویر واقعی هستند.

جدول ۷: مشخصات تصاویر مورد استفاده

دسته	شماره	جفت تصویر		ابعاد (پیکسل)		نوع تصویر	منطقه
تصاویر شبیه‌سازی شده	۱	Graffiti1	Graffiti1	۶۴۰×۸۰۰	۷۱۸×۵۹۶	بردکوتاه	-
	۲	Graffiti2	Graffiti2	۶۴۰×۸۰۰	۷۰۱×۶۱۸	بردکوتاه	-
	۳	UltraCam	UltraCam	۷۵۱×۹۰۰	۲۰۴۰×۲۸۲۰	هوایی	ایران-تهران
	۴	SPOT5	SPOT5	۶۰۰×۶۵۰	۶۸۰×۵۸۱	ماهواره‌ای	بارسلونا-اسپانیا
تصاویر واقعی	۵	Graffiti3	Graffiti3	۶۴۰×۸۰۰	۶۴۰×۸۰۰	بردکوتاه	-
	۶	Graffiti4	Graffiti4	۶۴۰×۸۰۰	۶۴۰×۸۰۰	بردکوتاه	-
	۷	SPOT4	SPOT4	۶۰۰×۶۵۰	۶۰۰×۶۵۰	ماهواره‌ای	ایران-تهران
	۸	QuickBird	GeoEye	۶۰۰×۶۵۰	۷۳۶×۷۹۷	ماهواره‌ای	ایران-تهران

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

به‌منظور ارزیابی عملکرد فرآیند تناظریابی از سه معیار درصد موفقیت[1]، دقت مکانی و زمان محاسباتی به‌ترتیب زیر استفاده می‌شود:

- **درصد موفقیت**: این معیار به‌عنوان نسبت تعداد نقاطی که فرآیند تناظریابی در آن‌ها به‌صورت موفقیت‌آمیز بوده، به تعداد کل نقاط تعریف می‌شود. برای تعیین تناظرهای موفق نیز از یک حد آستانه مکانی (یک پیکسل) استفاده می‌شود. در واقع جفت نقاطی که فرآیند سرشکنی کمترین مربعات در آن‌ها همگرا شده و اختلاف موقعیت همگرایی از موقعیت واقعی (خطای تناظریابی) کمتر از یک پیکسل است به‌عنوان نقاط موفق در نظر گرفته می‌شوند. شایان ذکر است که موقعیت واقعی نقاط نظیر با استفاده از تابع تبدیل معلوم میان تصاویر تعیین‌می‌شود که در ادامه بیان خواهد شد.
- **دقت مکانی**: میزان ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE[2]) مکانی عوارض موفق به‌عنوان دقت مکانی در نظر گرفته می‌شود.
- **زمان محاسبات**: به‌منظور ارزیابی سرعت و کارایی روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم استاندارد LSM از معیار زمان انجام محاسبات تناظریابی استفاده شده است. لازم به ذکر است که پیاده‌سازی فرآیند تناظریابی روش پیشنهادی و روش استاندارد LSM به‌طور مشابه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB 2016b و با استفاده از یک کامپیوتر با سرعت پردازشی ۲٫۵۴ گیگاهرتز و حافظه هشت گیگابایت انجام شده است.

به‌منظور ارزیابی کیفیت و محاسبه خطای فرآیند تناظریابی لازم است تا ارتباط هندسی میان دو تصویر معلوم باشد. در تصاویر شبیه‌سازی شده ارتباط هندسی میان دو تصویر کاملاً معلوم است، چراکه تصاویر با استفاده از یک تابع پروژکتیو معلوم ایجاد شده‌اند. لذا برای این تصاویر از این مدل هندسی معلوم جهت برآورد خطای تناظریابی استفاده می‌شود. در تصاویر واقعی برای برقراری ارتباط هندسی دقیق میان دو تصویر در ابتدا یک مجموعه متراکم از نقاط متناظر با استفاده از روش صداقت و همکاران [۳۴] استخراج می‌شود. در این روش نقاط متناظر به‌صورت ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های هریس[3] [۳۵]، SIFT یکنواخت و مستحکم (UR-SIFT[4]) [۳۶]، نواحی اکسترمال با حداکثر پایداری (MSER[5]) [۳۷] و روش خوشه‌بندی k میانگین (k-Means) استخراج می‌شود. در نهایت برای اطمینان از دقت نقاط متناظر، کیفیت مطابقت آن‌ها از طریق بررسی بصری کنترل شده و نقاطی که دقت بالایی ندارند حذف می‌شوند. بعد از استخراج نقاط متناظر در دو تصویر به‌منظور مدل‌سازی اعوجاجات هندسی محلی از یک تبدیل مولتی‌کوادریک[6] برای برقراری ارتباط بین دو تصویر استفاده می‌شود. مدل تبدیل مولتی‌کوادریک یک مدل تبدیل انطباقی مبتنی بر توابع پایه شعاعی[7] است [۳۸] که شکل کلی آن به‌صورت مجموع یک چندجمله‌ای از درجه پایین و یک ترکیب خطی از یک تابع پایه شعاعی مبتنی بر فاصله است. در نهایت برای محاسبه خطای تناظریابی روش پیشنهادی، موقعیت حاصل از تناظریابی کمترین مربعات با موقعیت حاصل از تابع تبدیل برآورد شده میان دو تصویر مقایسه می‌شود.

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد شکل پنجره تناظریابی در این تحقیق به‌منظور پایداری بیشتر در برابر تغییرات هندسی به‌صورت دایره‌ای در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این به‌منظور بررسی تأثیر ابعاد پنجره تناظریابی

[1] Success Rate
[2] Root Mean Square Error

[3] Harris
[4] Uniform Robust Scale-Invariant Feature Transform
[5] maximally stable extremal regions
[6] Multiquadric
[7] Radial basis functions

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

بر روی نتایج از دو پنجره با شعاع متفاوت به میزان ۹ و ۱۵ پیکسل استفاده می‌شود. در پیاده‌سازی روش FLSM، مدل تبدیل افاین به‌عنوان مدل هندسی و مدل خطی دو پارامتری به‌عنوان مدل رادیومتریکی استفاده می‌شود. به‌علاوه دو شرط توقف هنگام انجام محاسبات کمترین مربعات لحاظ می‌شود: اول اینکه میزان تغییر مختصات بعد از هر تکرار کمتر از ۰٫۰۱ پیکسل شود و دوم اینکه حداکثر تعداد تکرارها برابر ۲۰ تکرار شود. لازم به ذکر است که موقعیت نقاط در فرآیند تناظریابی با استفاده از عوارض نقطه‌ای حاصل از الگوریتم هسین[1] [۳۹] در تصاویر اول در نظر گرفته شده و موقعیت تقریبی در تصویر دوم با در نظر گرفتن یک آفست مکانی به میزان سه پیکسل انتخاب می‌شود. تعداد عوارض اولیه هسین نیز در هر جفت تصویر برابر ۵۰۰ نقطه انتخاب شده است.

به‌منظور ارزیابی اثر پارامتر نرخ انتخاب در روش پیشنهادی، نتایج تناظریابی برای نرخ‌های انتخاب مختلف در ۱۰ حالت (از ۱۰ درصد تا ۱۰۰ درصد) انجام شده است. واضح است که هنگامی‌که نرخ انتخاب برابر ۱۰۰ درصد باشد، الگوریتم پیشنهادی، FLSM، همان الگوریتم استاندارد کمترین مربعات، LSM، خواهد بود. علاوه بر این به‌منظور ارزیابی اثر فرآیند وزن‌دهی، عملیات تناظریابی یک‌بار نیز بدون وزن‌دهی تکرار شده است.

۴-۲- نتایج و بحث

نتایج مربوط به تناظریابی روش پیشنهادی برای هشت جفت تصویر مورد ارزیابی و برای معیارهای درصد موفقیت و دقت مکانی (RMSE) به‌ترتیب در شکل (۵ و ۶) نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد نتایج برای چهار حالت مختلف شامل (۱) الگوریتم پیشنهادی با شعاع ۹ پیکسل و بدون وزن‌دهی، (۲) الگوریتم پیشنهادی با شعاع ۹ پیکسل و با وزن‌دهی، (۳) الگوریتم پیشنهادی با شعاع ۱۵ پیکسل و بدون وزن‌دهی، و (۴) الگوریتم پیشنهادی با شعاع ۱۵ پیکسل و با وزن‌دهی ارائه شده است. در شکل (۷) میانگین زمان انجام محاسبات تناظریابی روش پیشنهادی در تمامی تصاویر مورد ارزیابی و برای نرخ‌های انتخاب مختلف نشان داده شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۵، ۶ و ۷) موارد زیر قابل بیان است:

- در بیشتر جفت تصاویر مورد ارزیابی میزان درصد موفقیت و دقت مکانی تناظریابی روش پیشنهادی برای نرخ انتخاب ۳۰ تا ۴۰ درصد بسیار نزدیک به نرخ انتخاب ۱۰۰ درصد است. یادآوری می‌شود که نرخ انتخاب ۱۰۰ درصد همان روش کمترین مربعات استاندارد است. لذا با استفاده از تنها حدود یک سوم از پیکسل‌ها با بالاترین استحکام، نتایجی مشابه با روش کمترین مربعات استاندارد حاصل شده است. واضح است که استفاده از حدود یک سوم از پیکسل‌ها در فرآیند سرشکنی تناظریابی کمترین مربعات باعث بهبود قابل‌توجه سرعت و کارایی تناظریابی می‌شود به‌طوری‌که مطابق با شکل (۷) متوسط زمان انجام تناظریابی برای روش پیشنهادی FLSM در نرخ انتخاب ۴۰ درصد در حدود ۳ ثانیه و برای روش LSM استاندارد در حدود ۱۰ ثانیه است. شایان ذکر است که در بعضی از تصاویر نظیر جفت تصاویر اول، دوم و ششم، نتایج تناظریابی برای نرخ انتخاب ۴۰ درصد، حتی بهتر از نرخ انتخاب ۱۰۰ درصد است. دلیل این موضوع را می‌توان به‌دلیل یکنواختی تصویر و وجود تعداد زیادی از پیکسل‌ها با درجات خاکستری مشابه در پنجره تناظریابی دانست که با حذف آن‌ها در فرآیند تناظریابی، درصد موفقیت و دقت مکانی تناظریابی بهبود می‌یابد.
- بر اساس نتایج حاصله ارتباط مستقیمی میان ابعاد پنجره تناظریابی و بهبود کیفیت فرآیند تناظریابی مشاهده نشد. به‌عنوان مثال در جفت تصاویر سوم و پنجم پنجره با شعاع ۹ پیکسل نتایج بسیار بهتری در

[1] Hessian

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

مقایسه با پنجره تناظریابی با شعاع ۱۵ پیکسل حاصل کرده است. به‌طور معکوس در جفت تصاویر هفتم و هشتم پنجره با شعاع ۱۵ پیکسل نتایج بسیار بهتری را در مقایسه با پنجره دیگر حاصل کرده است. در تصاویر دیگر نیز میزان نتایج تناظریابی در حدود یکدیگر است. بنابراین ابعاد مناسب پنجره تناظریابی وابسته به محتوای تصاویر است. البته ذکر این نکته ضروری است که در صورتی که ابعاد پنجره تناظریابی کم باشد، نباید از نرخ‌های انتخاب پایین نظیر ۲۰ یا ۳۰ درصد استفاده کرد، زیرا در این صورت تعداد مشاهدات فرآیند سرشکنی بسیار کم شده و میزان موفقیت فرآیند تناظریابی به‌شدت کاهش خواهد یافت.

- استفاده از وزن‌دهی در روش پیشنهادی در بیشتر تصاویر مورد ارزیابی نتایج بسیار بهتری را در مقایسه با حالت بدون وزن حاصل کرده است. هر چند که در بعضی از جفت تصاویر مورد ارزیابی نظیر جفت تصاویر پنجم و هشتم، نتایج در دو حالت وزن‌دهی شده و بدون وزن‌دهی در حدود یکدیگر است.
- نرخ انتخاب فاکتور مهمی در روش پیشنهادی است. مقادیر کوچک‌تر از ۲۰ درصد نتایج مناسبی را ارائه نمی‌دهد. در مقابل افزایش نرخ انتخاب نیز لزوماً باعث بهبود نتایج نمی‌شود. علاوه بر این نرخ انتخاب تابعی از ابعاد پنجره تناظریابی است. به طور کلی برای پنجره‌هایی تناظریابی با شعاع ۹ و ۱۵ پیکسل، نرخ انتخاب ۳۰ تا ۴۰ درصد انتخاب مناسبی است.
- دقت مکانی تناظریابی روش پیشنهادی در جفت تصاویر مورد ارزیابی در حدود ۰٫۲ تا ۰٫۵ پیکسل است که دقت بسیار بالایی را نشان می‌دهد.

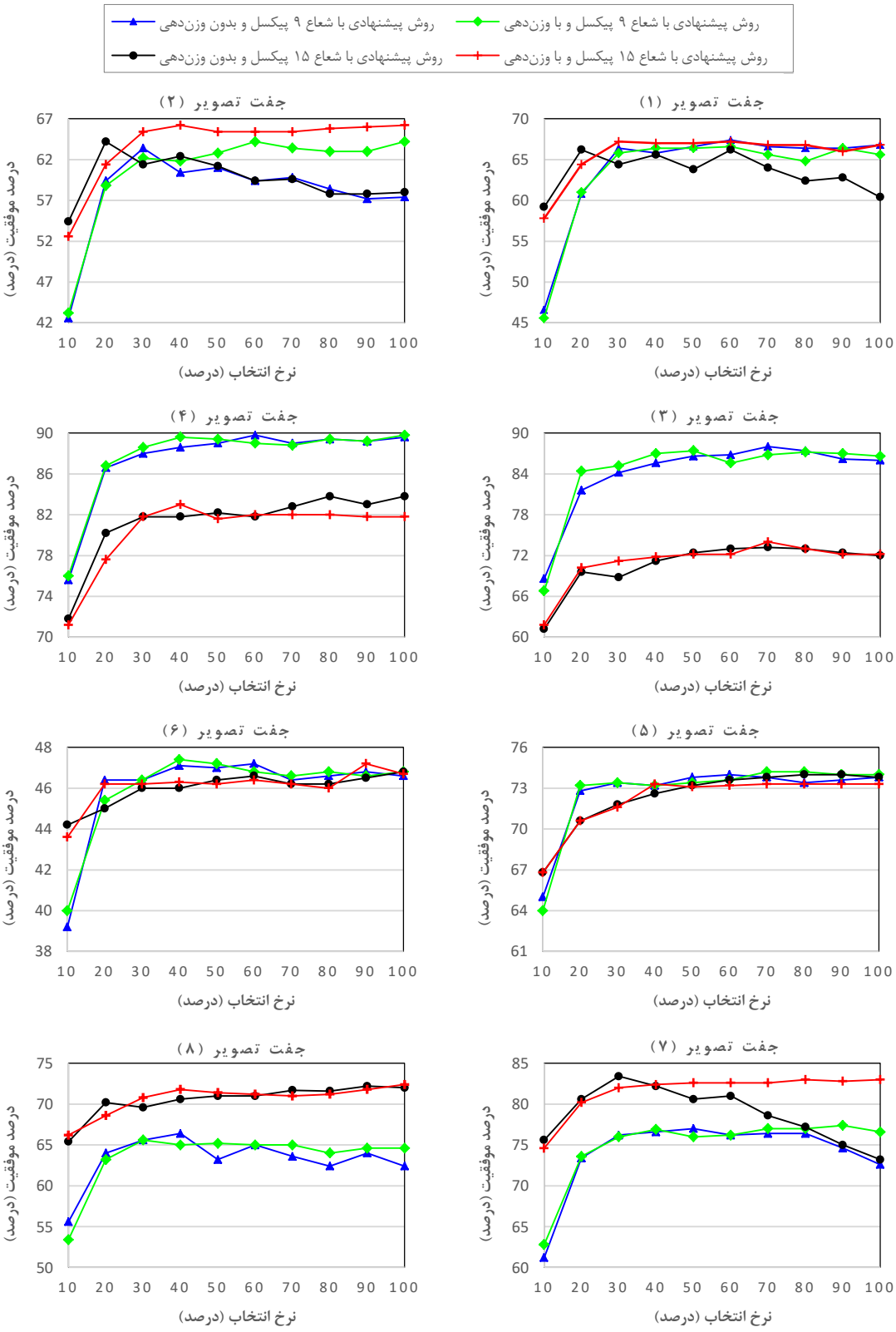
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق یک روش کارآمد برای بهبود الگوریتم تناظریابی کمترین مربعات با عنوان FLSM ارائه شد. روش پیشنهادی به‌منظور بهبود کارایی الگوریتم تناظریابی کمترین مربعات بر مبنای یک معیار ویژه با نام استحکام طراحی شده است. برای این منظور پیکسل‌های موجود در پنجره تناظریابی بر اساس میزان استحکام رتبه‌بندی شده و تنها پیکسل‌های با استحکام بالا در فرآیند سرشکنی کمترین مربعات شرکت داده می‌شوند. معیار استحکام این تحقیق بر مبنای پارامتر پایداری و تمایز پیکسل‌ها محاسبه شده و برای این منظور از معیار تناسب فاز مؤلفه‌های تبدیل فوریه و آنتروپی استفاده شده است. علاوه بر گزینش پیکسل‌ها در روش پیشنهادی، میزان استحکام پیکسل‌ها نیز به‌عنوان پارامتر وزن در فرآیند سرشکنی استفاده می‌شود.

روش پیشنهادی بر روی هشت جفت تصویر مختلف در دو دسته شبیه‌سازی شده و واقعی پیاده‌سازی شده و نتایج بیانگر قابلیت و کارایی بالای روش پیشنهادی در تناظریابی دقیق است. در روش پیشنهادی تنها با استفاده از حدود یک سوم از پیکسل‌های واقع در پنجره تناظریابی، درصد موفقیت و دقتی در حدود روش کمترین مربعات استاندارد و با سرعت محاسباتی حدود سه برابر بیشتر حاصل شده است. روش وزن‌دهی مورد استفاده در الگوریتم پیشنهادی نیز بیانگر بهبود دقت و درصد موفقیت فرآیند تناظریابی در بیشتر تصاویر مورد ارزیابی (در حدود یک تا سه درصد) است. به‌طور کلی دقت مکانی روش پیشنهادی در تصاویر مختلف در حدود ۰٫۲ تا ۰٫۵ پیکسل حاصل شده است. استفاده از روش پیشنهادی در کاربردهای اساسی نظیر مثلث‌بندی هوایی، تناظریابی متراکم برای تولید مدل رقومی زمین و هم‌مرجع‌سازی دقیق تصاویر به‌عنوان تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود. علاوه بر این استفاده از یک نرخ انتخاب انطباقی که متناسب با ابعاد و محتوای پنجره تناظریابی مقدار مناسب را تعیین نماید و همچنین طراحی و توسعه معیارهای استحکام دیگر به‌عنوان موضوعات تحقیقاتی بعدی پیشنهاد می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

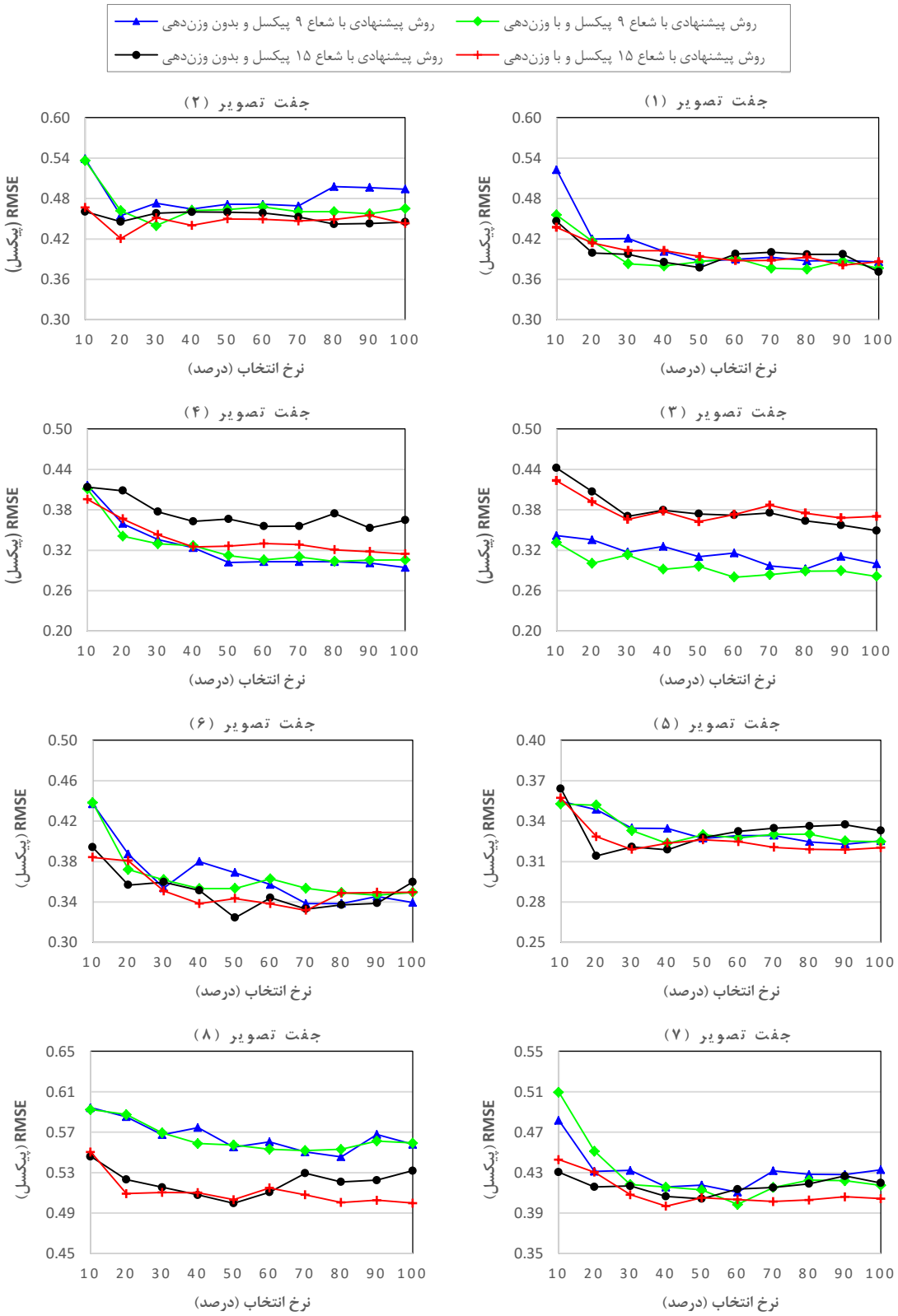
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]



شکل ۲۳: نتایج تناظریابی روش پیشنهادی برای معیار درصد موفقیت در تمامی هشت جفت تصویر مورد ارزیابی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

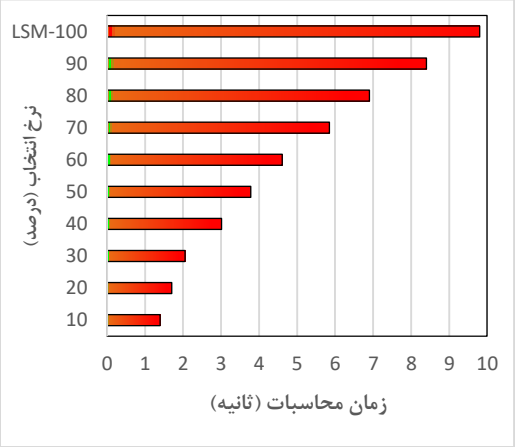
[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]



شکل ۲۴: نتایج تناظریابی روش پیشنهادی برای معیار دقت مکانی (RMSE) در تمامی هشت جفت تصویر مورد ارزیابی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]



شکل ۲۵: زمان انجام محاسبات تناظریابی روش پیشنهادی

مراجع

[1] N. Tatar, M. Saadat Seresht, and H. Arefi, "Epipolar Resampling of High Resolution Satellite Stereo Images without Rational Polynomial Coefficients for Semi Global Matching," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 6, pp. 263-274, 2016.

[2] A. Fallah and M. SaadatSeresht, "A New Method for Absolute Orientation of Video Frames in Urban Scenes 3D Reconstruction Process," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 4, pp. 11-24, 2015.

[3] A. Nourmohammad and M. Saadatseresht, "Provide an Automatic Method to Compute Approximate Exterior Orientation Parameters and Tie-Points Coordinate of Ultra-Light UAV Images in Order to Accurate Photogrammetry Block Formation," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 4, pp. 239-252, 2015.

[4] S .M. Hasheminasab, H. Ebadi, A. A. Hoseininave, and A. Sedaghat, "An Improvement in SIFT Algorithm for Wide-Baseline Image Matching," Journal of Geospatial Information Technology, vol. 3, no. 3, pp. 53-74, 2015.

[5] M. Moradi and M. Sahebi, "Feature-Based Change Detection of Urban Areas using Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 7, pp. 203-222, 2017.

[6] A. Moghimi, S. Khazai, and H. Ebadi, "Unsupervised Change Detection in Multitempolar SAR Images Based on Integration of Clustering and Active Contour Model," Journal of Geospatial Information Technology, vol. 5 pp. 21-37, 2016.

[7] S. Khazaei and V. Mosavi, "Detecting and Tracking Moving Objects in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Images," Journal of Geomatics Science and Technology, vol. 7, pp. 175-184, 2017.

[8] F. Remondino, S. El-Hakim, A. Gruen, and L. Zhang, "Turning Images into 3-D Models," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 25, pp. 55-65, 2008.

[9] A. Sedaghat and H. Ebadi, "Remote Sensing Image Matching Based on Adaptive Binning SIFT Descriptor," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, pp. 5283-5293, 2015.

[10] T. Tuytelaars and K. Mikolajczyk, "Local Invariant Feature Detectors: A Survey," Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, vol. 3, pp. 177-280,

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

2008.

[11] S .Wu, A. Oerlemans, E. M. Bakker, and M. S. Lew, "A Comprehensive Evaluation of Local Detectors and Descriptors," Signal Processing: Image Communication, vol. 59, no., pp. 150-167, 2017.

[12] M. H. Lee and I. K. Park, "Performance Evaluation of Local Descriptors for Maximally Stable Extremal Regions," Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 47, no. 1, pp. 62-72, 2017.

[13] M. Gesto-Diaz, F. Tombari, D. Gonzalez-Aguilera, L. Lopez-Fernandez, and P. Rodriguez-Gonzalvez, "Feature matching evaluation for multimodal correspondence," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 129, pp. 179-188, 2017.

[14] A. Sedaghat and N. Mohammadi, "Uniform Competency-Based Local Feature Extraction for Remote Sensing Images," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 135, pp. 142-157, 2018.

[15] A. A. Goshtasby, 2-D and 3-D Image Registration: for Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications: John Wiley & Sons, 2005.

[16] A. Sedaghat and A. Alizadeh Naeini, "DEM Orientation Based on Local Feature Correspondence with Global DEMs," GIScience & Remote Sensing, vol. 55, no. 1, pp. 110-129, 2017.

[17] W. Förstner, "On the Geometric Precision of Digital Correlation," Int. Arch. Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 24, pp. 176-189, 1982.

[18] A. Gruen, "Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique," South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, vol. 14, pp. 175-187, 1985.

[19] F. Ackermann, "High Precision Digital Image Correlation," in Proceedings 39th Photogrammetric Week, Stuttgart, 1983, pp. 231-243.

[20] U. Helava, "Object-space Least-Squares Correlation," in (ACSM and American Society for Photogrammety and Remote Sensing, Annual Convention, Saint Louis, MO, Mar. 14-18, 1988) Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, pp. 711-714.

[21] A. Gruen and E. P. Baltsavias, "Geometrically Constrained Multiphoto Matching," Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 54, pp. 633-641, 1988.

[22] X. Lin, J. Zhang, Z. Liu, J. Shen, and M. Duan, "Semi-automatic Extraction of Road Networks by Least Squares Interlaced Template Matching in Urban Areas," International Journal of Remote Sensing, vol. 32, pp. 4943-4959, 2011.

[23] M. Debella-Gilo and A. Kääb, "Measurement of Surface Displacement and Deformation of Mass Movements Using Least Squares Matching of Repeat High Resolution Satellite and Aerial Images," Remote Sensing, vol. 4, pp. 43-67, 2012.

[24] F. Bethmann and T. Luhmann, "Least-squares Matching with Advanced Geometric Transformation Models," Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, vol. 2011, pp. 57-69, 2011.

[25] H. Hu, Y. Ding, Q. Zhu, B. Wu, L. Xie, and M. Chen, "Stable Least-squares Matching for Oblique Images Using Bound Constrained Optimization and a Robust Loss Function," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 118, pp. 53-67, 2016.

[26] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications: Whittles, 2006.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

[27] T. Schenk, "Digital photogrammetry," Volume I, Terra Science, 1999.

[28] A. Wong and D .A. Clausi, "ARRSI: Automatic Registration of Remote-Sensing Images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, pp. 1483-1493, 2007.

[29] P. Kovesi, "Phase Congruency Detects Corners and Edges," In The Australian Pattern Recognition Society Conference: DICTA, 2003.

[30] P. Kovesi, "Phase Preserving Tone Mapping of Non-Photographic High Dynamic Range Images," in DICTA, 2012, pp. 1-8.

[31] 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.

[32] J. Fan, Y. Wu, F. Wang, Q. Zhang, G. Liao, and M. Li, "SAR Image Registration Using Phase Congruency and Nonlinear Diffusion-Based SIFT ", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 12, pp. 562-566, 2015.

[33] C. Schmid, R. Mohr, and C. Bauckhage, "Evaluation of Interest Point Detectors," International Journal of computer vision, vol. 37, pp. 151-172, 2000.

[34] A. Sedaghat and H .Ebadi, "Very High Resolution Image Matching Based on Local Features and K-Means Clustering," The Photogrammetric Record, vol. 30, pp. 166-186, 2015.

[35] C. Harris and M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector," In Alvey Vision Conference, 1988,

[36] A. Sedaghat, M. Mokhtarzade, and H. Ebadi, "Uniform Robust Scale-Invariant Feature Matching for Optical Remote Sensing Images," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, pp. 4516-4527, 2011.

[37] 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.

[38] R. L. Hardy, "Multiquadric Equations of Topography and other Irregular Surfaces," Journal of Geophysical Research, vol. 76, pp. 1905-1915, 1971.

[39] P. R. Beaudet, "Rotationally Invariant Image Operators," in Proceedings of the International Joint Conference on Pattern Recognition, 1978, pp. 579-583

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7 No.1, Spring 2019

Research Paper

Fast Least Square Matching

AminSedaghat *[1], Nazila Mohammadi [1]

1- Assistant professor, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

Least square matching (LSM) is one of the most accurate image matching methods in photogrammetry and remote sensing. The main disadvantage of the LSM is its high computational complexity due to large size of observation equations. To address this problem, in this paper a novel method, called fast least square matching (FLSM) is being presented. The main idea of the proposed FLSM is decreasing the size of the observation equations to improve the efficiency of the matching process. For this purpose, the pixels in the matching window are ordered using a special robustness measure. Then, a specific percent of the pixels with the highest robustness is selected for matching process. The phase congruency and entropy measures are used to compute the proposed robustness measure. The proposed FLSM method was successfully applied to match various synthetic and real image pairs, and the results demonstrate its capability to increase matching efficiency. The matching results show that the proposed FLSM method is three times faster than standard LSM method.

Key words: *Image matching, Least square, Robustness, Efficiency.*

Correspondence Address. *Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.,*
Tel+98 41 33342533.
Email: *am.sedaghat@gmail.com*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.29252/jgit.7.1.193]