

تناظریابی اتوماتیک تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه

امین صداقت^{۱*}، حمید عبادی^۲، علی محمدزاده^۳، مهدی مختارزاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
am.sedaghat@kntu.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ebadi@kntu.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
{m_mokhtarzade, a_mohammadzadeh}@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۱، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۲)

چکیده

تناظریابی دو یا چند تصویر، یک فرآیند اساسی در فتوگرامتری رقومی است. تناظریابی کاملاً اتوماتیک تصاویر همگرا به دلیل اعوجاجات هندسی قابل توجه در آنها، بسیار دشوار بوده و اکثر الگوریتم‌ها در حذف تناظرهای اشتباه احتمالی در این تصاویر با اشکال روبرو می‌شوند. در این مقاله روشی کارآمد جهت تناظریابی تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه ارائه شده است. روش پیشنهادی از سه مرحله اصلی تشکیل شده است. در مرحله اول از الگوریتم کارآمد ASIFT (Affine-SIFT)، جهت استخراج و تناظریابی اولیه میان تصاویر استفاده می‌شود. در مرحله دوم با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک در برآورد قید هندسی اپی‌پولار، اغلب تناظرهای اشتباه میان تصاویر حذف می‌شوند. با توجه به نقص قید هندسی اپی‌پولار در حذف تمامی اشتباهات، در روش پیشنهادی در مرحله سوم از یک روش کارآمد جهت حذف اشتباهات محدود باقیمانده از مرحله قبل استفاده می‌شود. در این روش فرآیند خوشه‌بندی میان عوارض مستخرج از مرحله قبل با استفاده از الگوریتم K-Means انجام شده و با بهره‌گیری از قید هندسی افاین به صورت محلی، دیگر تناظرهای اشتباه ممکن میان تصاویر حذف می‌شوند. نتایج آزمایشات بر روی چند دسته‌ی مختلف از تصاویر برد کوتاه بیانگر عملکرد قابل توجه روش پیشنهادی می‌باشد به طوری که روش پیشنهادی امکان حذف اشتباهات تناظریابی در مواردی که تعداد آنها ۵۰ برابر تعداد تناظرهای صحیح می‌باشد را نیز داراست.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری برد کوتاه، تناظریابی، الگوریتم ASIFT، الگوریتم ژنتیک (GA)، خوشه‌بندی K-Means.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

تنظیریابی، فرآیند تعیین مطابقت میان موقعیت‌های نظیر در دو یا چند تصویر از یک منظره‌ی یکسان است که به عنوان مهمترین پردازش در فتوگرامتری رقومی مطرح می‌باشد [۱]. تنظیریابی نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای در کاربردهای مختلف فتوگرامتری برد کوتاه نظیر مدل‌سازی سه‌بعدی [۲، ۹]، مهندسی معکوس [۱۰]، مرمت و بازسازی آثار باستانی [۱۱] و کنترل کیفیت قطعات صنعتی [۱۰، ۱۲] دارد. امروزه با گسترش فزاینده‌ی انواع مختلف از دوربین‌های رقومی و استفاده‌ی روبرو شدن از تصاویر آنها در فتوگرامتری برد کوتاه، اهمیت اتوماسیون فرآیند تنظیریابی بسیار بیشتر شده‌است.

روش‌های تنظیریابی را به سه دسته‌ی کلی به ترتیب زیر می‌توان دسته‌بندی نمود [۱]:

i. ناحیه‌مبنا

ii. عارضه‌مبنا

iii. تنظیریابی رابطه‌ای

روش‌های ناحیه‌مبنا از معیارهای مختلفی نظیر ضریب همبستگی، تنظیریابی کمترین مربعات، LSM^1 [۱۳] و اطلاعات متقابل 2 [۱۴] درون پنجره‌های با ابعاد یکسان، جهت تنظیریابی استفاده می‌کنند. روش‌های عارضه‌مبنا [۱۵، ۱۷] در ابتدا عوارض مکانی (نقاط، خطوط و نواحی) تصاویر را استخراج کرده و سپس مطابقت میان آنها را با استفاده از خصوصیات‌شان، برقرار می‌کنند. یک عارضه‌ی مناسب برای فرآیند تنظیریابی باید دقت تعیین موقعیت بالایی داشته و مستقل از اعوجاجات هندسی، رادیومتریکی و پایدار در برابر نویز باشد. دسته‌ی سوم، روش‌های رابطه‌ای، از روابط هندسی میان عوارض و ساختارهای تصویر (ترکیب عوارض) جهت تنظیریابی استفاده می‌کنند [۱۸].

در روش‌های ناحیه‌مبنا امکان تنظیریابی با دقت‌های بالا، تا ۰/۱ پیکسل و حتی بیشتر، قابل دستیابی است [۱]. هرچند که اکثر این روش‌ها نیاز به مقدار اولیه مناسب داشته و حساسیت آنها نسبت به اعوجاجات میان

تصاویر نظیر اختلاف مقیاس و دوران، بالا می‌باشد. در مقایسه با روش‌های ناحیه‌مبنا، روش‌های عارضه‌مبنا قابلیت اطمینان بالاتری داشته و در برابر اعوجاجات هندسی و رادیومتریکی عملکرد بهتری دارند. البته به علت جابه‌جایی موقعیت مکانی عوارض در دو تصویر، دقت تنظیریابی در آنها به اندازه‌ی روش‌های ناحیه‌مبنا نبوده و حذف تناظرهای اشتباه در آنها نیز دشوار است [۱۹].

روش‌های رابطه‌ای نیز اگرچه قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به روش‌های ناحیه‌مبنا و عارضه‌مبنا دارند اما دقت تنظیریابی عموماً در آنها محدود بوده و در کاربردهای دقیق مناسب نیستند [۲۰]. استفاده از ترکیب روش‌های فوق راه حلی مناسب جهت غلبه بر نقاط ضعف هر یک از آنها بوده و روش‌های مختلفی نیز بر این اساس در کاربردهای مختلف ارائه شده است [۲۱، ۲۲].

به منظور افزایش دقت بعد سوم در فتوگرامری برد کوتاه، تصاویر عموماً به صورت همگرا اخذ می‌شوند [۲۱]. این مسأله باعث ایجاد اعوجاجات هندسی قابل توجه میان تصاویر شده به طوری که اختلاف مقیاس و دوران میان دو تصویر همگرا در نقاط مختلف آنها متفاوت می‌باشد. علاوه بر این اخذ تصاویر همگرا از منظره‌های متفاوت باعث ایجاد جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع^۳، پنهان‌شدگی و ناپیوستگی‌های قابل توجه در تصاویر می‌شود. این مشکلات فرآیند تنظیریابی اتوماتیک تصاویر همگرا را بسیار دشوار می‌سازد، به طوری که حتی جدیدترین سیستم‌های نرم‌افزاری مدل‌سازی سه بعدی مبتنی بر تصویر نیز به دلیل محدودیت‌های موجود در تنظیریابی تصاویر همگرا، کاملاً اتوماتیک نبوده و احتیاج به بازبینی توسط اپراتورهای انسانی دارند [۱۷].

به منظور انجام کاملاً اتوماتیک اندازه‌گیری‌های موردنیاز در فتوگرامتری برد کوتاه، عموماً از قیدهای مشخصی استفاده می‌شود [۲۳]. استفاده از تارگت‌های بازتابنده مصنوعی^۴ و کنترل کامل شرایط نوری محیط عکسبرداری از مهمترین این قیودها هستند. از نظر تئوری انجام توجیهات فتوگرامتری به صورت کاملاً اتوماتیک و ایجاد مدل سه بعدی مناظر، بدون استفاده از

^۳ Relief

^۴ Retroreflective targets

^۱ Least Square Matching

^۲ Mutual information

که در این تحقیق روشی با قابلیت اطمینان بسیار بالا جهت انتخاب دقیق‌ترین تناظرهای موجود و حذف تمامی تناظرهای اشتباه با استفاده از الگوریتم ASIFT، قید هندسی اپی‌پولار بر مبنای ماتریس بنیادی^۳، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، الگوریتم خوشه‌بندی K-Means و مدل تبدیل افاین ارائه شده‌است. در ادامه در بخش بعدی جزئیات روش پیشنهادی بیان می‌شود.

۲- روش پیشنهادی جهت تناظریابی تصاویر همگرا

الگوریتم پیشنهادی مطابق با شکل ۱ از سه مرحله اصلی تشکیل شده‌است. در مرحله اول تناظرهای اولیه با استفاده از الگوریتم ASIFT تعیین شده و در ادامه در مرحله دوم با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و قید هندسی اپی‌پولار، اغلب تناظرهای اشتباه میان تصاویر حذف شده و در نهایت در بخش سوم با خوشه‌بندی تناظرهای نهایی و استفاده از تبدیل افاین دیگر تناظرهای اشتباه احتمالی حذف شده و تناظرهای نهایی انتخاب می‌شوند. در ادامه در بخش‌های بعدی جزئیات هریک از این مراحل تشریح می‌شود.



شکل ۱- مراحل روش پیشنهادی

۲-۱- الگوریتم ASIFT

ایده‌ی اساسی در الگوریتم ASIFT شبیه‌سازی اعوجاجات حاصل از تغییر جهت محور نوری دوربین نسبت به عارضه، (یعنی تغییر منظر اخذ تصویر) می‌باشد. در شکل یک صفحه‌ی تصویری از یک منظره نشان داده شده‌است. بر اساس هندسه‌ی مورد استفاده در الگوریتم ASIFT، زوایای ϕ و θ ، بیانگر امتداد محور نوری دوربین و توصیف‌کننده‌ی منظر اخذ تصویر

قیده‌های بیان شده و استفاده تنها از تصاویر غیر ممکن نیست اما به دلیل مشکلات بیان شده بسیار دشوار می‌باشد [۲۳].

Zhu و همکاران [۲۴]، به منظور انجام تناظریابی با قابلیت اطمینان بالا در تصاویر برد کوتاه از قید مبتنی بر مثلث‌بندی تصویر^۱ استفاده کرده‌اند. در این روش در ابتدا فرآیند مثلث‌بندی میان چند تناظر اولیه (به عنوان مثال نقاط حاصل از توجیه نسبی تصاویر) انجام شده و در ادامه با افزایش تعداد نقاط متناظر و به روز رسانی مثلث‌بندی، فرآیند تناظریابی انجام می‌شود. در نهایت آنالیز سازگاری در فضای عارضه به منظور حذف تناظرهای اشتباه احتمالی انجام می‌شود. روش‌های دیگری نیز جهت انجام تناظریابی در تصاویر برد کوتاه ارائه شده‌اند اما اکثر آنها نیازمند اطلاع از وضعیت توجیه میان تصاویر دارند [۷].

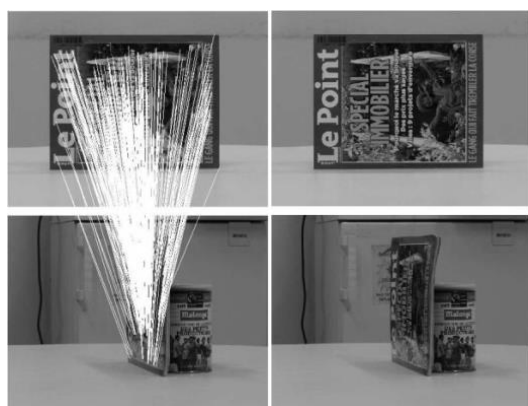
الگوریتم SIFT^۲ [۲۵] یک روش تناظریابی عارضه‌مبنا بوده و اساساً برای حل مسأله‌ی اختلاف مقیاس میان تصاویر طراحی شده‌است. این الگوریتم مستقل از اختلاف مقیاس و دوران یکنواخت میان تصاویر بوده و در برابر اختلافات روشنایی، تغییر شکل ناشی از تغییر منظر اخذ تصویر و نویز نیز پایدار است. با توجه به عملکرد بالای این الگوریتم اخیراً از آن جهت تناظریابی تصاویر ماهواره‌ای نیز استفاده شده‌است [۲۶، ۳۳]. اما این الگوریتم در تناظریابی تصاویر همگرا به دلیل مشکلات بیان شده با محدودیت مواجه می‌باشد [۳۴]. الگوریتم Affine-SIFT (ASIFT) [۳۵، ۳۶]، نسخه بهبود داده شده‌ای از الگوریتم SIFT می‌باشد که جهت تناظریابی تصاویر مستقل از تغییر شکل افاین ارائه شده‌است. الگوریتم ASIFT تعداد قابل توجهی از نقاط متناظر را در میان تصاویر همگرا استخراج می‌کند اما اغلب تعداد زیادی تناظر اشتباه نیز در میان آنها وجود دارد که حذف آنها بسیار دشوار است [۳۷].

در این تحقیق روشی کاملاً اتوماتیک جهت تناظریابی تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه ارائه شده‌است. همانطور که بیان شد مشکل اصلی روش‌های عارضه‌مبنا در تناظریابی این تصاویر وجود تناظرهای اشتباه می‌باشد

^۱ Self-adaptive triangle constraint

^۲ Scale Invariant Feature Transform

^۳ Fundamental Matrix



شکل ۴- نتیجه الگوریتم ASIFT برای دو تصویر همگرا [۳۵].

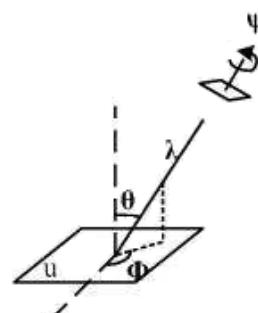
شکل نتیجه استفاده از الگوریتم ASIFT را برای یک تصویر برد کوتاه نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با وجود اینکه اختلاف منظر میان تصاویر بسیار متفاوت می‌باشد اما الگوریتم به صورت کاملاً موفقیت آمیز عمل کرده‌است. قابل ذکر است که برای این تصاویر الگوریتم استاندارد SIFT حتی یک تناظر صحیح نیز استخراج نکرده‌است [۳۵]. مشکل الگوریتم ASIFT، امکان وقوع تعداد قابل‌توجهی از تناظرهای اشتباه می‌باشد [۳۸]، که با توجه به ماهیت پیچیده تصاویر برد کوتاه، اجتناب ناپذیر است. در بخش‌های بعدی روشی کارآمد برای حذف تناظرهای اشتباه در این تحقیق ارائه می‌شود.

۲-۲- قید هندسی اپی‌پولار

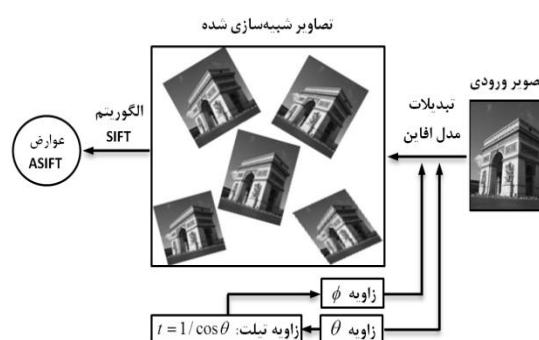
هندسه‌ی اپی‌پولار، یک قید اساسی است که برای تصاویر اخذ شده از منظرهای مختلف مطرح می‌باشد. مطابق شکل دو صفحه‌ی تصویری برای دو دوربین با مراکز تصویری O_1 و O_2 نشان داده شده‌اند. تصویر نقطه‌ی زمینی P در دو تصویر، نقاط p و q بوده و صفحه‌ی گذرنده از این نقاط و مراکز تصویر با عنوان صفحه‌ی اپی‌پولار π_p تعریف می‌شود. خطوط l_p و l_q خطوط اپی‌پولار نامیده می‌شوند. مطابق با قید هندسه‌ی اپی‌پولار، نقطه‌ی متناظر با نقطه p فقط می‌تواند بر روی خط اپی‌پولار l_p قرار گرفته باشد و برعکس [۳۹].

می‌باشند. ϕ و θ به ترتیب به عنوان زوایای طولی^۱ و عرضی^۲ در نظر گرفته می‌شوند. زاویه ψ به عنوان زاویه چرخش محور نوری دوربین حول خود و λ نیز به عنوان پارامتر مقیاس در نظر گرفته می‌شود [۳۵].

در الگوریتم ASIFT جهت شبیه‌سازی تصاویر از منظرهای مختلف، زاویه‌ی ϕ متناسب با زاویه‌ی θ و با گام‌های $\Delta\phi = 72^\circ/t$ که در آن t زاویه تیلت و برابر $t = 1/\cos\theta$ است، تغییر داده می‌شود. قابل ذکر است که محدوده‌ی این زوایا به ترتیب مربوط به $\phi \in [0, \pi)$ و $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ می‌باشد [۳۵]. بنابراین مطابق با شکل، با در نظر گرفتن حالت‌های مشخص و محدودی از زوایای دورانی، تصاویر یک عارضه از منظرهای مختلف شبیه‌سازی می‌شود. در ادامه برای هر یک از تصاویر شبیه‌سازی شده، فرآیند استخراج عوارض و ایجاد توصیفگر با استفاده از الگوریتم استاندارد SIFT انجام می‌شود. این فرآیند برای هریک از تصاویر مبنا و ورودی انجام شده و در نهایت فرآیند تناظریابی میان آنها انجام می‌گیرد.



شکل ۲- هندسه تصویر در الگوریتم ASIFT [۳۵].



شکل ۳- فرآیند استخراج عوارض در الگوریتم ASIFT.

^۱ Longitude angle

^۲ Latitude angle

این جمله هستند. الگوریتم‌های LMedS و MSAC در مواقعی که تعداد اشتباهات کم می‌باشند استفاده شده و در مواقعی که تعداد اشتباهات بیشتر می‌باشد عموماً از الگوریتم RANSAC استفاده می‌شود.

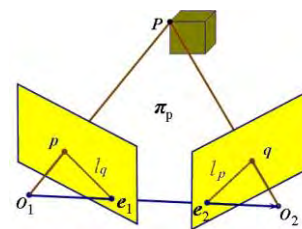
الگوریتم RANSAC روشی جهت برازش یک مدل هندسی می‌باشد که تعدادی اشتباه نیز در میان نقاط مربوط به مدل وجود دارد [۴۲]. فرض کنید مدل هندسی مورد نظر دارای u پارامتر مجهول بوده و تعداد حداقل m متناظر از میان n متناظر موجود (که $n > m$) برای برآورد آن لازم است (در اینجا ۸ متناظر برای برآورد ماتریس بنیادی مورد نیاز است)، آنگاه در الگوریتم RANSAC به ترتیب زیر برای برآورد پارامترهای مجهول عمل می‌شود:

- i. تعداد m جفت از میان n جفت موجود به صورت تصادفی انتخاب می‌شود.
- ii. با استفاده از m جفت تناظرهای انتخاب شده، پارامترهای مجهول مدل هندسی برآورد می‌شود.
- iii. سازگاری $n-m$ جفت تناظر باقیمانده با مدل هندسی برآورد شده، بررسی شده و تعداد جفت تناظرهایی که با آن سازگار هستند، k با در نظر گرفتن یک حد آستانه برای سازگاری، تعیین می‌شوند.
- iv. مراحل ۱ تا ۳، k مرتبه تکرار شده و در نهایت راه حلی که بیشترین تعداد جفت تناظرهای سازگار با مدل هندسی را حاصل کند، به عنوان جواب انتخاب می‌شود.

بعد از برآورد ماتریس F با استفاده از الگوریتم RANSAC، برای هر جفت تناظر اولیه نظیر (p, q) فاصله‌ی آنها از خط اپی‌پولارشان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$d_q = \frac{|\tilde{q}^T F \tilde{p}|}{\sqrt{(F\tilde{p})_1^2 + (F\tilde{p})_2^2}} \quad (3)$$

که در آن $(F\tilde{p})_i$ ، i آمین مؤلفه از بردار $(F\tilde{p})$ است. به طور مشابه فاصله‌ی نقطه‌ی p از خط اپی‌پولار l_q نیز قابل محاسبه است. در صورتی که ماکزیمم مقدار این



شکل ۵- قید هندسی اپی‌پولار

هندسه‌ی اپی‌پولار با استفاده از یک ماتریس 3×3 با عنوان ماتریس بنیادی، F ، قابل توصیف می‌باشد. ماتریس F مطابقت میان یک نقطه و خط اپی‌پولار مربوط به آن را توصیف کرده و میان این ماتریس و موقعیت عوارض نظیر در دو تصویر، رابطه‌ی ۱ برقرار است:

$$\tilde{p}^T F \tilde{q} = 0 \quad (1)$$

که در آن $\tilde{p} = [x, y, 1]$ و $\tilde{q} = [x', y', 1]$ می‌باشند. اگر n بیانگر تعداد نقاط نظیر میان دو تصویر در مجموعه $\{(p_i, q_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ باشد آنگاه مطابق با قید هندسی اپی‌پولار خواهیم داشت [۳۹]:

$$U_i^T f + f_{33} = 0 \quad (2)$$

که در آن

$$U_i = [x_i x'_i, y_i x'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, y'_i, x_i, y_i, 1]^T$$

$$f = [f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}, f_{31}, f_{32}]^T$$

ماتریس F با استفاده از ۸ نقطه‌ی متناظر در تصاویر قابل برآورد می‌باشد [۳۹].

همانطور که بیان شد در روش‌های تناظریابی عارضه‌مبنا عموماً تعدادی تناظر اشتباه وجود دارد. به منظور تعیین و حذف این تناظرها، سازگاری آنها با قید هندسی خط اپی‌پولار بررسی شده و عوارضی که دقت مناسبی نداشته باشند، حذف می‌شوند. برای این منظور الگوریتم‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. الگوریتم‌های LMedS [۴۰]، MSAC [۴۱] و RANSAC [۴۲] از

^۱ Least Median of Squares

^۲ M-estimator SAmple Consensus

^۳ RANdom SAmple Consensus

فواصل از یک مقدار آستانه، T_E ، بیشتر باشد آنگاه جفت تناظر (p, q) اشتباه بوده و حذف می‌شوند.

جستجوی کامل در الگوریتم RANSAC و انتخاب تمام ترکیبات m تایی ممکن از میان n مجموعه‌ی موجود بسیار بسیار زمانبر می‌باشد (تعداد کل حالات برابر $n!/[m!(n-m)!]$ می‌باشد)، به عنوان مثال اگر تنها ۱۰۰ تناظر داشته باشیم آنگاه تمامی ترکیبات ممکن برابر (1.8609×10^{11}) می‌باشد. برای همین منظور تنها k تا ترکیب مختلف به صورت تصادفی انتخاب شده و بررسی می‌شود. علاوه بر زمانبر بودن این فرآیند این احتمال وجود دارد که هیچ ترکیب درستی در k تکرار یافت نشده و الگوریتم به جواب نیز نرسد. احتمال این مسأله با افزایش تعداد کل تناظرهای انتخاب شده، تعداد تناظرهای اشتباه میان آنها و همچنین افزایش تعداد پارامترهای مجهول مسأله به شدت افزایش می‌یابد.

به علاوه در الگوریتم RANSAC هیچ استفاده‌ای از اطلاعات حاصل از تکرارهای قبلی نشده و الگوریتم سیر همگرایی ندارد. نسخه‌های مختلفی از بهبود الگوریتم RANSAC ارائه شده‌است. به عنوان مثال الگوریتم PROSAC^۱ [۴۳] از اطلاعات سازگاری در تکرارهای مختلف بهره می‌گیرد. الگوریتم MDSAC^۲ [۴۴] از معیار ماکزیمم مجموع مربعات فواصل استفاده می‌کند. به طور کلی الگوریتم‌ها مبتنی بر RANSAC تنها زمانی که حدود ۵۰٪ از تناظرهای موجود صحیح هستند به جواب مناسب می‌رسند [۲۵]. در تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه احتمال وقوع تناظرهای اشتباه در بعضی از تصاویر ممکن است بیشتر از این مقدار باشد و به علاوه جهت کاهش پیچیدگی محاسباتی نیاز به الگوریتم‌های کارآمدتری می‌باشد. در این تحقیق جهت برآورد ماتریس بنیادی و برآورد خط اپی‌پولار از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده می‌شود.

۲-۳- برآورد قید هندسی اپی‌پولار با استفاده از الگوریتم ژنتیک

الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بر پایه اصل تکامل^۳ پایداری بهترین‌ها و نظریه تکامل تدریجی داروین استوار است [۴۵، ۴۶]. پارامترهای ورودی روش پیشنهادی در این قسمت مجموعه تناظرها اولیه، $A = \{(p_i, q_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ ، بوده و خروجی الگوریتم نیز تناظرهای پالایش شده می‌باشد که در آن تناظرهایی که فاصله آنها از خط اپی‌پولار نظیرشان بیشتر از یک مقدار آستانه می‌باشد، حذف شده‌اند. جهت حل یک مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک اجزای اساسی آن شامل روش کدگذاری، تابع هزینه، روش انتخاب، آمیزش^۴ و جهش، لازم است تعریف شود که در ادامه در این قسمت بیان می‌شود:

- **کدگذاری کروموزوم:** در الگوریتم ژنتیک کروموزوم‌ها از تعدادی ژن تشکیل شده و در هر مرحله یکسری از جواب مسأله را شامل می‌شوند. تعداد کروموزوم‌ها، N_{Pop} ، و تعداد ژن‌های هر کروموزوم، N_{Var} ، بستگی به پیچیدگی و نوع مسأله دارد. با توجه به اینکه جهت برآورد ماتریس بنیادی به حداقل ۸ جفت نقطه موردنظر نیاز است، هر کروموزوم بصورت ترکیبی از ۸ ژن در نظر گرفته می‌شود که در آن هر ژن بیانگر یک عدد صحیح مثبت غیر تکراری بین ۱ تا n می‌باشد (شکل ۶). عدد مربوط به هر ژن کروموزوم بیانگر اندیس جفت تناظر مربوطه از مجموعه A می‌باشد.

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

شکل ۶- ساختار کروموزوم

- **تابع هزینه:** اصلی‌ترین قسمت برای نیل به جواب مطلوب با الگوریتم ژنتیک، تعریف صحیح تابع هزینه می‌باشد. به منظور برآورد تابع هزینه برای هر یک کروموزوم نظیر $a = \{I_1, I_2, \dots, I_8\}$ متشکل از ۸ جفت نقطه نظیر از مجموعه A ، در ابتدا ماتریس بنیادی، F ، با استفاده از رابطه ۲ برآورد شده و در ادامه فاصله تمام نقاط متناظر از مجموعه A ، از خط اپی‌پولار نظیرشان، d_i ، با استفاده از رابطه ۳

^۳ Survival Of Fitness

^۴ Matting

^۱ PROgressive Sample Consensus

^۲ Maximum sum-squared Distance Sample Consensus

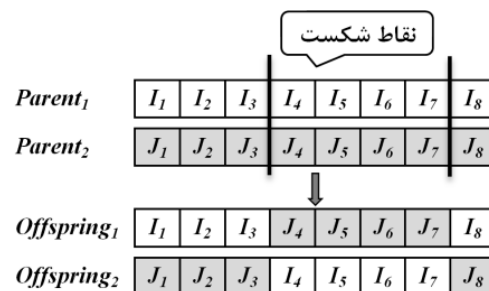
محاسبه می‌شود. در نهایت تابع هزینه با استفاده از رابطه ۴ برآورد می‌شود:

$$Cost = - \sum_{i=1}^n w_i \quad (4)$$

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{if } d_i < T_E \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}$$

که در آن n تعداد کل تناظرها و T_E نیز یک مقدار آستانه می‌باشد. واضح است که در صورتی که مقدار d_i برای هر جفت نقطه متناظر کوچکتر از T_E باشد به عنوان یک تناظر درست تلقی می‌شود.

- **انتخاب:** در این مرحله باید از میان جمعیت اولیه، کروموزوم‌هایی برای تولید نسل بعد انتخاب شوند. برای این منظور در این تحقیق از روش انتخاب چرخ رولت^۱ استفاده می‌شود. در این روش کروموزوم‌ها با تابع هزینه کمتر شانس بیشتری را برای شرکت در تولید فرزندان داشته ولی به کروموزوم‌ها با هزینه بیشتر هم شانس انتخاب داده می‌شود.



شکل ۷- روش جابجایی دو نقطه‌ای

- **آمیزش:** عملگر آمیزش در الگوریتم ژنتیک نقشی اساسی در همگرایی و رسیدن به نقطه بهینه دارا می‌باشد. با اعمال عملگر آمیزش بر روی کروموزوم‌هایی که در مرحله قبل انتخاب شده‌اند، کروموزوم‌های جدید به عنوان جمعیت فرزندان تولید می‌گردد. برای این منظور در این تحقیق از الگوریتم جابجایی دو نقطه‌ای^۲ استفاده می‌شود. مطابق شکل، ابتدا دو کروموزوم والد از دو نقطه (که به طور تصادفی تعیین می‌شود) شکسته

می‌شوند، سپس قسمت‌های متناظر در دو کروموزوم به صورت یک در میان تعویض می‌گردند، تا دو کروموزوم جدید بوجود آید.

- **جهش:** در الگوریتم ژنتیک تغییر تصادفی مقدار یک ژن در هر کروموزوم جهش نامیده می‌شود. جهش جهت جلوگیری از همگرا شدن سریع جمعیت به یک مقدار و توقف در نقاط بهینه محلی و ایجاد تنوع در عناصر جمعیت استفاده می‌گردد. جهش با نرخ μ اعمال می‌گردد. اگر N_{Pop} تعداد جمعیت اولیه و N_{Var} تعداد ژن‌های هر کروموزوم (در اینجا ۸) باشد آنگاه عمگر جهش بر روی μ درصد از $N_{Pop} \times N_{Var}$ ژن‌های موجود با انتخاب تصادفی انجام می‌شود.

مراحل انجام الگوریتم ژنتیک در این تحقیق به ترتیب زیر می‌باشد:

- در ابتدا تعداد N_{Pop} کروموزوم به صورت تصادفی به عنوان جمعیت اولیه تولید شده و میزان تابع هزینه برای آنها محاسبه می‌شود.
- از میان کروموزوم‌ها، تعداد $N_{Keep} = X_{Rate} \times N_{Pop}$ عدد از آنها که دارای کمترین تابع هزینه هستند، در نظر گرفته می‌شود، که در آن X_{Rate} نرخ انتخاب می‌باشد. سپس از میان کروموزوم‌های انتخاب شده، کروموزوم‌های والد با استفاده از روش چرخ رولت انتخاب می‌شوند.
- عملگرهای آمیزش و جهش جهت ایجاد کروموزوم‌های جدید انجام می‌شود.
- میزان تابع هزینه برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود.

- شرط توقف بررسی شده و در صورت برقرار نبودن، مراحل ۲ تا ۵ مجدداً تکرار می‌شود در غیر این صورت بهترین کروموزوم در نسل آخر به عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود.

بدین ترتیب بعد از انجام الگوریتم ژنتیک ماتریس بنیادی و قید هندسی اپی‌پولار میان تصاویر برآورد می‌شود. بعد از این مرحله فرآیند برآورد ماتریس بنیادی یکبار دیگر با استفاده از تمام نقاط صحیح سازگار با قید اپی‌پولار حاصل از الگوریتم ژنتیک برآورد شده و تناظرهای پالایش شده‌ی نهایی انتخاب می‌شوند.

^۱ Roulette wheel

^۲ Two-Point Crossover

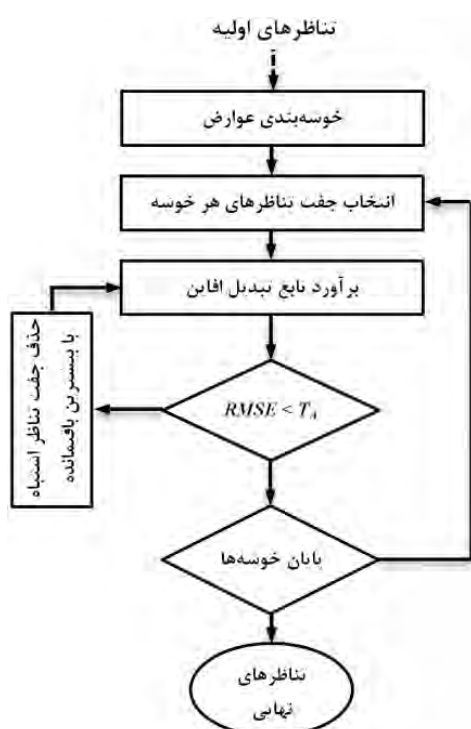
۴-۲- خوشه بندی و پالایش نهایی نقاط

در میان تناظرهای پالایش شده حاصل از مرحله قبل، همچنان ممکن است تعداد ناچیزی از تناظرهای اشتباه نیز وجود داشته باشند. دلیل این مسأله نوع قید هندسی خطابی-پولار می باشد که تنها از فاصله نقاط از یک خط استفاده کرده و نقاط اشتباهی نیز که در فاصله نزدیکی از این خط قرار داشته باشند ممکن است به عنوان درست انتخاب شوند [۴۷].

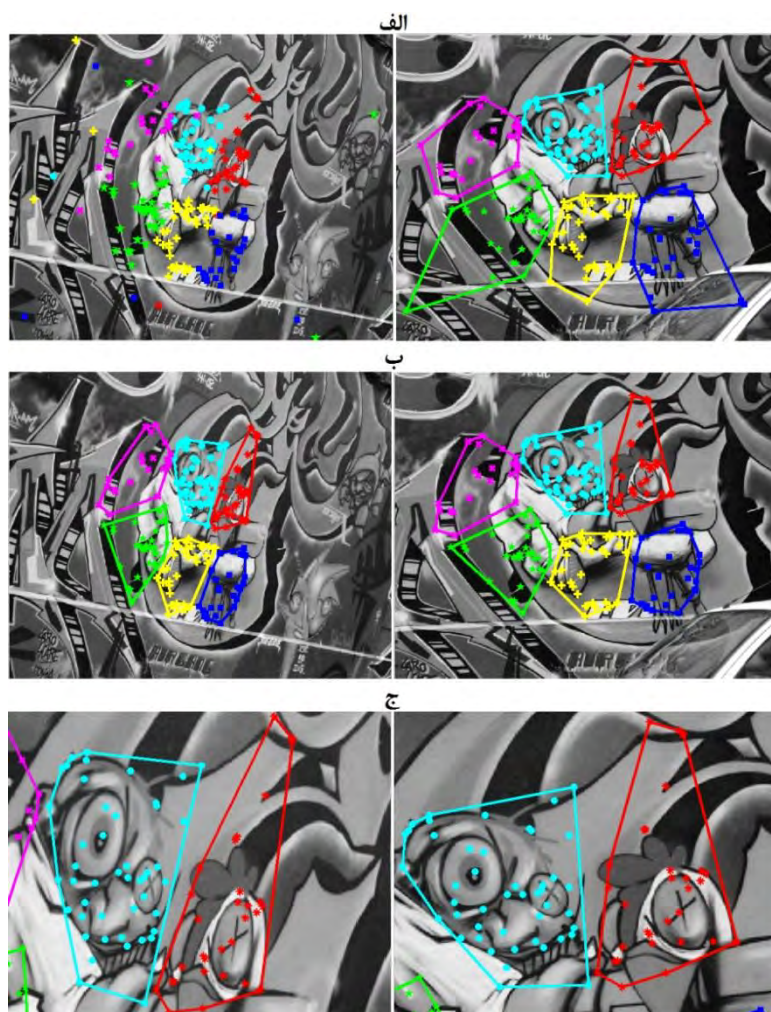
در این مرحله از یک روش جدید بر مبنای خوشه بندی عوارض و تابع تبدیل افاین جهت شناسایی و حذف این تناظرهای اشتباه احتمالی استفاده می شود. در این روش از این مسأله استفاده می شود که اعوجاجات هندسی در تصاویر حاصل از تغییر منظر، به صورت محلی با استفاده از یک تبدیل افاین صفحه ای قابل مدل کردن می باشد [۴۸]. برای این منظور مجموعه ی تناظرهای حاصل از مرحله قبل به وسیله الگوریتم خوشه بندی K-Means [۵۳]، به دسته های مختلف تقسیم بندی شده و برای هر دسته، از سازگاری تناظرهای آن در مدل هندسی افاین استفاده می شود تا اندک تناظرهای اشتباه احتمالی نیز حذف شوند. الگوریتم K-Means یکی از روش های شناخته شده ی خوشه بندی است که بر اساس کمترین فاصله های هر داده از مرکز یک خوشه، خوشه بندی را انجام می دهد.

شکل فرآیند حذف تناظرهای اشتباه را بر اساس خوشه بندی و تبدیل افاین نشان می دهد. برای این منظور در ابتدا فرآیند خوشه بندی تناظرهای اولیه در فضای تصویر مبنا انجام می شود (شکل -الف). در ادامه برای هر دسته پارامترهای یک مدل افاین با استفاده از روش کمترین مربعات محاسبه می شود. سپس نقاط در تصویر ورودی با استفاده از پارامترهای این تابع به فضای تصویر مبنا منتقل شده و میزان فاصله ی آنها از نقاط نظیرشان در تصویر مبنا، به عنوان خطای هر جفت تناظر، در نظر گرفته می شود. ریشه ی میانگین مربعات، $RMSE$ ، این فواصل، به عنوان معیاری از دقت تعیین تابع تبدیل میان دو تصویر در دسته ی مربوطه، برآورد

می شود. بعد از برآورد پارامترهای تبدیل، مقدار $RMSE$ محاسبه شده و با یک مقدار آستانه، T_A ، مقایسه می شود، اگر بیشتر از آن باشد، جفت تناظری که دارای بیشترین خطا هستند، اشتباه تلقی شده و حذف می شوند و این روند تا رسیدن به مقدار آستانه مورد نظر، تکرار می گردد. بعد از اتمام فرآیند حذف اشتباهات برای هر دسته، یک دسته ی دیگر انتخاب شده و عملیات مجدداً تکرار می شود تا تمامی دسته های مربوطه بررسی شوند. پارامتر اساسی در الگوریتم k-Means تعداد خوشه ها، k ، می باشد که در روش پیشنهادی تعداد آن با استفاده از نسبت مساحت متوسط در نظر گرفته شده برای یک دسته، A_m ، و مساحت پلیگون مربوط به محدوده ی تناظرهای اولیه، A_t ، محاسبه می شود. شکل یک مثال از فرآیند حذف اشتباهات به روش پیشنهادی را نشان می دهد. در این مثال تعداد ۲۲۰ تناظر میان تصاویر وجود دارد که ۲۰ جفت از آنها اشتباه هستند. با استفاده از روش پیشنهادی تمامی این ۲۰ اشتباه حذف شده اند.



شکل ۸- خوشه بندی و حذف تناظرهای اشتباه



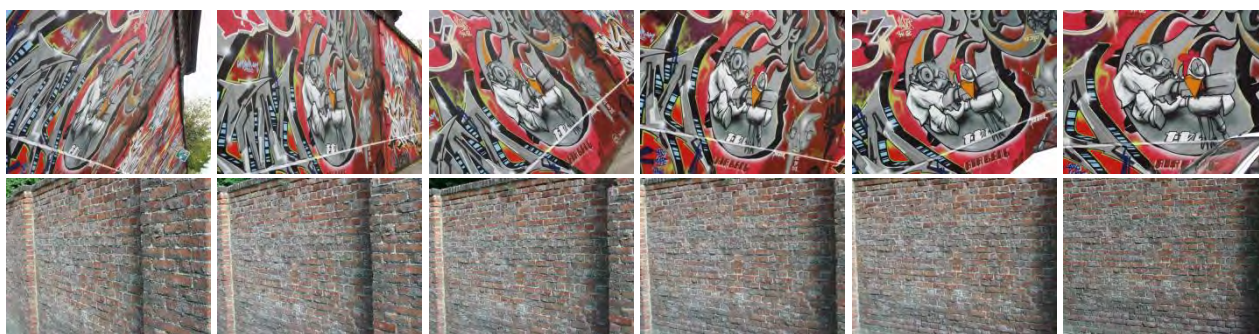
شکل ۹- حذف تناظرهای اشتباه به روش خوشه‌بندی و تبدیل افاین محلی، الف) خوشه‌بندی اولیه در حضور اشتباهات، ب) دسته‌های نهایی با حذف تناظرهای اشتباه ج) نمایش نزدیک دو دسته

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از دو دسته از تصاویر مرجع به ترتیب زیر استفاده شده‌است:

- **تصاویر Mikolajczyk**: Mikolajczyk و همکاران [۴۸، ۴۹] جهت ارزیابی الگوریتم‌های استخراج و تناظریابی عوارض، دسته‌های مختلفی از تصاویر متوالی را ارائه کرده‌اند که در آنها تابع تبدیل پروژکتیو میان تصاویر با دقت مناسبی معلوم می‌باشد [۵۰]. دو دسته تصویر «Graffiti» و «Wall» (شکل) که هر کدام متشکل از شش تصویر از شش منظر متفاوت هستند، در این قسمت جهت ارزیابی روش پیشنهادی استفاده می‌شوند.

- **تصاویر Cech**: Cech و همکاران [۵۱] اخیراً دسته‌های دوتایی از تصاویر مختلف را جهت ارزیابی روش پیشنهادی خود ارائه کرده‌اند که در آن تعداد قابل‌توجهی از تناظرهای صحیح میان تصاویر معلوم می‌باشد [۵۲]. دو جفت از تصاویر این دسته‌داده (شکل) جهت ارزیابی روش پیشنهادی در این قسمت مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در تمامی تصاویر انتخاب شده تبدیل هندسی میان تصاویر معلوم بوده و یا قابل برآورد می‌باشد لذا امکان ارزیابی تناظرهای حاصل از روش پیشنهادی در هر مرحله قابل انجام می‌باشد.



شکل ۱۰- تصاویر Mikolajczyk، بالا: ۶ تصویر متوالی مربوط به دسته داده Graffiti، پایین: ۶ تصویر متوالی مربوط به دسته داده Wall

بر الگوریتم ژنتیک جهت شناسایی و حذف این اشتباهات استفاده می‌شود. به منظور مقایسه از سه روش L_{MedS} [۴۰]، $MSAC$ [۴۱] و $RANSAC$ [۴۲] نیز استفاده می‌شود. هر سه این روش‌ها جهت برآورد قید هندسی اپی‌پولار و در حضور اشتباهات طراحی شده‌اند. نسبت تناظرهای اشتباه به تناظرهای صحیح، γ ، از ۰ تا ۵۰ (۰ تا ۱۰۰۰۰ تناظر اشتباه) تغییر داده شده و در هر تغییر تعداد تناظرهایی که به عنوان تناظرهای صحیح توسط الگوریتم شناسایی شده، N_{Match} ، و تعداد تناظرهایی که واقعاً صحیح هستند، $N_{Correct}$ ، اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۱۱- تصاویر Cech، بالا: تصویر Head، پایین: تصویر Zleby

۳-۱- برآورد قید اپی‌پولار با الگوریتم ژنتیک

قبل از ارزیابی کامل روش پیشنهادی لازم است عملکرد الگوریتم ژنتیک در برآورد ماتریس بنیادی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور تصاویر اول و سوم از دسته‌داده Graffiti انتخاب شده و تعداد ۲۰۰ تناظر صحیح در آنها با استفاده از تابع تبدیل معلوم میان تصاویر و بهره‌گیری از الگوریتم ASIFT تعیین می‌شود. لازم به یادآوری است که تصاویر Graffiti مربوط به یک عارضه مسطح (دیوار) بوده و ارتباط هندسی میان آنها به طور کامل با استفاده از یک تبدیل پروژکتیو قابل بیان می‌باشد [۴۹] که ضرایب این تبدیل با استفاده از یک روش دقیق توسط Mikolajczyk و همکاران تعیین شده و در دسترس می‌باشند [۵۰].

بدین ترتیب برای دو تصویر تعداد ۲۰۰ تناظر دقیق معلوم می‌باشد (میزان RMSE این نقاط در تابع تبدیل معلوم میان تصاویر ۰/۵ پیکسل می‌باشد). حال در حالت‌های مختلف، تعداد مشخصی از تناظرهای غلط را به این مجموعه اضافه کرده و از روش پیشنهادی مبتنی

جهت پیاده‌سازی الگوریتم‌های L_{MedS} ، $MSAC$ و $RANSAC$ از نرم افزار MATLAB R2009a استفاده شد. تعداد تکرارها برای هریک از سه روش فوق برابر ۵۰۰۰ تکرار انتخاب شد. پارامترهای الگوریتم ژنتیک جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی نیز به ترتیب زیر انتخاب شدند. جمعیت اولیه، N_{Pop} ، برابر ۵۰، نرخ انتخاب، X_{Rate} ، برابر ۰/۵، نرخ جهش، μ ، برابر ۰/۱ و ماکزیمم تعداد تکرارهای الگوریتم برابر ۱۰۰۰ و شرط توقف الگوریتم به این صورت در نظر گرفته شد که الگوریتم حداقل ۲۰۰ تکرار را سپری کرده و بعد از آن بهترین جواب در ۲۰۰ تکرار متوالی تغییر نداشته باشد. قابل ذکر است که برای تمامی چهار روش فوق میزان آستانه مربوط به فاصله نقطه از خط اپی‌پلار، T_E ، برابر ۱ پیکسل انتخاب شد. در واقع تناظرهایی به عنوان تناظر صحیح انتخاب می‌شوند که میزان فاصله آنها از خط اپی‌پولار نظیرشان کمتر از ۱ پیکسل باشد.

جدول ۱ نتایج ارزیابی انجام شده را برای تمامی الگوریتم‌ها نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود

روش پیشنهادی امکان حذف ۱۰۰۰۰ تناظر غلط را در میان تنها ۲۰۰ تناظر صحیح دارا می‌باشد که بسیار قابل توجه می‌باشد. نکته قابل توجه وجود تعدادی تناظر اشتباه در میان تناظرهای انتخاب شده توسط هر الگوریتم می‌باشد که بیانگر نقص قید هندسی ای‌پی‌ولار در حذف تمامی اشتباهات بوده و لزوم استفاده از یک روش ثانویه برای حذف اشتباهات باقیمانده را مشخص می‌نماید.

تا زمانی که تعداد تناظرهای اشتباه کمتر از تعداد تناظرهای صحیح می‌باشد ($\gamma < 1$)، تمامی الگوریتم‌ها جواب خوبی ارائه داده و تمامی تناظرهای صحیح میان نقاط را شناسایی می‌کنند. برای $1 < \gamma < 3$ روش LMedS دیگر قادر به یافتن تناظرهای صحیح نمی‌باشد. روش‌های MSAC و RANSAC نیز بخشی از تناظرهای صحیح را شناسایی می‌کنند اما همچنان روش پیشنهادی به طور کامل تمامی تناظرهای صحیح را شناسایی می‌کند. با افزایش تعداد تناظرهای اشتباه ($\gamma > 3$) این تنها روش پیشنهادی است که قادر به یافتن تناظرهای صحیح می‌باشد.

جدول ۱- نتایج الگوریتم‌های LMedS، MSAC، RANSAC و روش پیشنهادی (ژنتیک) در حذف تناظرهای اشتباه با نسبت‌های مختلف

الگوریتم	$\gamma=0.05$	$\gamma=0.5$	$\gamma=1$	$\gamma=1.5$	$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=5$	$\gamma=10$	$\gamma=50$
LMedS	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۳	۵۱	۳۹	۱۶	۲۵	۱۵	۱۸
	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch
MSAC	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۷	۶	۰	۰	۰	۰
	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect
RANSAC	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۴	۱۹۱	۱۱۷	۸۴	۲۱	۱۹	۱۴
	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch
ژنتیک	۲۰۰	۲۰۱	۲۰۴	۲۰۵	۱۲۶	۹۳	۳۵	۳۲	۲۸
	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect
	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۲	۲۰۲	۲۰۵	۲۰۴	۲۰۷	۲۱۵	۲۲۰
	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch	NMatch
	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect	NCorrect

$RMSE$ مربوط به حذف اشتباهات در مدل افاین هر دسته، T_A ، نیز برابر ۳ پیکسل انتخاب شده‌است.

فرآیند تناظریابی با استفاده از روش پیشنهادی برای تصاویر مورد استفاده انجام شده و تعداد تناظرهای صحیح حاصل به عنوان معیاری از میزان قابلیت روش بیان می‌شود. جهت تعیین تعداد تناظرهای صحیح و دقت تناظرهای حاصل، برای دو دسته تصاویر مورد استفاده Mikolajczyk و Cech، به دو طریق مختلف عمل می‌شود. در دسته داده‌ی Mikolajczyk تابع تبدیل پروژکتیو میان تصاویر معلوم می‌باشد. بعد از اینکه فرآیند تناظریابی با استفاده از روش پیشنهادی انجام شد، سازگاری آنها را در مدل تبدیل پروژکتیو معلوم میان تصاویر بررسی کرده و تعداد تناظرهایی که میزان باقیمانده‌ی آنها کمتر از ۱/۵ پیکسل هستند، N_{Match} ، به عنوان تناظرهای صحیح شمارش می‌شوند. به علاوه ریشه میانگین مجموع مربعات باقیمانده‌های تمامی تناظرها، $RMSE_M$ ، به عنوان دقت تناظریابی در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲- ارزیابی کامل روش پیشنهادی

در این بخش نتایج ارزیابی روش پیشنهادی در تناظریابی تصاویر برد کوتاه ارائه می‌شود. به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی از نرم افزار MATLAB R2009a استفاده شده و با بهره‌گیری از کد توسعه داده شده توسط نویسندگان الگوریتم ASIFT [۵۴]، تمامی مراحل آن مطابق با جزئیات بیان شده در بخش قبل برنامه‌نویسی شده‌است.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک در این قسمت نیز مشابه پارامترهای بیان شده در بخش قبلی بوده و دیگر پارامترها به ترتیب زیر در نظر گرفته شده‌است. پارامترهای الگوریتم ASIFT برابر مقادیر پیشنهادی توسط نویسندگان آن انتخاب شده است [۵۴]. مقدار آستانه مربوط به فاصله نقطه از خط ای‌پی‌ولار، T_E ، برابر ۱ پیکسل انتخاب شده و مساحت متوسط در نظر گرفته شده برای یک دسته، A_m ، مساحت دایره‌ای به شعاع ۱۰۰ پیکسل در نظر گرفته شده‌است. مقدار آستانه

به منظور مقایسه روش پیشنهادی از الگوریتم Harris-SIFT [۲۷] استفاده شده و تمامی آزمایشات فوق برای این الگوریتم نیز تکرار می‌شود. در این روش عوارض گوشه‌ای حاصل از اپراتور Harris در یک ساختار هرمی و با توزیع مناسب استخراج شده و سپس توصیفگر استاندارد SIFT برای آنها ایجاد می‌شود. در نهایت فرآیند تناظریابی میان عوارض در دو تصویر انجام شده و از سازگاری آنها در یک مدل تبدیل پروژکتیو جهت حذف تناظرهای اشتباه استفاده می‌شود.

جدول ۲ نتایج تناظریابی حاصل از روش پیشنهادی و الگوریتم Harris-SIFT را برای تمامی تصاویر نشان می‌دهد. در تصاویر مربوط به Mikolajczyk شامل Wall و Graffiti که هر کدام شامل ۶ تصویر متوالی می‌باشند، فرآیند تناظریابی میان تصاویر اول هر دسته با پنج تصویر دیگر که تابع تبدیل معلوم میان آنها در دسترس می‌باشد، انجام شده‌است که با شماره‌های مربوط به تصاویر در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

همانطور که ملاحظه می‌شود روش پیشنهادی در تمامی تصاویر مورد ارزیابی تعداد قابل توجهی از تناظرها را با دقت بالایی استخراج نموده‌است. برای تصاویر Graffiti در حالت‌های ۱-۲ تا ۱-۴ و برای تصاویر Wall در حالت‌های ۱-۲ تا ۱-۵ که میزان اعوجاجات هندسی تصاویر در آنها قابل توجه نیست، الگوریتم Harris-SIFT نیز تعداد تناظرهای مناسبی را با دقت مناسبی استخراج نموده‌است. با افزایش میزان اعوجاجات میان تصاویر الگوریتم Harris-SIFT دیگر

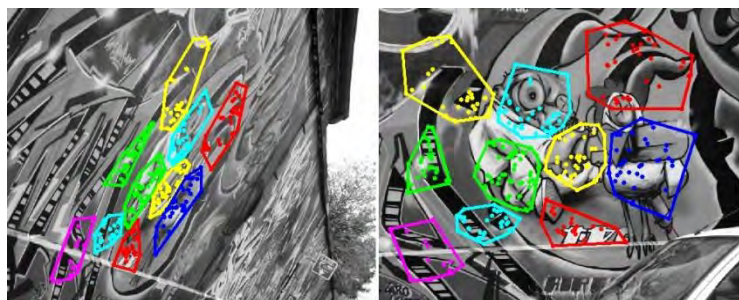
قادر به یافتن تناظرهای صحیح میان تصاویر نیست در مقابل روش پیشنهادی به طور موفقیت آمیز تعداد مناسبی از تناظرهای صحیح را استخراج نموده‌است.

در شکل نتایج تناظریابی در تصاویر اول و ششم از دسته‌داده Graffiti و در شکل نیز نتایج تناظریابی در تصاویر اول و ششم از دسته‌داده Wall برای روش پیشنهادی نشان داده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود با وجود افزایش قابل توجه زاویه تصاویر نسبت به یکدیگر، روش پیشنهادی همچنان تعداد قابل توجهی از تناظرهای صحیح را میان تصاویر استخراج نموده‌است. در شکل نتایج تناظریابی برای جفت تصویر Head و در شکل نیز نتایج تناظریابی برای جفت تصویر Zleby نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه این تصاویر مربوط به عوارض مسطح نیستند، تناظریابی آنها دشوارتر از تصاویر قبلی می‌باشد. الگوریتم پیشنهادی در تناظریابی این تصاویر نیز به صورت کاملاً موفقیت آمیز عمل نموده‌است. در صورتی که الگوریتم Harris-SIFT تنها در جفت تصویر Head که میزان همگرایی تصاویر کمتر است، تعداد ۱۱۴ تناظر صحیح یافته است. این در حالی است که روش پیشنهادی تعداد ۹۰۲ تناظر صحیح در این تصاویر با دقت بالایی استخراج نموده است.

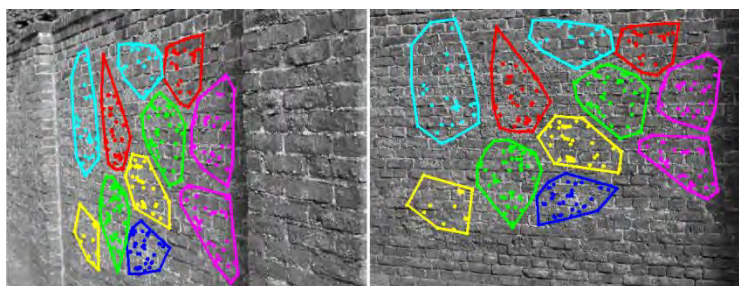
روش پیشنهادی در این قسمت اگرچه ممکن است باعث حذف تعدادی تناظر درست که در مدل تبدیل افاین مربوط به هر خوشه سازگار نیستند شود اما قطعاً تمامی تناظرهای اشتباه را حذف خواهد نمود. جهت اطمینان از صحت تناظریابی، تک تک تناظرهای حاصل از روش پیشنهادی در تمامی تصاویر با دقت و حوصله، به طور کامل بررسی شده و مشخص شد که در هیچکدام از تصاویر حتی یک تناظر اشتباه توسط روش پیشنهادی انتخاب نشده‌است. به علاوه همانطور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود دقت تناظریابی برای تمامی تصاویر در حدود یک پیکسل و کمتر می‌باشد که بیانگر دقت مناسب روش پیشنهادی است.

جدول ۲- نتایج تناظریابی روش پیشنهادی و الگوریتم Harris-SIFT در تصاویر Cesh و Mikolajczyk

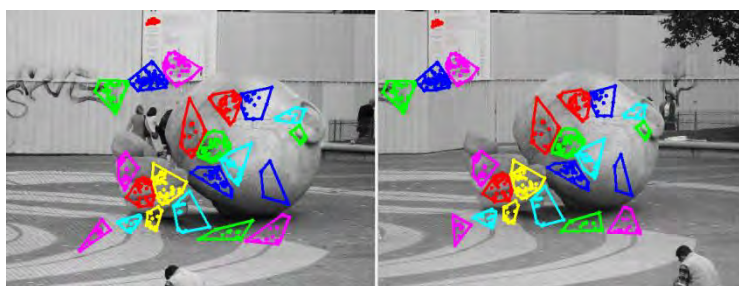
تصویر Zleby	تصویر Head	تصاویر Wall					تصاویر Graffiti					الگوریتم
		۶-۱	۵-۱	۴-۱	۳-۱	۲-۱	۶-۱	۵-۱	۴-۱	۳-۱	۲-۱	
۰	۱۱۴	۰	۶۷	۳۷۲	۷۸۷	۱۵۴۳	۰	۰	۱۳	۷۶	۱۸۲	N_{Match} Harris-SIFT
-	۰/۵۹	-	۱/۸۷	۱/۰۵	۰/۷۶	۰/۵۸	-	-	۱/۴۱	۰/۹۱	۰/۸۴	$RMSE_M$ (پیکسل)
۱۷۳	۹۰۲	۳۹۸	۷۵۹	۱۷۹۱	۴۱۸۳	۶۷۷۹	۳۲۳	۶۴۴	۹۰۱	۱۳۳۷	۲۵۳۰	N_{Match} روش پیشنهادی
۰/۷۹	۰/۵۲	۱/۱۹	۰/۹۴	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۴۱	۱/۳۵	۱/۱۱	۰/۹۸	۰/۷۴	۰/۵۱	$RMSE_M$ (پیکسل)



شکل ۱۲- نتایج تناظریابی روش پیشنهادی در تصاویر اول و ششم (۶-۱) از دسته داده Graffiti



شکل ۱۳- نتایج تناظریابی روش پیشنهادی در تصاویر اول و ششم (۶-۱) از دسته داده Wall



شکل ۱۴- نتایج تناظریابی روش پیشنهادی در زوج تصویر Head از دسته داده Cech



شکل ۱۵- نتایج تناظریابی روش پیشنهادی در زوج تصویر Zleby از دسته داده Cech

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق روشی کارآمد جهت تناظریابی تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه ارائه شد. روش پیشنهادی از الگوریتم‌های مختلفی شامل، الگوریتم ASIFT، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، قید هندسی اپی‌پولار بر مبنای ماتریس بنیادی، الگوریتم خوشه‌بندی K-Means و مدل هندسی افاین استفاده می‌کند. به طور خلاصه نتایج زیر از این تحقیق قابل بیان می‌باشند:

- استفاده از قید هندسی اپی‌پولار به تنهایی نمی‌تواند باعث حذف تمامی تناظرهای اشتباه در تصاویر برد کوتاه شود. برای این منظور در این تحقیق یک روش جدید بر مبنای الگوریتم خوشه‌بندی K-Means و مدل تبدیل افاین به صورت محلی ارائه شد. نتایج ارزیابی این روش بیانگر عملکرد کامل آن در حذف تمامی تناظرهای اشتباه باقیمانده از بررسی قید هندسی اپی‌پولار می‌باشد.
- ترکیب سه الگوریتم ASIFT، بهینه‌سازی ژنتیک در برآورد قید اپی‌پولار و خوشه‌بندی K-Means با مدل هندسی افاین محلی، روش کارآمدی جهت تناظریابی در تصاویر همگرا در فتوگرامتری برد کوتاه می‌باشد.
- در انتها پیشنهاد می‌شود از روش پیشنهادی در این تحقیق جهت انجام مسائل اساسی فتوگرامتری نظیر توجیه نسبی و تولید مدل ۳ بعدی مناظر استفاده شده و نتایج با روش‌های کلاسیک موجود مقایسه شود.

- روش پیشنهادی بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک جهت برآورد قید هندسی اپی‌پولار، قابلیت بسیار بالایی در حذف تناظرهای اشتباه در تناظریابی تصاویر برد کوتاه دارد. این الگوریتم امکان حذف تناظرهای اشتباه حتی تا زمانی که تعداد آنها ۵۰ برابر تعداد تناظرهای صحیح میان تصاویر می‌باشد را نیز داراست. عملکرد این الگوریتم در این تحقیق با الگوریتم‌های LMedS، MSAC و RANSAC مقایسه شده و برتری آن در حذف تناظرهای اشتباه در تصاویر مشخص شد.

مراجع

- [1] Gruen, A. (2012). "Development and status of image matching in photogrammetry." Photogrammetric Record, Vol. 27, No. 137, PP. 36–57.
- [2] Brown, M. Z., Burschka, D. and Hager, G. D., 2003. Advances in computational stereo. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 8, PP. 993–1008.
- [3] Pollefeys, M., Van Gool, L. Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J. and Koch, R. (2004) "Visual modeling with a hand-held camera," Int. J. Comp. Vis., vol. 59, no. 3, pp. 207–232.
- [4] Remondino, F. and El-Hakim, S., (2006) "Image-Based 3D Modeling: A Review," The Photogrammetric Record, Vol. 21, No. 115, PP. 269–291.
- [5] Fryer, J.G., Mitchell, H.L., Chandler, J.H., (2007). Applications of 3D Measurement from Images. Whittles, Scotland, 304 pages
- [6] Mayer, H., (2008). Object extraction in photogrammetric computer vision. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 63, No. 2, PP. 213–222.
- [7] Remondino, F., El-Hakim, S. F., Gruen, A. and Zhang, L., (2008). "Turning images into 3-D models." IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 25, No. 4, PP: 55–65.
- [8] Barazzetti, L., Scaioni, M. and Remondino, F. (2010), Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. The Photogrammetric Record, Vol., 25: PP. 356–381.
- [9] Abzal, A., Varshosaz, M. and Saadatseresht, M. (2011), Development of a new laser triangulation system based on an optical frame of reference. The Photogrammetric Record, Vol. 26, PP. 293–306.

- [10] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., (2006). Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles, Scotland, 510 pages.
- [11] Grün, A., Remondino, F. and Zhang, L. (2004), Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. The Photogrammetric Record, No. 19: PP. 177–199.
- [12] Zeng, G. Paris, S., Quan, L., and Sillion, F. (2007) "Accurate and scalable surface representation and reconstruction from images," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. (PAMI), vol. 29, no. 1, pp.141–158,.
- [13] Gruen, A. (1987). "Adaptive Least Square Correlation: A Powerful Image Matching Technique." South African J. Photogrammetry, Remote Sens. Cart, Vol. 14, No. 3, PP. 175–187.
- [14] Hirschmüller, H., (2008). Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30, No. 2, PP. 328–341.
- [15] Li, J. Allinson, N.M. (2008) A Comprehensive Review of Current Local Features for Computer Vision, Neurocomputing, Vol. 71, PP. 1771–1787.
- [16] Tuytelaars, T. and Mikolajczyk, K. (2008). Local invariant feature detectors: a survey. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, Vol. 3, No. 3, PP. 177–280.
- [17] Jazayeri, I. and Fraser, C. S. (2010), Interest operators for feature-based matching in close range photogrammetry. The Photogrammetric Record, Vol. 25, PP. 24–41.
- [18] Wang, Y.(1998) "Principles and applications of structural image matching," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing., Vol. 53, No. 3, pp. 154–165.
- [19] Zitova, B. and Flusser, J. (2003). "Image Registration Methods: A Survey." Image and Vision Computing, Vol. 21, PP. 977-1000.
- [20] Moigne, J. L, Netanyahu, N.S. and Eastman, D.R. (2011). "Image Registration for Remote Sensing." Published in the United States by Cambridge University Press, New York
- [۲۱] کیانژاد، س، عبادی، ح، ورشوساز، م و مجردی، ب (۱۳۸۸) طراحی و توسعه یک روش تلفیقی تناظریابی ناحیه‌ای و عارضه مبنای جدید برای توجیه نسبی در فتوگرامتری برد کوتاه، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۵، از صفحه ۵۸۵ تا ۵۹۶
- [۲۲] صداقت، ا، مختارزاده، م، عبادی، ح و مقری، م (۱۳۸۹) طراحی و توسعه روشی دقیق و اتوماتیک برای مرتبطسازی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای، نشریه تخصصی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره ۱، شماره ۱، از صفحه ۴۳ تا ۶۰.
- [23] Fraser, C. S. and Cronk, S. (2008) "A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry." *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*
- [24] Zhu, Q., Zhang, Y., Wu, B. and Zhang, Y. (2010), Multiple close-range image matching based on a self-adaptive triangle constraint. The Photogrammetric Record, Vol.25, PP. 437–453.
- [25] Lowe, D. (2004). "Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints, Cascade Filtering Approach." International Journal of Computer Vision., Vol. 60, PP. 91–110
- [۶۶] صداقت، ا، عبادی، ح، مختارزاده، م (۱۳۸۹) بهبود الگوریتم SIFT جهت تناظریابی تصاویر ماهواره‌ای، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۲، شماره ۴، از صفحه ۸۳ تا ۱۰۰.
- [۷۷] صداقت، ا، عبادی، ح، مختارزاده، م (۱۳۸۹) تلفیق عملگر Harris و توصیفگر SIFT جهت مرتبطسازی تصاویر ماهواره‌ای، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۲، شماره ۱، از صفحه ۱ تا ۲۲.
- [۸۸] صداقت، ا، مختارزاده، م و عبادی، ح (۱۳۹۰) طراحی و توسعه معیار مشابهت اطلاعات متقابل جهت تناظریابی مستقل از مقیاس و دوران، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱، شماره ۲، از صفحه ۴۳ تا ۵۶.
- [۹۹] فلاح یخدانی، م، و عزیزی، ع (۱۳۹۰) هم مرجع نمودن تصاویر ماهواره‌ای IRS-P5 و IRS-P6 بر اساس الگوریتم SIFT، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱، شماره ۲، از صفحه ۶۷ تا ۷۸.
- [30] Schwind, P., Suri, S., Reinartz, P. and Siebert, K. (2010), "Applicability of the SIFT operator to geometric SAR image registration." International Journal of Remote Sensing, Vol. 31, No. 8, PP. 1959-1980.

- [31] Sedaghat, A., Mokhtarzade, M. and Ebadi, H. (2011) "Uniform Robust Scale-Invariant Feature Matching for Optical Remote Sensing Images", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 11, pp. 4516-4527.
- [33] Wang, L., Zheng, N., Chaoyang, W., Xie, R. and Huang, H. (2012) "A robust multisource image automatic registration system based on the SIFT descriptor." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 12, PP. 3850-3869
- [33] Sedaghat, A., Ebadi, H. and Mokhtarzade, M. (2012) "Image Matching of Satellite Data Based on Quadrilateral Control Network", *The Photogrammetric Record*.
- [34] Sotoodeh, S., Gruen, A. and Hanucsh, T., (2008). Integration of structured light and digital camera image data for the 3D reconstruction of an ancient globe. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol., 37, No. 5, PP. 367-372.
- [35] Morel, J.M. and Yu, G. (2009) ASIFT, *A new framework for fully affine invariant image comparison*. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, Vol. 2, No. 2, PP. 438-469
- [36] Morel, J.M. and Yu, G. (2009) *A Fully Affine Invariant Image Comparison Method*, Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP),
- [37] Cao, B., Ma, C. and Liu, T. (2010) Affine-invariant SIFT descriptor with global context, *Image and Signal Processing (CISP)*, 2010 3rd International Congress on
- [38] Pang Y., Li. W., Yuan.,Y. and Pan, J. (2012), Fully affine invariant SURF for image matching, *Neurocomputing*, Vol. 85, PP. 6-10.
- [39] Tutte, W. (1984) *The Geometry of Multiple Images*. London, England: The MIT Press.
- [40] Rousseeuw, P., A. Leroy, *Robust Regression and Outlier Detection*, John Wiley & Sons, 1987.
- [41] Torr, P. H. S., and A. Zisserman, MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry, *Computer Vision and Image Understanding*, 2000.
- [42] Fischler, M. and Bolles, R. (1981) Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381-395.
- [43] Chum, O. and Matas, J.(2005) "Matching with PROSAC – Progressive Sample Consensus," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Diego, USA, pp. 220-226.
- [44] Wong, A. and D. Clausi, A. (2007) "ARRSI: Automatic registration of remote sensing images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 5, pp. 1483-1493.
- [45] Holland, J., (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- [46] Goldberg, D. E., (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [47] Zhao, F., Huang, Q., Wang, H. and Gao, W., (2010) MOCC: A Fast and Robust Correlation-Based Method for Interest Point Matching under Large Scale Changes, *EURASIP Journal on Advances in Signal.*,
- [48] Mikolajczyk, K. Tuytelaars, T. Schmid, C. Zisserman, A. Matas, J. Schaffalitzky, F. Kadir, T. Van Gool, L. (2005) A Comparison of Affine Region Detectors, *Int. J. Comput. Vis.* vol. 65 (1/2), pp. 43-72.
- [49] Mikolajczyk, K. Schmid, C. (2005) A Performance Evaluation of Local Descriptors. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 27, No. 10, pp. 1615-1630.
- [50] <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine/>
- [51] Cech, J., Matas, J. and Perdoch, M., (2010) Efficient Sequential Correspondence Selection by Cosegmentation, *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 32, No. 9, PP.1568-1581
- [52] <http://cmp.felk.cvut.cz/~cechj>
- [53] Spath, H. (1985). *Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples*. Translated by J. Goldschmidt. New York: Halsted Press,
- [54] <http://www.cmap.polytechnique.fr/~yu/research/ASIFT/demo.html>