

ارزیابی مدل‌های تبدیل دو بعدی در هم مرجع سازی تصاویر استریو ماهواره‌ای

امین صداقت^{۱*}، نازیلا محمدی^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
{a.sedaghat, n.mohammadi}@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۷)

چکیده

هم مرجع سازی تصویر یک فرآیند اساسی در پردازش تصویر بوده و هدف از آن، تعیین دقیق‌ترین مطابقت میان دو یا چند تصویر از یک منظره‌ی یکسان است. مدل‌های تبدیل دو بعدی نقش اساسی در هم مرجع سازی تصاویر ایفا می‌کنند. در این تحقیق قابلیت انواع مختلف از مدل‌های تبدیل دو بعدی شامل ۹ تبدیل متشابه، پروژکتیو، چندجمله‌ای از درجات ۱ تا ۴، مدل تبدیل قطعه‌ای خطی، (MQ) Multiquadric و (PW) Pointwise در هم مرجع سازی تصاویر استریو ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور استخراج کارآمد نقاط گرهی در تصاویر، از یک روش ترکیبی بر مبنای عوارض نقطه‌ای FAST، توصیفگر SIFT (Scale Invariant Feature Transform) و روش تناظرابی کمترین مربعات استفاده شده‌است. به منظور ارزیابی اثر تعداد و توزیع مکانی نقاط گرهی، فرآیند ارزیابی در چهار حالت مختلف با تعداد و توزیع متفاوت از نقاط کنترل انجام شده‌است. برای ارزیابی از دو جفت تصویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس مربوط به سنجنده‌های ZY3 و IKONOS استفاده شده‌است. نتایج ارزیابی بیانگر این است که مدل‌های تبدیل سراسری نظیر پروژکتیو و چندجمله‌ای‌ها دقت مناسبی را برای هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای ارائه نمی‌دهند. در مقابل در صورتی که تعداد و توزیع نقاط کنترل مناسب باشد، مدل‌های تبدیل انطباقی نظیر MQ و PW دارای دقت مناسبی خواهند بود. به طور کلی بالاترین دقت مربوط به مدل تبدیل MQ است به طوری که مقدار RMSE نقاط چک با استفاده از این مدل برای جفت تصویر ZY3 و IKONOS به ترتیب برابر ۲ و ۱،۹ پیکسل است.

واژگان کلیدی: هم مرجع سازی تصویر، تبدیلات ۲ بعدی، عوارض FAST، توزیع نقاط کنترل

۱- مقدمه

هم مرجع سازی تصویر^۱، فرآیند همپوشانی هندسی دو یا چند تصویر از یک منظره‌ی یکسان است که در زمان‌های مختلف، از موقعیت‌های متفاوت و یا به وسیله‌ی سنسورهای مختلفی اخذ شده‌اند [۱]. این فرآیند یک مرحله اساسی از عملیات‌های مختلف در فتوگرامتری و سنجش از دور مانند آشکارسازی تغییرات، تلفیق تصاویر، مثلث‌بندی هوایی و به روزرسانی نقشه‌ها است.

به طور کلی فرآیند هم مرجع سازی تصویر شامل سه مرحله‌ی اصلی به ترتیب زیر است:

(۱) استخراج نقاط کنترل (نقاط گرهی): در این

مرحله یک مجموعه از موقعیت‌های متناظر در دو تصویر (مبدأ و هدف) تعیین می‌شوند که برای این منظور از انواع مختلف از روش‌های تناظریابی ناحیه‌مبنا یا عارضه‌مبنا استفاده می‌شود.

(۲) ایجاد تابع تبدیل: بر اساس مجموعه‌ی نقاط

کنترل استخراج شده، پارامترهای تابع تبدیل میان دو تصویر برآورد می‌شود. نوع تابع تبدیل مورد استفاده باید مطابق با نوع اختلافات هندسی میان تصاویر باشد.

(۳) نمونه‌برداری مجدد: تصویر مبدأ با استفاده از یک

روش درونیابی مناسب، در فضای تصویر هدف، نمونه‌برداری مجدد می‌شود. روش‌های متداول برای این منظور نزدیکترین همسایگی و Bilinear هستند. هم مرجع سازی دقیق تصاویر ماهواره‌ای با حد تفکیک بالا به دلیل انواع مختلف از اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی با مشکلات مختلفی روبرو است. یک موضوع بسیار مهم در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای از مناطق سه بعدی، مساله جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع است. به منظور هم مرجع سازی این تصاویر باید جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع از طریق ایجاد تصاویر اورتو^۲ حذف شود. در واقع به منظور هم مرجع سازی دقیق در این تصاویر در ابتدا باید جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در آنها را با استفاده از یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM^۳) دقیق برطرف کرده و سپس فرآیند هم مرجع سازی را انجام داد.

البته در بعضی مواقع مدل رقومی ارتفاعی دقیق از مناطق مورد بررسی در دسترس نیست. در این صورت دقت، تعداد و توزیع نقاط کنترل و همچنین نوع مدل تبدیل مورد استفاده در کیفیت فرآیند مورد استفاده بسیار تاثیر گذار خواهد بود.

امروزه بیشتر روش‌های تناظریابی مورد استفاده به منظور استخراج نقاط کنترل متناظر بر مبنای عوارض موضعی^۴ هستند [۲-۵]. عوارض موضعی از دو بخش استخراج موقعیت عوارض و ایجاد توصیفگر عوارض تشکیل می‌شوند. از جمله الگوریتم‌های مطرح به منظور استخراج موقعیت عوارض می‌توان به الگوریتم‌های Harris [۶]، FAST^۵ [۷]، SIFT^۶ [۸] و MSER^۷ [۹] اشاره کرد. توصیفگرهای SIFT، LSS^۸ [۱۰] و LIOP^۹ [۱۱] نیز چند نمونه از توصیفگرهای متداول و شاخص هستند.

روش‌های مختلفی به منظور استخراج نقاط کنترل متناظر با استفاده از تناظریابی عوارض موضعی ارائه شده‌است. به عنوان مثال Gong و همکاران [۱۲] با بهره‌گیری از الگوریتم SIFT و معیار مشابهت اطلاعات متقابل یک روش سلسله مراتبی را جهت هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سنسورهای مختلف ارائه کرده‌اند. Sun و همکاران [۱۳] الگوریتم L^۲-SIFT^{۱۰} را به منظور انجام تناظریابی در تصاویر هوایی بزرگ مقیاس با ابعاد بالا ارائه کرده‌اند. در این روش تصویر ورودی به منظور کاهش حافظه‌ی موردنیاز، به بلوک‌های منظم با ابعاد کوچکتر تقسیم‌بندی شده و فرآیند استخراج عوارض برای هر بلوک به صورت جداگانه انجام می‌شود. Han و همکاران [۱۴] با بهره‌گیری از یک روش بهینه‌سازی، الگوریتمی را برای تناظریابی دقیق و متراکم عوارض SIFT در تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس مربوط به سنسورهای مختلف ارائه کرده‌اند. به طور مشابه Joglekar و همکاران [۱۵] با بهره‌گیری از یک روش Relaxation الگوریتمی را جهت تناظریابی متراکم تصاویر ماهواره‌ای ارائه کرده‌اند.

بعد از استخراج نقاط کنترل متناظر، مساله بعدی نوع مدل تبدیل مورد استفاده برای انجام فرآیند هم مرجع

^۴ Local Features

^۵ Features from Accelerated Segment Test

^۶ Scale-Invariant Feature Transform

^۷ Maximally Stable Extremal Regions

^۸ Local Self-Similarity

^۹ Local Intensity Order Pattern

^{۱۰} Large images in Large-scale aerial photogrammetry-SIFT

^۱ Image Registration

^۲ Ortho Image

^۳ Digital Elevation Model

از تصاویر ماهواره‌ای با توجه به خصوصیات هندسی ویژه‌ی آنها با محدودیت‌هایی مواجه است. در صورتی که بتوان با استفاده از یک مدل تبدیل دوبعدی مناسب ارتباط هندسی میان تصاویر را با دقت بالایی برقرار نمود آنگاه نیاز به تولید تصاویر اپی‌پولار برطرف شده و می‌توان فضای جستجوی تناظریابی متراکم را به میزان بسیار زیادی کاهش داد.

در ادامه در بخش دوم مرور مختصری بر مدل‌های تبدیل دو بعدی مورد مقایسه در این تحقیق انجام خواهد شد. سپس در بخش سوم جزئیات روش پیشنهادی به منظور استخراج نقاط کنترل در تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس استریو بیان خواهد شد. در ادامه در بخش چهارم نتایج ارزیابی مدل‌های تبدیل دو بعدی بیان و بحث خواهد شد. در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان خواهد شد.

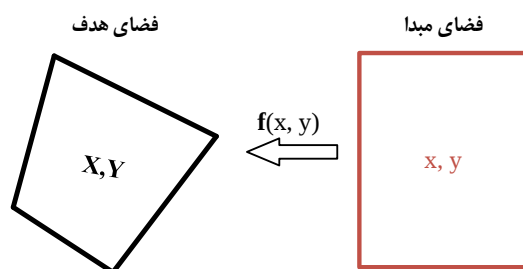
۲- مدل‌های تبدیل ۲ بعدی

در تبدیل‌های دو بعدی ارتباط هندسی میان دو فضای دو بعدی (دو صفحه) با یکدیگر برقرار می‌شود. فرض کنید تعداد N نقطه‌ی کنترل در دو فضای «مبدا» و «هدف» به ترتیب زیر در دسترس باشند:

$$\{(x_i, y_i); (X_i, Y_i): i = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

که در آن (x_i, y_i) مختصات نقطه‌ی کنترل نام در فضای مبدا و (X_i, Y_i) مختصات نقطه‌ی نظیر آن در فضای هدف است. در این صورت تبدیل دو بعدی $f(x, y)$ مطابق با شکل ۱، ارتباط هندسی میان دو فضا را با استفاده از دو مولفه‌ی f_x و f_y به ترتیب زیر برقرار می‌کند:

$$\begin{aligned} X &= f_x(x, y) \\ Y &= f_y(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۱- تبدیل‌های دو بعدی

سازی تصویر است. مدل تبدیل ارتباط هندسی میان دو فضا را برقرار کرده و تاثیر بسیار مهمی در دقت فرآیند هم مرجع سازی دارد. مدل‌های تبدیل مختلفی برای هم مرجع سازی تصویر ارائه شده‌اند که به طور کلی به دو دسته‌ی «تبدیل‌های سراسری»^۱ و «تبدیل‌های انطباقی»^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۶]. در دسته‌ی اول تعداد پارامترهای تابع تبدیل ثابت بوده و مستقل از تعداد نقاط کنترل است. از جمله تبدیل‌های متداول در این دسته می‌توان به تبدیل‌های متشابه، افاین، پروژکتیو و چند جمله‌ای‌ها اشاره کرد. در دسته‌ی دوم تعداد پارامترهای تابع تبدیل ثابت نبوده و وابسته به تعداد نقاط کنترل است. از جمله تبدیل‌های انطباقی مطرح می‌توان به تبدیل قطعه‌ای مبتنی بر مثلث‌بندی (PL)^۳، تبدیل (MQ) Multiquadric و (PW) Pointwise اشاره کرد.

هر یک از مدل‌های تبدیل ویژگی‌های مخصوص به خود را داشته و برای داده‌ها با شرایط و خصوصیات مختلفی مناسب هستند. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی قابلیت انواع مختلف از تبدیل‌های ۲ بعدی در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس استریو است. یک موضوع مهم در ارزیابی مدل‌های تبدیل وجود نقاط کنترل دقیق، با تعداد و توزیع مناسب است. در این تحقیق به منظور استخراج کارآمد یک مجموعه متراکم از نقاط کنترل دقیق و با توزیع مناسب در تصاویر استریو یک روش ترکیبی تناظریابی پیشنهاد شده‌است. روش پیشنهادی بر مبنای ترکیب الگوریتم‌های [۷] FAST، [۸] SIFT، کنترل سازگاری محلی بر مبنای خوشه‌بندی عوارض [۱۷] و روش تناظریابی کمترین مربعات [۱۸] است.

کاربرد اصلی روش پیشنهادی در این تحقیق برقراری ارتباط هندسی دقیق تصاویر استریو ماهواره‌ای به منظور انجام فرآیند تناظریابی متراکم برای تولید مدل ارتفاعی رقومی از آنها است. در واقع به منظور کاهش فضای جستجو و افزایش سرعت تناظریابی متراکم در فتوگرامتری معمولاً تصاویر به صورت نرمالیزه (اپی‌پولار) ایجاد می‌شوند که در آنها خطوط اپی‌پلار در راستای سطرهای تصویر قرار گرفته و فضای جستجوی تناظریابی از دو بعد به یک بعد کاهش می‌یابد. تولید تصاویر نرمالیزه

^۱ Global Transformation

^۲ Adaptive Transformation

^۳ Piecewise Linear

همانطور که پیشتر در بخش مقدمه بیان شد تبدیل‌های دو بعدی را بر اساس تعداد پارامترهای آنها می‌توان به دو دسته‌ی تبدیل‌های سراسری و تبدیل‌های انطباقی تقسیم‌بندی کرد [۱۶]. در دسته‌ی اول نظیر تبدیل‌های متشابه، افاین، پروژکتیو و چند جمله‌ای‌ها، یک تابع تبدیل مشخص با تعداد پارامترهای ثابت برای برقراری ارتباط هندسی میان دو فضا برآورد می‌شود. در دسته‌ی دوم نظیر تبدیل‌های PL، MQ و PW، تعداد پارامترهای تابع تبدیل ثابت نبوده و با افزایش تعداد نقاط کنترل بیشتر می‌شود.

هر تابع تبدیل خصوصیات ویژه‌ای داشته و نقاط مثبت و منفی مربوط به خود را دارد. مدل‌های سراسری سرعت محاسباتی بالایی داشته و انتخاب مناسبی برای برقراری ارتباط هندسی میان دو فضای دو بعدی از مناظر مسطح هستند. در مقابل در مناطق با تغییرات ارتفاعی شدید دقت خوبی ندارند. در مقابل مدل‌های تبدیل انطباقی دقت بسیار بهتری در برابر اعوجاجات هندسی پیچیده ارائه می‌دهند. البته برای این منظور نیاز به تعداد زیادی از نقاط کنترل با توزیع مناسبی در دو فضا دارند. علاوه بر این پیچیدگی محاسباتی آنها بسیار بیشتر از مدل‌های پارامتر ثابت است.

در این تحقیق عملکرد مدل‌های تبدیل دو بعدی شامل متشابه، پروژکتیو، چندجمله‌ای‌ها و تبدیل‌های انطباقی PL، MQ و PW در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در جدول ۱ روابط اصلی و مشخصات تبدیل‌های دو بعدی مورد ارزیابی در این تحقیق نشان داده شده‌است. در ادامه توضیحاتی در مورد خصوصیات هر یک از این مدل‌ها ارائه شده‌است:

▪ **تبدیل متشابه:** تبدیل متشابه یکی از ساده‌ترین تبدیل‌های مورد استفاده در فتوگرامتری است. این تبدیل از چهار پارامتر شامل یک پارامتر مقیاس، یک پارامتر دوران و دو پارامتر انتقال تشکیل شده‌است. تحت این تبدیل زوایا و نسبت میان طول‌ها ثابت می‌ماند و برای حل آن حداقل دو نقطه‌ی کنترل مورد نیاز است.

▪ **تبدیل پروژکتیو:** در تبدیل پروژکتیو مطابق با شکل ۲، ارتباط میان دو فضای دو بعدی از طریق

سیستم پروژکشن مرکزی^۱ توصیف می‌شود. در این تبدیل زوایا و نسبت طول‌ها تحت تبدیل حفظ نمی‌شوند. اما دارای یک خصوصیت ویژه مبتنی بر سیستم تصویر مرکزی با عنوان نسبت توافقی^۲ است که بین خطوط متقاطع با دسته پرتوهای نقاط نظیر ایجاد می‌شود [۱۹]. تبدیل پروژکتیو یکی از پرکاربردترین تبدیل‌های دو بعدی در فتوگرامتری و سنجش از دور بوده و در پردازش‌های بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال یکی از کاربردهای اساسی تبدیل پروژکتیو در فرآیند ترمیم^۳ به منظور حذف جابه‌جایی ناشی از تیلت در تصاویر مایل است. البته در صورتی که منطقه نسبتاً مسطح بوده و تغییرات ارتفاعی ناچیز باشد این مدل نتایج مناسبی را ارائه خواهد کرد. تبدیل پروژکتیو شامل هشت ضریب بوده و به منظور برآورد ضرایب آن حداقل چهار نقطه‌ی کنترل که هیچ ترکیب سه تایی از آنها در روی یک خط واقع نیستند مورد نیاز است.

▪ **چندجمله‌ای‌ها:** چند جمله‌ای‌ها از تبدیل‌های متداول دو بعدی هستند که امکان مدل‌سازی اعوجاجات هندسی غیرخطی با استفاده از آنها وجود دارد. صورت کلی یک چند جمله‌ای در جدول ۱ نشان داده شده‌است. در صورتی که درجه‌ی چند جمله‌ای برابر n فرض شود آنگاه تعداد پارامترهای آن برابر $(n+1)(n+2)$ خواهد بود. هر کدام از ترم‌های مورد استفاده در چند جمله‌ای، نوع خاصی از اعوجاج‌ها را مدل‌سازی کرده و عموماً با توجه به نوع و میزان اختلافات هندسی میان دو فضا تعیین می‌شود. البته در استفاده از چندجمله‌ای‌ها با درجه‌های بالا باید بسیار احتیاط نمود چراکه ترم‌های بالاتر اگرچه ممکن است سازگاری هندسی خوبی میان نقاط کنترل برقرار نمایند، اما در دیگر قسمت‌ها سازگاری مناسبی نداشته و اثری پیچیده و با نوسانات بالا ایجاد می‌کنند.

▪ **تبدیل قطعه‌ای مبتنی بر مثلث‌بندی (PL):** یکی از ساده‌ترین و متداول‌ترین تبدیل‌های قطعه‌ای، تبدیل قطعه‌ای مبتنی بر مثلث‌بندی و تبدیل دو

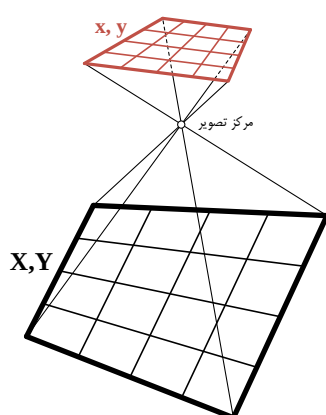
^۱ Central projection

^۲ Cross ratio

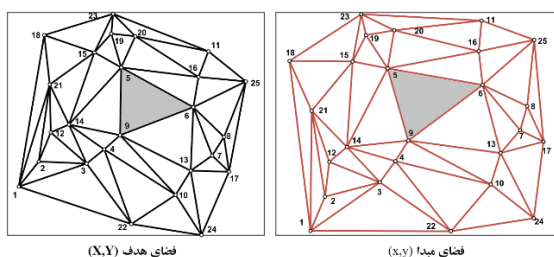
^۳ Rectification

شعاعی و متقارن هستند استفاده می‌شود. بنابراین در صورتی که توزیع نقاط کنترل به صورت یکنواخت و متراکم نباشد، خطای زیادی در مناطقی که تعداد نقاط کم است، وجود خواهد داشت [۲۵].

▪ **تبدیل Pointwise (PW):** در این مدل نیز مشابه مدل MQ از یک چند جمله‌ای برای برقراری ارتباط اولیه میان دو فضای مبدا و هدف استفاده شده و سپس از میانگین وزن دار باقیمانده‌ی (خطای) نقاط کنترل در تابع چند جمله‌ای، برای مدل‌سازی دقیق‌تر استفاده می‌شود. در این روش نیاز به حل دستگاه معادلات خطی نبوده و مقدار تابع تبدیل تنها بر مبنای میانگین وزن دار نقاط محاسبه می‌شود. به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی به جای اینکه تمامی نقاط کنترل در برآورد مقدار تابع تبدیل مورد استفاده قرار گیرند، از تعداد k نقطه‌ی نزدیک در همسایگی اطراف هر نقطه استفاده می‌شود.



شکل ۲- هندسه تبدیل پروژکتیو برای برقراری ارتباط میان دو صفحه



شکل ۳- تبدیل قطعه‌ای مبتنی بر مثلث‌بندی و تبدیل افاین

به طور کلی انتخاب مدل تبدیل برای برقراری ارتباط هندسی میان دو تصویر به عوامل مختلفی بستگی دارد که بعضی از عوامل اصلی به ترتیب زیر قابل بیان هستند. عامل اول میزان اعوجاجات میان دو فضای مبدا و هدف است. به عنوان مثال اگر مدل تبدیل برای هم مرجع سازی دو تصویر

بعدی افاین است [۲۰]. در این تبدیل مطابق با شکل ۳، در ابتدا فرآیند مثلث‌بندی نقاط در فضای مبدا انجام شده و سپس برای هر مثلث با استفاده از سه نقطه‌ی راس آن یک تبدیل افاین برآورد می‌شود. از تبدیل افاین برآورد شده برای هر جفت مثلث، برای برقراری ارتباط میان فضای درون آنها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه برای برآورد مدل تبدیل افاین حداقل سه نقطه مورد نیاز است، بنابراین مدل تبدیل قطعه‌ای تعیین شده به این روش یک مدل قطعی است. تبدیل PL در تحقیقات متعددی نظیر [۲۱-۲۳] به عنوان مدل تبدیل برای هم مرجع سازی تصاویر بزرگ مقیاس ماهواره‌ای استفاده شده‌است. با این وجود این مدل دارای سه محدودیت اساسی است: (۱) در این مدل لبه‌های میان مثلث‌ها به صورت نرم نبوده و ممکن است با تغییرات زیادی همراه باشد، (۲) در بعضی از قسمت‌های تصویر که مثلث‌های کشیده با زوایای تیز وجود دارد، دقت به شدت کاهش می‌یابد و (۳) نقاط خارج محدوده‌ی مثلث‌بندی فاقد تابع تبدیل خواهند بود.

▪ **تبدیل Multiquaderc (MQ):** مدل تبدیل MQ یک مدل تبدیل انطباقی مبتنی بر توابع پایه‌ی شعاعی^۱ است که اولین بار توسط Hardy [۲۴] ارائه شده‌است. شکل کلی این تبدیل به صورت مجموع یک چند جمله‌ای از درجه‌ی پایین و یک ترکیب خطی از یک تابع پایه‌ی شعاعی مبتنی بر فاصله مطابق با جدول ۱ است. ایده‌ی اساسی در این روش حذف بردار خطای نقاط کنترل در مدل چندجمله‌ای با استفاده از ضرایب پایه‌شعاعی است که از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی برای تمام نقاط محاسبه می‌شود. مدل تبدیل MQ سازگاری بسیار بالایی در مجموعه‌ی نقاط کنترل داشته و با استفاده از آن می‌توان اعوجاجات محلی پیچیده را مدل‌سازی نمود. در صورتی که تعداد نقاط کنترل خیلی زیاد باشد، دستگاه معادلات خطی در این مدل بسیار بزرگ شده و تعداد ضرایب و در نتیجه پیچیدگی محاسباتی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر در مدل MQ از توابع پایه مبتنی بر فاصله که به صورت

^۱ Radial basis functions

ماهواره‌ای کوچک مقیاس از یک منطقه‌ی مسطح باشد آنگاه یک تبدیل پروژکتیو به خوبی می‌تواند برای مدل‌سازی اختلافات هندسی میان دو تصویر به کار رود. اما این تبدیل برای دو تصویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس از یک منطقه با تغییرات ارتفاعی زیاد مناسب نخواهد بود. عامل دوم تعداد نقاط کنترل و پراکندگی آنهاست. در صورتی که تعداد نقاط کنترل بالا باشد می‌توان از مدل‌های قطعه‌ای و انطباقی استفاده نمود. عامل بعدی میزان دقت مورد نیاز است. در صورتی که هدف برقراری مطابقت میان تصاویر به صورت تقریبی باشد آنگاه اکثر مدل‌های تبدیل مربوط به دسته اول نظیر پروژکتیو نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

با توجه به تنوع تبدیل‌های دو بعدی شناخت نقاط قوت و ضعف آنها به منظور استفاده در شرایط مناسب بسیار ضروری است. از جمله تحقیقات انجام شده برای این منظور می‌توان به [۱۶، ۲۵] اشاره کرد. همانطور که بیان شد، مدل‌های تبدیل انطباقی نیاز به تعداد کافی نقاط کنترل با دقت و توزیع مناسب در تصاویر دارد. این در حالی است که

استخراج اتوماتیک تعداد زیادی از نقاط کنترل با تعداد و توزیع مناسب خصوصاً در تصاویر ماهواره‌ای فرآیند بسیار دشواری است. بر این اساس بیشتر تحقیقات به منظور ارزیابی مدل‌های انطباقی یا از تعداد محدودی از نقاط کنترل استفاده کرده‌اند و یا فرآیند ارزیابی را در داده‌های شبیه‌سازی شده انجام داده‌اند [۲۵]. در این تحقیق یک روش کارآمد برای استخراج یک تعداد زیاد از نقاط کنترل با دقت و توزیع مناسب در تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده‌است که به منظور ارزیابی کامل مدل‌های تبدیل در داده‌های واقعی قابل استفاده خواهد بود.

در این تحقیق به منظور ارزیابی عملی مدل‌های تبدیل دو بعدی عملکرد آنها بر روی تصاویر واقعی ماهواره‌ای با حد تفکیک بالا انجام شده‌است. علاوه بر این اثر تعداد و توزیع نقاط کنترل به عنوان یک پارامتر اساسی در دقت و سرعت مدل‌های تبدیل در برقراری ارتباط هندسی میان تصاویر نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های تبدیل دو بعدی مورد مقایسه

دسته	نام مدل	رابطه اصلی مدل تبدیل	تعداد پارامترهای مجهول مدل تبدیل	توضیحات
تبدیل‌های سراسری	متشابه	$\begin{aligned} X &= a_1 \cdot x + b_1 \cdot y + a_2 \\ Y &= -b_1 \cdot x + a_1 \cdot y + b_2 \end{aligned}$	۴	X, Y : مختصات نقاط کنترل در فضای مبدا X, Y : مختصات نقاط کنترل در فضای هدف N : تعداد نقاط کنترل n : درجه چند جمله‌ای t : تعداد مثلث‌های ایجاد شده از N نقطه کنترل
	پروژکتیو	$\begin{aligned} X &= \frac{a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + 1} \\ Y &= \frac{b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3}{c_1 \cdot x + c_2 \cdot y + 1} \end{aligned}$	۸	P_x^n و P_y^n : توابع چندجمله‌ای از درجه n $R_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$: تابع فاصله A_i و B_i : ضرایب مجهول توابع پایه‌ی شعاعی ΔX_i و ΔY_i : باقیمانده‌ی نقطه‌ی کنترل در تابع چندجمله‌ای w_i : پارامتر وزن باقیمانده‌ها ($w_i = \frac{1}{R_i^q}$)
	چند جمله‌ای‌ها	$\begin{aligned} X &= P_x^n(x, y) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j a_{ij} \cdot x^{j-i} \cdot y^i \\ Y &= P_y^n(x, y) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j b_{ij} \cdot x^{j-i} \cdot y^i \end{aligned}$	$(n+1)(n+2)$	d : پارامتر کنترل اثر نقاط دور و نزدیک k : تعداد نزدیک‌ترین نقاط مشارکت‌کننده در برآورد میانگین وزندار
تبدیل‌های انطباقی	PL	$\begin{aligned} X &= a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \\ Y &= b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \end{aligned}$	$6t$	PL: مدل تبدیل قطعه‌ای مبتنی بر مثلث‌بندی
	MQ	$\begin{aligned} X &= P_x^n(x, y) + \sum_{i=0}^N A_i \cdot R_i(x, y) \\ Y &= P_y^n(x, y) + \sum_{i=0}^N B_i \cdot R_i(x, y) \end{aligned}$	$(n+1)(n+2) + 2N$	MQ: مدل تبدیل Multiquaderic
	PW	$\begin{aligned} X &= P_x^n(x, y) + \sum_{i=0}^k w_i \cdot \Delta X_i \\ Y &= P_y^n(x, y) + \sum_{i=0}^k w_i \cdot \Delta Y_i \end{aligned}$	$(n+1)(n+2)$	PW: مدل تبدیل Pointwise

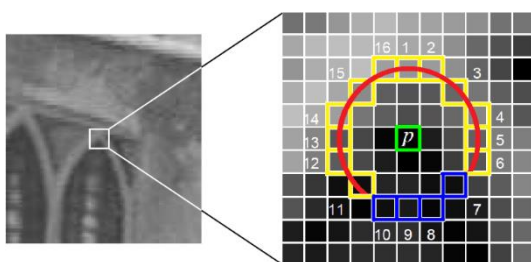
۳- استخراج نقاط گرهی

دقت، تعداد و توزیع نقاط گرهی اصلی‌ترین پارامترهای موثر در کیفیت فرآیند هم مرجع سازی دو تصویر با استفاده از مدل‌های تبدیل دو بعدی هستند. در این تحقیق به منظور استخراج کارآمد یک مجموعه‌ی مناسب

از نقاط گرهی دقیق، از یک روش ترکیبی عارضه‌مبنا و ناحیه‌مبنا استفاده شده‌است. مراحل اصلی روش پیشنهادی به ترتیب زیر هستند:

نزدیک‌ترین همسایگی نسبت فاصله (γ DRNN) [۸] استفاده شده‌است. برای حذف اشتباهات نیز از روش موضعی بر مبنای خوشه‌بندی عوارض و تابع تبدیل پروژکتیو استفاده شده‌است [۱۷]. فرض اساسی در این روش بر این مبنا است که اعوجاجات هندسی در تصاویر بزرگ مقیاس، به صورت محلی با استفاده از تبدیل هندسی پروژکتیو قابل مدل کردن است.

(۴) **بهبود دقت مکانی نقاط کنترل:** به منظور بهبود دقت مطابقت تناظرهای استخراج شده از روش تناظریابی کمترین مربعات [۲۷، ۱۸] استفاده شده‌است. فرآیند تناظریابی در این الگوریتم با مقایسه‌ی دو پنجره تناظریابی انجام می‌پذیرد. اساس این روش بر مبنای مجموع مربعات اختلافات درجات خاکستری 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 پنجره‌ی تناظریابی در یک روند تکراری و از طریق یک فرآیند سرشکنی برآورد می‌شود.



شکل ۴- استخراج عوارض نقطه‌ای در الگوریتم FAST [۷]

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش تصاویر مورد استفاده، جزئیات پیاده‌سازی و نتایج ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های تبدیل دو بعدی بیان می‌شود.

۴-۱- داده‌های مورد استفاده و جزئیات پیاده‌سازی

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی از ۲ جفت تصویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس مربوط به سنجنده‌های ZY3 و IKONOS استفاده شده‌است. در جدول ۲ مشخصات تصاویر مورد استفاده نشان داده شده‌است. تصاویر مورد استفاده

(۱) استخراج عوارض FAST^۱: الگوریتم FAST [۷]

یک روش سریع برای استخراج عوارض نقطه‌ای دقیق و پایدار است. ایده‌ی اساسی در این روش استخراج عوارض بر مبنای مقایسه‌ی درجات خاکستری پیکسل‌های واقع در روی یک ناحیه‌ی دایره‌ای است. به عنوان مثال مشابه شکل ۴، تعداد ۱۶ پیکسل در روی یک دایره در اطراف نقطه‌ی کاندیدای p در نظر گرفته می‌شود. نقطه‌ی کاندیدای p به عنوان یک عارضه انتخاب می‌شود، اگر تعداد n پیکسل پیوسته، از میان ۱۶ پیکسل روی دایره، تیره‌تر یا روشن‌تر (با در نظر گرفتن یک آستانه برای مقایسه) از درجه خاکستری پیکسل مرکزی باشد. برای استخراج متراکم با توزیع مناسب عوارض در این الگوریتم از یک روش شبکه‌ای مشابه [۲۶] استفاده می‌شود. در این روش تصویر به صورت یک شبکه‌ی منظم بخش‌بندی شده و عوارض هر سلول به صورت جداگانه و با در نظر گرفتن یک آستانه‌ی انطباقی استخراج می‌شوند.

(۲) ایجاد توصیفگر SIFT: بعد از استخراج عوارض

در دو تصویر به منظور ایجاد مطابقت میان آنها، یک توصیفگر برای هر یک از آنها ایجاد می‌شود. به منظور ایجاد توصیفگر از الگوریتم شاخص SIFT [۸] استفاده می‌شود. این توصیفگر یک هیستوگرام ۳ بعدی است که با استفاده از موقعیت و جهت گرادینان‌ها ایجاد می‌شود. ساختار این هیستوگرام ۳ بعدی به صورتی است که در آن موقعیت به صورت یک شبکه‌ی 4×4 و جهت نیز در ۸ قسمت، تقسیم‌بندی شده‌اند. بنابراین توصیفگر نهایی به صورت یک بردار با ۱۲۸ مؤلفه ($4 \times 4 \times 8 = 128$) است.

(۳) برقراری مطابقت و حذف تناظرهای اشتباه:

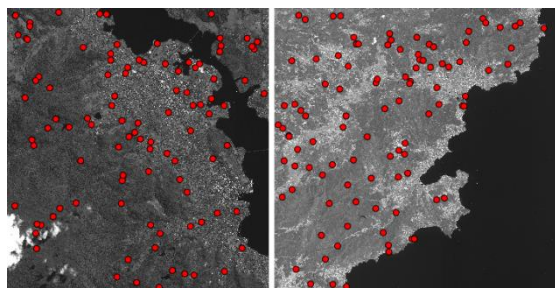
این مرحله مطابقت میان عوارض با مقیاسه‌ی توصیفگرهای آنها با یکدیگر انجام می‌شود. علاوه بر این بعد از انجام فرآیند تناظریابی عموماً تعدادی از تناظرهای انتخاب شده اشتباه هستند و باید حذف شوند. به منظور برقراری مطابقت از معیار فاصله‌ی اقلیدسی به صورت دو جانبه و با استفاده از روش

^۲ Distance ratio nearest neighbor-based matching

^۱ Features from Accelerated Segment Test

۴-۲- معیارهای ارزیابی دقت مدل‌ها

برای ارزیابی دقت مکانی مدل‌های تبدیل ۲ بعدی از معیار ریشه‌ی میانگین مربعات خطا، $RMSE^1$ برای یک مجموعه از نقاط چک استفاده می‌شود. مجموعه‌ی نقاط چک، مجموعه‌ی نقاط گرهی بسیار دقیقی هستند که در فرآیند برآورد ضرایب تابع تبدیل هیچ دخالتی داده نشده‌اند. برای این منظور در هر جفت تصویر مورد استفاده، تعداد ۱۰۰ عدد نقطه‌ی متناظر بسیار دقیق به صورتی دستی و با یک توزیع مناسب انتخاب می‌شود. بعد از انتخاب دستی نقاط، دقت تناظرایی در آنها با استفاده از روش تناظرایی کمترین مربعات نیز بهبود داده می‌شود. در شکل ۵ توزیع نقاط چک انتخاب شده برای تصاویر مورد استفاده از سنجنده‌های ZY3 و IKONOS نشان داده شده‌است.



شکل ۵- توزیع نقاط چک، (الف) تصویر ZY3، (ب) تصویر IKONOS

برای محاسبه معیار $RMSE$ ، در ابتدا با استفاده از نقاط کنترل انتخاب شده برای هر جفت تصویر، ضرایب مجهول تابع تبدیل موردنظر محاسبه می‌شود. سپس مختصات نقاط چک با استفاده از تابع تبدیل برآورد شده، از فضای تصویر مبدا به فضای تصویر هدف منتقل می‌شوند. مختصات منتقل شده‌ی این نقاط حاصل از تابع تبدیل، با مختصات معلوم آنها مقایسه شده و میزان اختلاف آنها به عنوان خطا در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی زیر میزان $RMSE$ برای نقاط چک محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_C} [(X_i - X'_i)^2 + (Y_i - Y'_i)^2]}{N_C - 1}} \quad (3)$$

که در آن N_C بیانگر تعداد نقاط چک، (X_i, Y_i) بیانگر مختصات معلوم نقاط چک و (X'_i, Y'_i) بیانگر مختصات نقاط چک حاصل از تابع تبدیل برآورد شده در فضای تصویر هدف است.

دارای مناظر و شرایط بافتی گوناگونی نظیر مناطق ساختاری شهری، مناظر طبیعی با بافت پیچیده و مناطق یکنواخت با بافت همگون هستند. هر دو جفت تصویر مورد استفاده، تصاویر پانکروماتیک سیاه و سفید هستند.

جدول ۲- مشخصات تصاویر مورد استفاده

جفت تصویر	ابعاد تصویر (پیکسل)	GSD (متر)	بیت در هر پیکسل	تاریخ اخذ	مکان
ZY3	۱۶۳۸۴×۱۶۳۰۶	۳٫۵	۱۱	۲۰۱۴	Sainte فرانسه
IKONOS	۱۳۱۴۸×۱۲۱۲۴	۱	۱۱	۲۰۰۱	Hobart استرالیا

جدول ۳- پارامترهای ورودی روش ترکیبی پیشنهادی برای استخراج نقاط کنترل

الگوریتم	نام پارامتر	مقدار ورودی
FAST شبکه‌ای	تعداد همسایگی پیکسل‌ها	۱۶
	آستانه مقایسه‌ی پیکسل‌ها	۰٫۰۶
	ابعاد شبکه‌بندی	۱۰۰×۱۰۰
توصیفگر SIFT	ابعاد بخش‌بندی مکانی	۴×۴
	ابعاد هیستوگرام جهت	۸
خوشه‌بندی و پروژکتیو محلی	آستانه DRNN	۰٫۸۵
	متوسط تعداد عوارض هر خوشه‌ها	۱۰۰
	آستانه‌ی دقت هر خوشه	۲ پیکسل
تناظرایی کمترین مربعات	شعاع پنجره تناظرایی	۱۳ پیکسل
	حداکثر تعداد تکرارها	۲۰
	مدل تبدیل	افاین
	شرط توقف	۰٫۰۱ پیکسل

روش پیشنهادی از ترکیب الگوریتم‌های مختلفی برای استخراج نقاط کنترل استفاده می‌کند. سعی بر این بوده که در تمام الگوریتم‌های مورد استفاده از پارامترهای پیش فرض مطابق با پیشنهاد نویسندگان استفاده شود. در جدول ۲ مقدار پارامترهای اصلی مورد استفاده در این الگوریتم‌ها ارائه شده‌است. برای دریافت جزئیات بیشتر به منابع اصلی الگوریتم‌ها مراجعه شود.

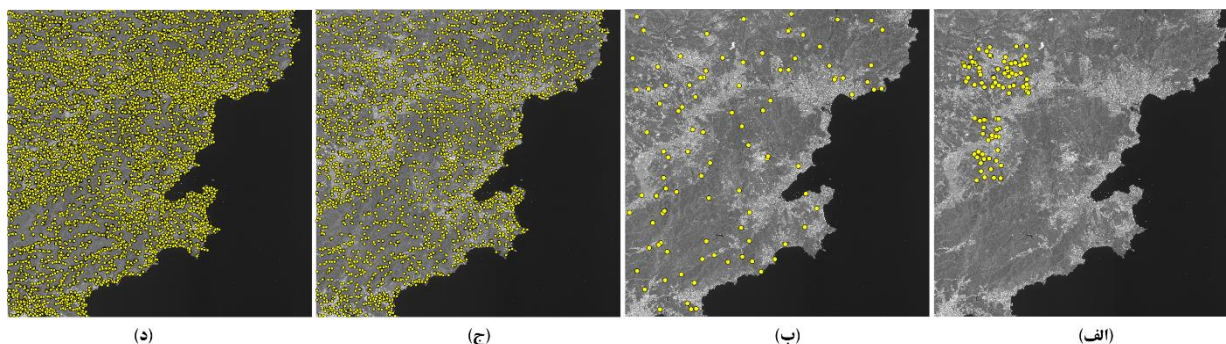
برای پیاده‌سازی مدل‌های تبدیل مورد مقایسه از روابط اصلی نشان داده شده در جدول ۱ استفاده شده‌است. ضمناً چند جمله‌ای مورد استفاده در مدل‌های تبدیل MQ و PW از درجه ۲ انتخاب شد. در مدل تبدیل PW نیز میزان پارامتر d (توان فاصله) برابر ۲ و میزان پارامتر k (تعداد نقاط مشارکت‌کننده) برابر ۵ انتخاب شد.

^۱ Root Mean Square Error

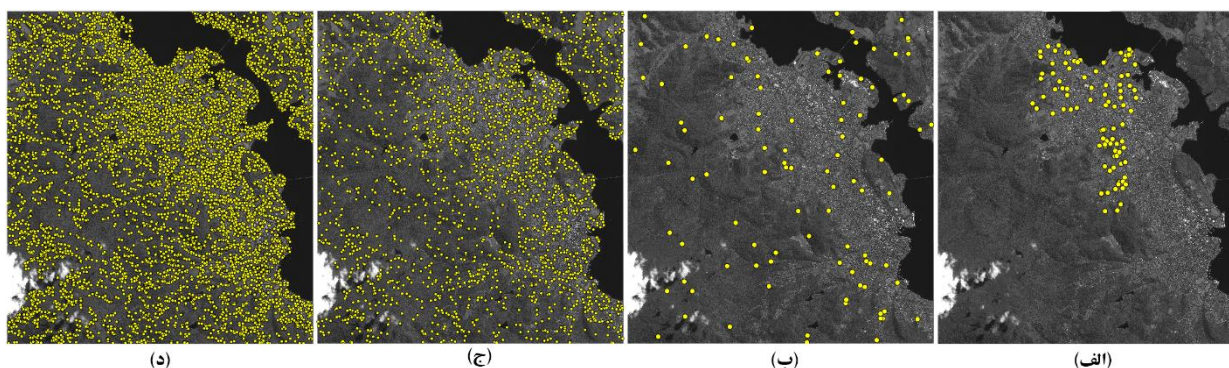
برای ارزیابی توزیع خطای مدل تبدیل در نقاط متفاوت تصویر، میزان خطای نقاط چک به صورت گرافیکی با استفاده از بردارهای خطا نشان داده می‌شود. بررسی این بردارها کمک فراوانی به برآورد یک تابع تبدیل دقیق و صحیح می‌کند. به عنوان مثال در صورتی که بردار خطا تنها در بعضی از نقاط چک بسیار زیاد باشد، بیانگر این است که یا در آن مناطق تعداد نقاط کنترل کافی نیست و یا اساسا تابع تبدیل مورد استفاده توانایی مدل‌سازی مناسب اعوجاجات مربوط به آن مناطق را ندارد. برای بررسی این موضوع باید با افزایش نقاط کنترل در آن قسمت‌ها کیفیت تابع تبدیل را مجددا بررسی کرد. البته ابتدا باید مطمئن شد که نقاط چک مورد نظر نقاط دقیق و صحیحی بوده و بردار خطای ایجاد شده به دلیل خطای زیاد آنها نباشد.

در این تحقیق به منظور ارزیابی اثر تعداد و توزیع نقاط کنترل در میزان دقت توابع تبدیل، نقاط کنترل استخراج شده در روش پیشنهادی در چهار حالت مورد استفاده قرار

می‌گیرند. در حالت اول یک تعداد کم از نقاط کنترل (۱۰۰ نقطه) با یک توزیع نسبتا بد استفاده می‌شوند. در حالت دوم همان تعداد نقاط با یک توزیع خوب استفاده می‌شوند. در حالت سوم تعداد نسبتا زیادی از نقاط کنترل که دارای توزیع نسبتا خوبی در تصاویر هستند استفاده می‌شوند. در حالت چهارم تعداد بسیار بیشتری از نقاط کنترل که دارای توزیع خوبی در تصویر نیز هستند استفاده می‌شوند. یادآوری می‌شود که نقاط کنترل مورد استفاده در روش پیشنهادی با استفاده از یک روش ترکیبی بر مبنای الگوریتم FAST، توصیفگر SIFT و روش تناظرایی کمترین مربعات استخراج می‌شوند که در اینجا به چهار دسته با تعداد و توزیعی که در بالا بیان شد تقسیم‌بندی می‌شوند. توزیع نقاط کنترل مربوط به چهار حالت بیان شده و مربوط به تصاویر مورد ارزیابی ZY3 و IKONOS به ترتیب در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۶- توزیع نقاط کنترل در چهار حالت مورد ارزیابی در تصویر ZY3، (الف) حالت ۱: نقاط کم با توزیع بد، (ب) حالت ۲: نقاط کم با توزیع خوب، (ج) حالت ۳: نقاط زیاد با توزیع خوب (د) نقاط خیلی زیاد با توزیع خوب



شکل ۷- توزیع نقاط کنترل در چهار حالت مورد ارزیابی در تصویر IKONOS، (الف) حالت ۱: نقاط کم با توزیع بد، (ب) حالت ۲: نقاط کم با توزیع خوب، (ج) حالت ۳: نقاط زیاد با توزیع خوب (د) نقاط خیلی زیاد با توزیع خوب

علاوه بر معیار RMSE و نمایش گرافیکی بردارهای خطا، به منظور ارزیابی سرعت و کارایی مدل‌های مختلف از معیار زمان انجام محاسبات نیز استفاده شده‌است. برای

این منظور زمان محاسبات لازم برای برآورد پارامترهای مدل و همچنین محاسبه مختصات حاصل از آن برای نقاط کنترل و چک در دو جفت تصویر مورد ارزیابی

اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است که پیاده‌سازی تمامی مدل‌ها به طور مشابه در محیط برنامه نویسی MATLAB 2016b و با استفاده از یک کامپیوتر با سرعت پردازشی ۲,۵۴ گیگا هرتز و حافظه‌ی هشت گیگا بایت انجام شده‌است.

۴-۳- نتایج و بحث

دقت هر یک از مدل‌های تبدیل مورد مقایسه برای نقاط کنترل مستخرج با استفاده از روش پیشنهادی که در

چهار حالت (۱) نقاط کم با توزیع بد، (۲) نقاط کم با توزیع خوب، (۳) نقاط زیاد با توزیع خوب و (۴) نقاط خیلی زیاد با توزیع خوب تقسیم بندی شده‌اند در جدول ۴ نشان داده شده‌است. بردار خطای نقاط چک نیز برای تمام ۹ مدل تبدیل مورد مقایسه و برای حالت چهارم از نقاط کنترل برای جفت تصویر ZY3 در شکل ۸ و برای جفت تصویر IKONOS در شکل ۹ نشان داده شده‌است. در جدول ۵ زمان انجام محاسبات برای دو جفت تصویر مورد ارزیابی و در هر چهار حالت نشان داده شده‌است.

جدول ۴- نتایج کمی مدل‌های تبدیل ۲ بعدی در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

جفت تصویر	حالت	تعداد نقاط کنترل (#)	RMSE نقاط چک (پیکسل)					
			چندجمله‌ای‌ها از درجات مختلف				متشابه	پروژکتیو
			درجه ۱	درجه ۲	درجه ۳	درجه ۴		
ZY3	حالت ۱	۱۰۰	۵۰,۰	۴۱,۲	۴۸,۴	۹۵,۰	۲۵۴,۸	۵۶۱۵,۹
	حالت ۲	۱۰۰	۳۳,۳	۳۲,۵	۳۳,۴	۳۱,۸	۲۲,۳	۲۳,۳
	حالت ۳	۴۰۰	۳۳,۳	۳۱,۹	۳۳,۳	۳۱,۲	۲۲,۴	۲۲,۳
	حالت ۴	۱۱۵۰۰	۳۳,۳	۳۱,۹	۳۳,۳	۳۱,۱	۲۲,۵	۲۲,۳
IKONOS	حالت ۱	۱۰۰	۱۰۵,۱	۶۶,۹	۸۵,۶	۴۷,۲	۲۰۱,۴	۱۱۹۳,۹
	حالت ۲	۱۰۰	۸۶,۳	۵۱,۱	۶۳,۹	۳۴,۴	۳۲,۴	۳۰,۹
	حالت ۳	۲۵۰۰	۸۶,۳	۵۱,۱	۶۴,۱	۳۴,۷	۳۳,۶	۳۰,۰
	حالت ۴	۹۱۷۱	۸۵,۹	۵۱,۴	۶۳,۷	۳۵,۶	۳۴,۱	۲۹,۷

نیز مطابق با جدول ۵، به ترتیب مدل‌های تبدیل انطباقی MQ، PL و PW بیشترین زمان محاسباتی را به خود اختصاص داده‌اند. زمان محاسباتی مدل‌های تبدیل سراسری نیز تقریباً در حدود یکدیگر است. نکته‌ی بسیار مهم اینکه با افزایش تعداد نقاط کنترل در حالت‌های ۳ و ۴، میزان زمان محاسباتی در مدل‌های انطباقی خصوصاً مدل MQ به میزان بسیار زیادی افزایش می‌یابد. با بررسی جدول ۴ و جدول ۵ نتایج زیر در مورد مدل‌های تبدیل مورد ارزیابی در حالت‌های مختلف از تعداد و توزیع نقاط قابل بیان است:

■ تمامی مدل‌های تبدیل در حالت اول که تعداد نقاط کنترل کم بوده و دارای توزیع بدی در تصویر هستند، دقت بسیار پایینی را ارائه می‌دهند. از این میان دقت مربوط به مدل‌های تبدیل چند جمله‌ای درجه ۳ و ۴ بسیار بدتر است. همانطور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود میزان RMSE چندجمله‌ای درجه ۴ برای

جدول ۵- زمان انجام محاسبات مدل‌های تبدیل

مدل تبدیل	زمان محاسبات (دهم ثانیه)							
	جفت تصویر ZY3				جفت تصویر IKONOS			
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
متشابه	۰,۰۰۳	۰,۰۰۵	۰,۰۱۱	۰,۰۲۲	۰,۰۰۳	۰,۰۰۵	۰,۰۱۰	۰,۰۲۰
پروژکتیو	۰,۰۰۳	۰,۰۰۶	۰,۰۱۵	۰,۰۲۴	۰,۰۰۳	۰,۰۰۵	۰,۰۱۰	۰,۰۲۰
چندجمله‌ای	درجه ۱	۰,۰۰۴	۰,۰۰۶	۰,۰۱۳	۰,۰۲۴	۰,۰۰۴	۰,۰۱۱	۰,۰۲۸
	درجه ۲	۰,۰۰۴	۰,۰۰۷	۰,۰۱۸	۰,۰۴۵	۰,۰۰۳	۰,۰۱۲	۰,۰۳۲
	درجه ۳	۰,۰۰۵	۰,۰۰۸	۰,۰۴۲	۰,۰۸۰	۰,۰۰۵	۰,۰۰۷	۰,۰۷۴
	درجه ۴	۰,۰۰۸	۰,۰۰۹	۰,۰۵۴	۰,۱۵۵	۰,۰۰۷	۰,۰۰۸	۰,۱۲۲
PL	۰,۵۵۷	۰,۵۵۳	۱۵,۹	۴۵,۱	۰,۳۷۲	۰,۳۷۰	۹,۶	۳۶,۳
MQ	۰,۰۱۵	۰,۰۲۱	۳۸,۶	۳۸۹,۱	۰,۰۱۴	۰,۰۱۷	۹,۳	۲۳۲,۲
PW	۰,۰۲۲	۰,۰۲۹	۸,۹	۷۰,۳	۰,۰۲۲	۰,۰۲۲	۲,۶	۴۷,۵

به طور کلی همانطور که از نتایج ارائه شده در جدول ۴ ملاحظه می‌شود در بیشتر حالت‌ها مدل تبدیل MQ و بعد از آن PW دارای بالاترین دقت بوده و مدل تبدیل متشابه نیز پایین‌ترین دقت را دارا هستند. از نظر زمان محاسباتی

با تغییر تعداد و توزیع نقاط تغییر محسوسی در زمان محاسبات ایجاد نمی‌شود.

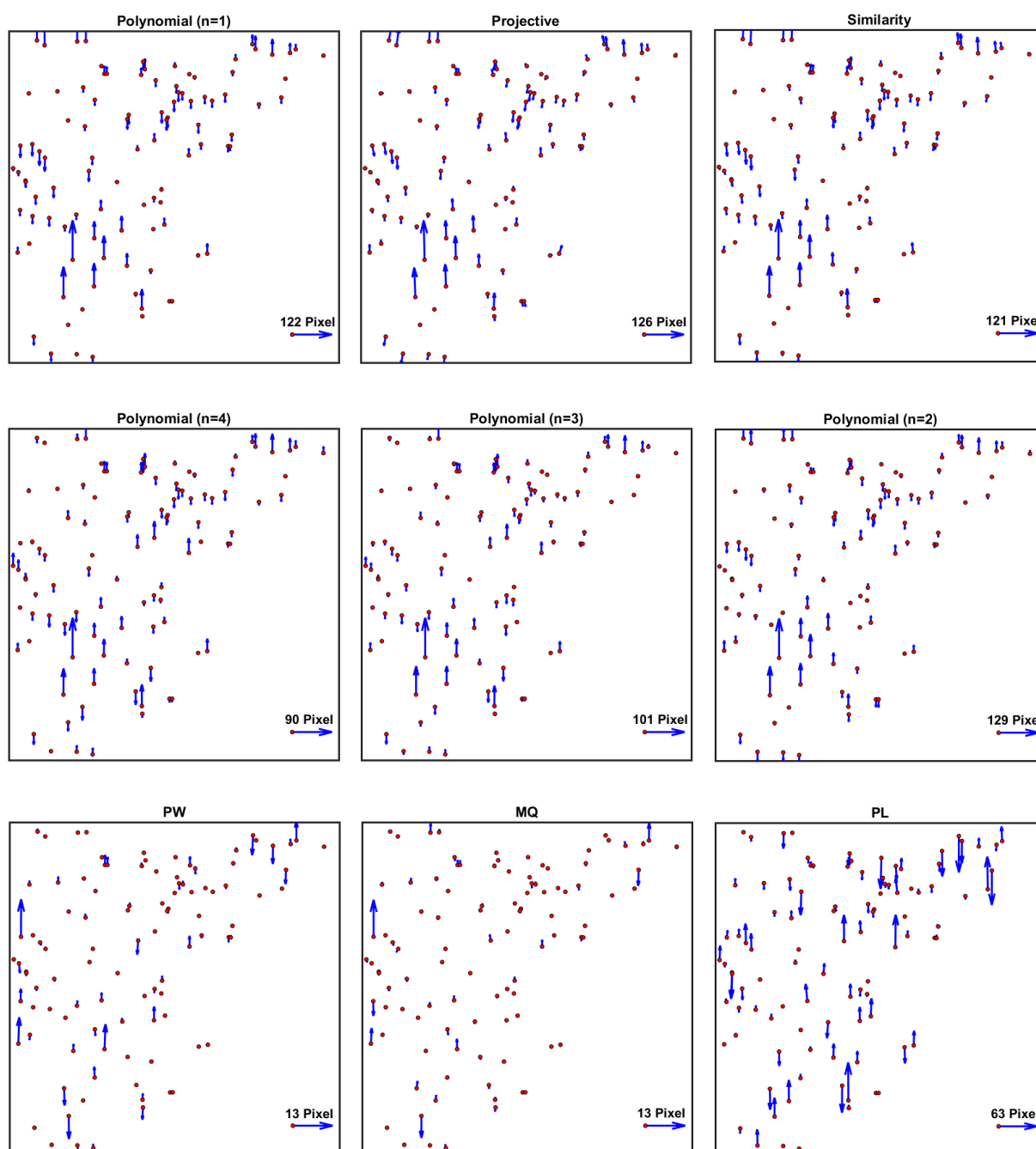
- برای مدل‌های تبدیل انطباقی علاوه بر توزیع، تعداد نقاط نیز بسیار تاثیر گذار است. به عنوان مثال برای مدل تبدیل MQ میزان RMSE با افزایش تعداد نقاط کنترل از حالت دوم تا چهارم برای جفت تصویر ZY3 به ترتیب برابر ۱۹، ۴،۹ و ۲ پیکسل و برای جفت تصویر IKONOS به ترتیب برابر ۱۷،۲، ۴،۷ و ۱،۹ پیکسل است. همانطور که ملاحظه می‌شود مدل‌های تبدیل انطباقی شامل PL، MQ و PW در صورتی که تعداد و تراکم نقاط کنترل بالا بوده و دارای توزیع مناسبی در تصویر باشند، امکان هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای استریو را با دقت مناسبی را دارا هستند. هرچند که دستیابی به دقت‌های بسیار بالا در حد زیر پیکسل در آنها بسیار سخت خواهد بود.
- یک محدودیت اساسی در مدل‌های تبدیل انطباقی خصوصاً مدل MQ زمان محاسباتی بالای آنها در مواقعی است که تعداد نقاط کنترل بسیار زیاد باشد. به عنوان مثال برای حالت چهارم از جفت تصویر ZY3 که تعداد نقاط کنترل برابر ۱۱۵۰۰ نقطه است، تعداد ضرایب مجهول با در نظر گرفتن ضرایب چندجمله‌ای درجه ۲ برابر ۲۳۰۱۲ پارامتر است و بنابراین پیچیدگی محاسباتی دستگاه معادلات خطی مورد نیاز برای برآورد این پارامترها بسیار بالا خواهد بود. از این منظر مدل تبدیل PW دارای برتری است. چراکه در این روش نیاز به حل دستگاه معادلات خطی نبوده و مقدار تابع تبدیل تنها بر مبنای میانگین وزن دار k نقطه نزدیک محاسبه می‌شود.
- محدودیت دیگر مدل‌های تبدیل انطباقی، وابستگی شدید آنها به تراکم و توزیع نقاط کنترل است. چرا که در این مدل‌ها از توابع پایه که به صورت شعاعی و متقارن هستند استفاده می‌شود. بنابراین در صورتی که توزیع نقاط کنترل به صورت یکنواخت و متراکم نباشد، خطای زیادی در مناطقی که تعداد نقاط کم است، وجود خواهد داشت. همانطور که در شکل ۸ و شکل ۹ ملاحظه می‌شود برای مدل‌های تبدیل PW و MQ، بردار خطای بعضی از نقاط چک خصوصاً آنهایی که در لبه‌های تصویر قرار دارند نسبت به دیگر نقاط بسیار بزرگ‌تر است.

نقاط کنترل حالت اول در جفت تصویر ZY3 برابر ۵۶۱۵،۹ پیکسل و برای جفت تصویر IKONOS ۱۱۹۳،۹ پیکسل است. همانطور که ملاحظه می‌شود برای این مدل‌های تبدیل با بهبود توزیع مکانی عوارض در حالت‌های ۲ تا ۴، نتایج به میزان بسیار زیادی بهبود می‌یابد. بنابراین در استفاده از چندجمله‌ای‌ها با درجه‌های بالا باید بسیار احتیاط نمود چراکه ترم‌های بالاتر اگرچه ممکن است سازگاری هندسی خوبی میان نقاط کنترل برقرار نمایند، اما در مناطقی از تصاویر که در فاصله‌ی دورتری از نقاط کنترل قرار دارند خطای بسیار شدیدی ایجاد می‌کنند. بنابراین در مواقعی که تعداد و توزیع نقاط کنترل خوب نیست به هیچ عنوان نباید از چندجمله‌ای درجه‌ی ۳ و بالاتر استفاده کرد.

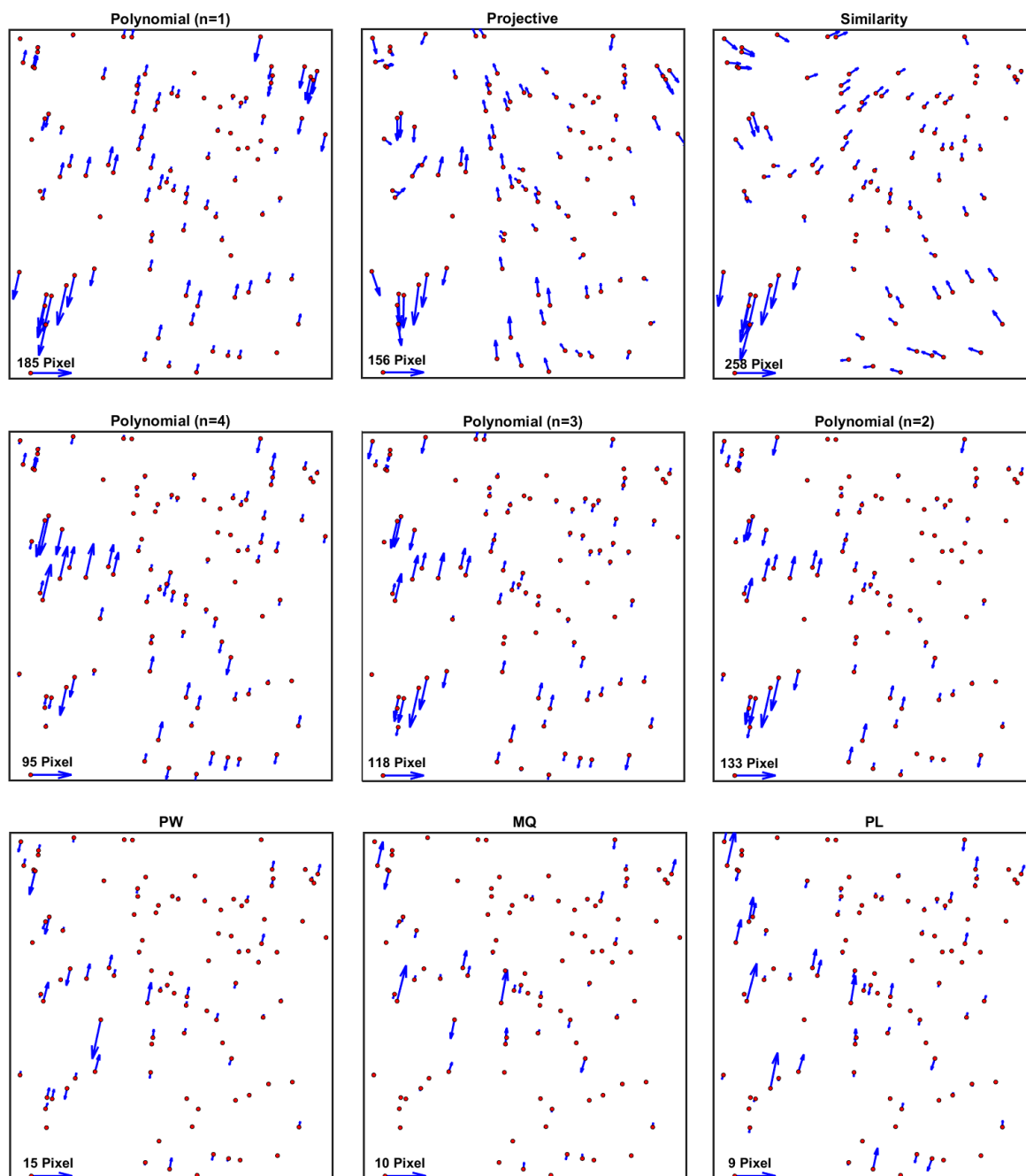
- هیچکدام از مدل‌های تبدیل سراسری، حتی در حالت چهارم که تعداد نقاط کنترل بسیار زیاد و با توزیع خوب هستند، نتایج دقیقی را ارائه نمی‌دهند. به طوری که بالاترین دقت مربوط به چندجمله‌ای درجه‌ی ۴ در حالت چهارم است که در جفت تصویر ZY3 برابر ۲۲،۳ پیکسل و در جفت تصویر IKONOS برابر ۲۹،۷ پیکسل است. نکته مشخص اینکه در حالت‌های دوم تا چهارم که توزیع نقاط کنترل خوب بوده و تنها تعداد آنها تغییر می‌کند، دقت مدل‌های سراسری تغییر چندانی نمی‌کند. به عنوان مثال میزان RMSE تبدیل پروژکتیو برای جفت تصویر ZY3 در حالت‌های دوم و چهارم که تعداد نقاط کنترل برابر ۱۰۰، ۴۰۰ و ۱۱۵۰۰ عدد است، به ترتیب برابر ۳۳،۴، ۳۳،۳ و ۳۳،۳ پیکسل است. این مقدار برای جفت تصویر IKONOS در حالت‌های دوم و چهارم با تعداد ۱۰۰، ۲۵۰۰ و ۹۱۷۱ نقطه، به ترتیب برابر ۶۳،۹، ۶۳،۱ و ۶۳،۷ است. بنابراین در صورتی که هدف استفاده از مدل‌های سراسری است، نیازی نیست تعداد نقاط کنترل بالا باشد، تنها کافی است توزیع مناسبی در سطح تصویر داشته باشند. با توجه به خطای زیاد مدل‌های سراسری استفاده از آنها برای هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای استریو بزرگ مقیاس پیشنهاد نمی‌شود، مگر آنکه هدف هم مرجع سازی تقریبی تصاویر باشد. نکته‌ی دیگر اینکه سرعت محاسباتی مدل‌های تبدیل سراسری بسیار بالا بوده و

■ در میان مدل‌های تبدیل انطباقی مدل تبدیل PL محدودیت‌های خاص خود را دارا است. اولاً نقاط خارج محدوده‌ی مثلث‌بندی فاقد تابع تبدیل بوده و در صورتی که از تبدیل مربوط به مثلث‌های نزدیک آنها استفاده شود و یا اینکه از یک تابع سراسری برای آنها استفاده شود، مقدار خطای آنها زیاد خواهد بود. بنابراین برای حالت اول که توزیع نقاط کنترل بد است تنها بخش بسیار کوچکی از تصاویر دارای تابع تبدیل خواهند بود. دوماً این تبدیل در لبه‌های میان

مثلث‌ها به صورت نرم نبوده و ممکن است با تغییرات زیادی همراه باشد. سوماً دقت تابع تبدیل و مدل‌سازی در این روش به میزان زیادی وابسته به مثلث‌بندی انجام شده و شکل هندسی مثلث‌ها دارد. واضح است در بعضی از قسمت‌های تصویر که مثلث‌های کشیده با زوایای تیز وجود دارد، دقت به شدت کاهش می‌یابد. بعضی از این موارد در بردارهای خطای نشان داده شده در شکل ۸ و شکل ۹ برای مدل PL قابل مشاهده است.



شکل ۸- بردار خطای نقاط چک برای جفت تصویر ZY3 در حالت چهارم در تمام ۹ مدل مورد مقایسه



شکل ۹- بردار خطای نقاط چک برای جفت تصویر IKONOS در حالت چهارم در تمام ۹ مدل مورد مقایسه

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یک روش تناظریایی ترکیبی بر مبنای الگوریتم FAST، توصیفگر SIFT، روش خوشه‌بندی موضعی و تناظریایی کمترین مربعات ارائه شد. به منظور ارزیابی اثر تعداد و توزیع نقاط در نتایج، نقاط کنترل در چهار حالت مختلف شامل (۱) نقاط کم با توزیع بد، (۲) نقاط کم با توزیع خوب، (۳) نقاط زیاد با توزیع خوب و (۴) نقاط خیلی زیاد با توزیع خیلی خوب دسته‌بندی شد. به منظور ارزیابی از دو جفت تصویر ماهواره‌ای استریو مربوط به سنجنده‌های ZY3 و IKONOS استفاده شد. بر اساس نتایج حاصله

مدل‌های تبدیل دو بعدی نقش بسیار مهمی در کیفیت فرآیند هم مرجع سازی تصویر ایفا می‌کنند. در این تحقیق عملکرد ۹ مدل تبدیل دو بعدی مختلف شامل تبدیل متشابه، پروژکتیو، چند جمله‌ای از درجات ۱ تا ۴، PL، MQ و PW در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای بزرگ مقیاس استریو مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور استخراج نقاط کنترل دقیق و با تعداد و توزیع مناسب،

توزیع نقاط کنترل عامل بسیار مهمی در دستیابی به نتایج دقیق در فرآیند هم مرجع سازی تصویر است. هیچکدام از مدل‌های تبدیل سراسری نظیر چندجمله‌ای‌ها دقت بالایی را در هم مرجع سازی تصاویر ماهواره‌ای ارائه نمی‌دهند. در مقابل در صورتی که تعداد و توزیع نقاط کنترل مناسب باشد روش‌های انطباقی نظیر MQ و PW دقت قابل قبولی خواهند داشت. به طور کلی بالاترین دقت برای مدل

تبدیل MQ و به میزان ۲ پیکسل برای جفت تصویر ZY3 و ۱,۹ پیکسل برای جفت تصویر IKONOS حاصل شد. ارزیابی انجام شده در این تحقیق تنها بر روی دو جفت تصویر ماهواره‌ای مربوط به یک سنسور یکسان انجام شد. پیشنهاد می‌شود قابلیت مدل‌های تبدیل مختلف در تصاویر چند سنسوری مربوط به منابع مختلف نیز مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] B. Zitova and J. Flusser. (2003) "Image registration methods: a survey," Image and vision computing, vol. 21, pp. 977-1000.
- [2] A. Sedaghat and N. Mohammadi. (2017) "Reliable Image Matching based On Hessian-Affine Detector and MROGH Descriptor," Journal of Geomatics Science and Technology,
- [3] A. Sedaghat and H. Ebadi. (2015) "Remote Sensing Image Matching Based on Adaptive Binning SIFT Descriptor," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, pp. 5283-5293.
- [4] A. Sedaghat and H. Ebadi. (2015) "Distinctive Order Based Self-Similarity Descriptor for Multi-Sensor Remote Sensing Image Matching " ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 108, pp. 62-71.
- [5] N. Tatar, M. Saadat Seresht, and H. Arefi. (2016) "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.
- [6] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," in Alvey vision conference, 1988, p. 50.
- [7] E. Rosten, R. Porter, and T. Drummond. (2010) "Faster and better: A machine learning approach to corner detection," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, pp. 105-119.
- [8] D. G. Lowe. (2004) "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International journal of computer vision, vol. 60, pp. 91-110.
- [9] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla. (2004) "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions," Image and vision computing, vol. 22, pp. 761-767.
- [10] E. Shechtman and M. Irani, "Matching local self-similarities across images and videos," in Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR'07. IEEE Conference on, Minnesota, USA, 2007, pp. 1-8.
- [11] Z. Wang, B. Fan, and F. Wu, "Local intensity order pattern for feature description," in Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on, Barcelona, Spain, 2011, pp. 603-610.
- [12] M. Gong, S. Zhao, L. Jiao, D. Tian, and S. Wang. (2014) "A Novel Coarse-to-Fine Scheme for Automatic Image Registration Based on SIFT and Mutual Information," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 4328-4338.
- [13] Y. Sun, L. Zhao, S. Huang, L. Yan, and G. Dissanayake. (2014) "L2-SIFT: SIFT feature extraction and matching for large images in large-scale aerial photogrammetry," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 91, pp. 1-16.
- [14] Y. Han, J. Choi, Y. Byun, and Y. Kim. (2014) "Parameter Optimization for the Extraction of Matching Points Between High-Resolution Multisensor Images in Urban Areas," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 52,
- [15] J. Joglekar, S. S. Gedam, and B. Krishna Mohan. (2014) "Image Matching Using SIFT Features and Relaxation Labeling Technique—A Constraint Initializing Method for Dense Stereo Matching," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 5643 - 5652
- [16] A. A. Goshtasby, "Image registration methods Principles, Tools and Methods," ed: Springer, 2012, p. 441.
- [17] A. Sedaghat and H. Ebadi. (2015) "Very High Resolution Image Matching Based on Local Features and K-Means Clustering," The Photogrammetric Record, vol. 30, pp. 166-186.
- [18] F. Ackermann, "High precision digital image correlation," in Proceedings 39th Photogrammetric Week, Stuttgart, 1983, pp. 231-243.

- [19] T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, Close range photogrammetry: Principles, methods and applications: Whittles, 2006.
- [20] A. Goshtasby. (1986) "Piecewise linear mapping functions for image registration," Pattern Recognition, vol. 19, pp. 459-466.
- [21] G. Hong and Y. Zhang. (2008) "Wavelet-based image registration technique for high-resolution remote sensing images," Computers & Geosciences, vol. 34, pp. 1708-1720.
- [22] L. Yu, D. Zhang, and E.-J. Holden. (2008) "A fast and fully automatic registration approach based on point features for multi-source remote-sensing images," Computers & Geosciences, vol. 34, pp. 838-848.
- [23] Y. Ye and J. Shan. (2014) "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.
- [24] R. L. Hardy. (1971) "Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces," Journal of geophysical research, vol. 76, pp. 1905-1915.
- [25] L. Zagorchev and A. Goshtasby. (2006) "A comparative study of transformation functions for nonrigid image registration," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 15, pp. 529-538.
- [26] A. Sedaghat, H. Ebadi, and M. Mokhtarzade. (2010) "An Accurate and Efficient Registration Approach for Satellite Images using Combination of Harris Operator and SIFT Descriptor," Iranian Remote Sensing & GIS, vol. 2, pp. 1-22.
- [27] A. Gruen. (1985) "Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique," South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, vol. 14, pp. 175-187.