

# 仿射不变特征提取算法在遥感影像配准中的应用

邓 熠 李智勇 粟 毅

(国防科技大学电子科学与工程学院信息工程系,长沙 410073)

**摘 要** 提出了一种面向影像配准应用的仿射不变特征算法。首先选取图像中拉普拉斯算子和尺度空间微分算子同时取得最大值的点为特征点,使用仿射参数模板对特征点邻域进行重采样以补偿投影变换造成的形变。随后对采样区域求取尺度不变特征变换(SIFT)构造特征矢量。在此基础上,构造相似性判据匹配特征点,通过RANSAC(random sample consensus)算法迭代消除错配生成修正的特征点集,并精确估计变换参数。利用仿真数据,测试了所提算法在仿射变换、局部遮挡、灰度对比度变化、高斯噪声等影响因素下的性能,并用异时相卫星遥感影像验证该算法的实用价值。

**关键词** 模板 尺度不变特征 仿射不变特征 相似性判据 仿射变换 遥感影像 RANSAC

中图法分类号:TP751.1 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)04-0615-07

## Extraction of Affine Invariant Feature for Remote Sensing Image Registration

DENG Yi, LI Zhi-yong, SU Yi

(School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** An affine Invariant Feature is proposed for remote sensing image registration. The key points are extracted from image as local extrema both in scale space differential and 2D Laplacian. For each key point a series of affine parameters templates are applied to transform the neighborhood pixels, which produce several slices so that projection distortion could be mitigated. Local invariant feature descriptors are extracted from these slices using scale-space invariant features transform (SIFT). An initial matching set is obtained by matching SIFT features using a special similarity criterion. The mismatched key points are removed with greedy algorithm iteratively, and then the matching set is modified. The image transformation parameters are estimated based on this modified set. The performance of this algorithm is tested under several interferences including affine transformation, partly barrier, tonal distortion, loss of contrast, and Gaussian noise. This method is confirmed with some filed satellite images.

**Keywords** templates, scale invariant feature, affine invariant feature, similarity criterion, affine transformation, remote sensing image, random sample consensus (RANSAC)

## 1 引言

遥感影像自动配准技术在信息融合、变化检测、资源与生态环境监测等领域具有非常重要的应

用<sup>[1]</sup>。基于特征的自动配准方法通过匹配影像的局部特征获取控制点,利用控制点之间的空间关系解算模型完成影像的配准。一般地,基于特征的配准方法包括5个步骤<sup>[2]</sup>:(1)特征点检测;(2)使用特征点及其邻近像素构建特征矢量;(3)进行特征

基金项目:国防“十一五”预研项目(9140A21040607kg 01)

收稿日期:2007-05-10;改回日期:2007-12-27

第一作者简介:邓 熠(1982~),男,国防科技大学信息与通信工程专业硕士研究生。主要研究方向为遥感影像局部特征提取与应用。E-mail:goldenhawking@vip.163.com

匹配以获得初始控制点集;(4)使用支持消除错配的方法进行模型参数估计;(5)使用模型参数对原始图像进行变换(图 1)。其中特征点的检测和匹配是影响后续工作精度的主要因素。传统的特征点检测方法对尺度变化、噪声干扰、几何形变等适应性不强,特征点重复率在诸多干扰因素的影响下下降很快,特征的稳定性也较差。代表性方法是基于 Harris 角点的灰度模板匹配方法、基于曲线链编码的曲线相关方法等。

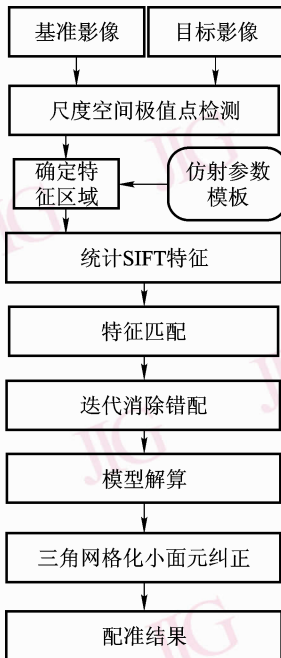


图 1 配准流程示意图

Fig. 1 Registration framework

针对这些问题,近年来提出了许多稳健的局部不变特征提取算法。Lowe<sup>[3]</sup>在 Lindeberg<sup>[4-5]</sup>的基础上阐述了尺度空间理论及其在特征提取中的应用,利用高斯差分(DoG)代替高斯拉普拉斯算子提出尺度不变特征变换(SIFT)特征提取、描述、匹配快速算法,解决了尺度和旋转不变的问题;文献[6]把 SIFT 技术应用于遥感影像配准中,提出了角点行列式(DET)椭圆 SIFT 算法,并讨论了相关性能指标。然而,由于 SIFT 技术对遥感成像中投影变形的适应不理想,会导致提取的特征点集在发生投影变形的图像中无法匹配,从而造成配准精度的下降。

针对上述问题,在 SIFT 特征提取之前使用仿射参数模板对待配准影像局部进行变换补偿,使

得尺度不变特征提取框架也具有了较好的投影变换适应性,提高了此类方法在遥感影像配准中的应用范围。

## 2 特征点检测及构造特征矢量

SIFT 方法使用尺寸与特征点尺度成正比的正方形区域作为特征统计区域,在仿射变换下适应性不理想。本文通过紧贴实际应用背景的分析,利用 Lowe 的思想提出一种新的解决方法。

高空光学传感器拍摄地面 3 维目标的深度变化相对于相机距离很小,获取的图像之间满足仿射变换关系<sup>[7]</sup>。换句话说,高空光学拍摄平台大部分拍摄场景可以使用有限几个范例涵盖。如果能够先验获取拍摄姿态参数,就能够建立接近实际拍摄场景的仿真模型;而后,通过对同一虚拟地物仿真拍摄,获取各个拍摄状态下的成像;最后即可估计各种姿态成像之间的仿射变换参数。

把依据先验知识仿真取得的各个拍摄姿态成像之间的仿射变换参数称作仿射参数模板。

为了减少模板数目,以正射状态的成像作为基准成像,计算各个非正射状态成像与正射状态间的变换关系,通过对两幅影像同时应用模板补偿变换确保双方均有正射成像出现。由于 SIFT 算法已经具有尺度、旋转适应性,故而不需要考虑为不同的旋转角度、不同的拍摄高度增设额外的模板。

### 2.1 仿射模板的构造与使用

采用 3 维成像场景仿真方法求取两幅光学影像之间的仿射变换关系,其基本步骤如下:(1)建立相机成像的 3 维模型,确定各个场景下的相机参数和传感器参数;(2)模拟拍摄各个场景下的目标成像;(3)求取仿真相片之间的仿射变换参数。

计算机图形学<sup>[7]</sup>对成像模型进行了深入的阐述。在世界坐标系的水平面上安置 3 个不共线的点目标,投影到传感器的成像平面,而后与正射状态下 3 点坐标联合解算,即可获得当前拍摄场景与正射成像之间的仿射变换关系。安排多种拍摄场景重复上述步骤,分别求取各组参数,最终形成一套仿射变换参数模板。

具体到特征点检测中,仿射参数模板的应用方法有两种:一种在 SIFT 特征提取之前对影像全图进

行仿射变换补偿;另一种方法是定位了特征点的位置后对特征统计区域范围进行仿射补偿。这两种方法的流程图如图2所示。

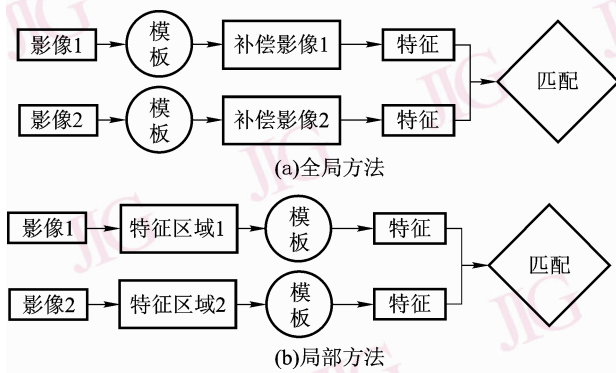


图2 仿射模板的使用方法

Fig. 2 Templates usage

由于仿射变换会在一定程度上影响特征点出现的尺度和位置,所以在特征点的定位精度上,全局变换的方法优于局部方法。全局算法需要对全图进行多次采样,在大数据量的条件下,资源开销太高。因此,需要根据现实应用具体情况来斟酌。

## 2.2 图像的尺度空间表示

从2维图像空间扩展到尺度空间就是使用高斯函数对影像进行不同程度的平滑,形成以平滑尺度 $\sigma$ 为第3维坐标的影像尺度空间表示。

图像在不同尺度下的尺度空间表示由图像与高斯核卷积得到,尺度空间的表示形式和高斯核的一般形式为

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

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

式中, $x, y$ 是像素的坐标, $I$ 是灰度像素矩阵, $\sigma$ 是高斯核的方差。尺度空间图像在正规化高斯拉普拉斯算子作用下能够出现稳定的极值点,该极值点所在尺度可以用于确定特征区域几何中心位置和几何尺寸。正规化拉普拉斯算子表示如下:

$$LoG = t \nabla^2 L = t \left( \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中, $t$ 是尺度,本特征具有尺度不变特性。Lowe指出LoG可以用尺度空间上相邻两幅高斯影像的差分(DoG)来近似,DoG算子定义如下:

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (4)$$

式中, $k$ 是一个常数。

## 2.3 尺度特征点检测

SIFT<sup>[3]</sup>方法利用DoG与LoG的关系提出了一套特征点检测、特征提取方法,大致分为如下几步:

(1)利用不同尺度的高斯核函数卷积图像,并生成高斯差分图像DoG;(2)在由各层DoG组成的3维尺度空间采样中搜索3维局部极值。(3)通过基于Hessian矩阵的判据<sup>[3]</sup>去除低对比度的不稳定极值和受图像边缘离散卷积误差影响的点。(4)进行高维曲面拟合精确确定特征点的位置和尺度。(5)利用梯度分布特性为每个特征点指定方向参数。

在以特征点为中心,宽度与尺度成正比的窗口内统计像素的梯度方向直方图,峰值作为该特征点的方向。产生的每个特征点有3个信息:位置、所处尺度、方向,由此可以确定一个SIFT特征区域。

## 2.4 特征统计

SIFT特征统计窗口如图3所示,是一个 $16 \times 16$ 的矩阵。该矩阵中每 $4 \times 4$ 个像素作为一个子统计区域共被分为16个统计区域。对每一个子区域分别统计各个像素相对于主梯度的方向直方图,每 $45^\circ$ 为一个方向共产生8个特征。最后,把16个子区域的直方图特征按照固定的顺序排列起来形成128维的特征矢量。

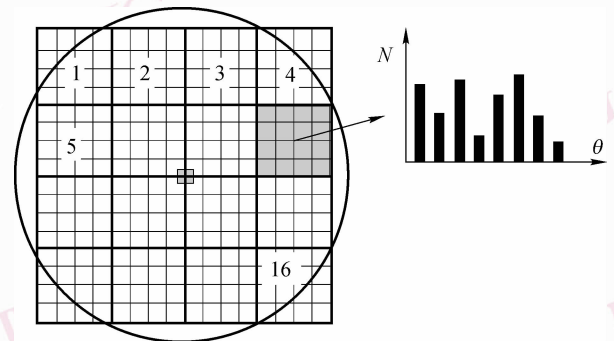
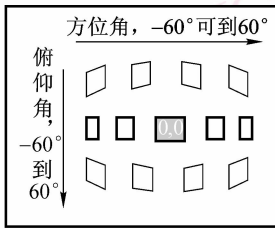


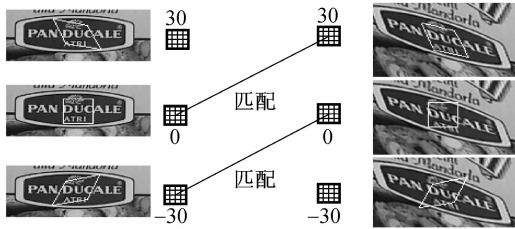
图3 SIFT特征统计区域

Fig. 3 SIFT region

对于局部变换补偿的情况,使用仿射参数模板把SIFT特征统计窗口<sup>[3]</sup>变换到图像上覆盖待采样区域,使用覆盖区域的像素填充特征统计窗口,而后计算梯度图并统计特征矢量产生特征。如图4(b)所示。



(a) 仿射模板示意图



(b) 应用仿射模板到特征提取

图 4 基于仿射参数模板的特征提取示意图

Fig. 4 Feature extraction based on affine parameters templates

### 3 控制点匹配

Lowe 采用 SIFT 特征向量的欧氏距离来作为两幅图像中特征点的相似性判定度量<sup>[3]</sup>。具体方法是首先取图像 1 中的某个特征点,并找出其与图像 2 中欧氏距离最近的前两个特征点,在这两个特征点中,如果最近的距离除以次近的距离少于某个比例阈值,则接受这一对匹配点。

采用了仿射参数模板后,由于同一空间位置可能会出现不同尺度、不同主方向、不同仿射模板的多个特征矢量,而这些特征矢量之间具有很强的相似性,致使 Lowe 的匹配方法出现问题。

通过改进 Lowe 的相似性判据矢量来克服这个问题,提高控制点的匹配质量。具体步骤如下:

(1) 对于图像 1 中的某个特征  $P$ , 找出图像 2 中距离最近的特征  $Q$ , 并记录该特征对应的空间位置坐标  $(x, y)$ ;

(2) 在图像 2 中排除那些距离空间位置  $(x, y)$  小于某个常数的特征, 而后找出距  $P$  最近的特征作为第二最小距离;

(3) 以第二最小距离与第一最小距离的比值作为相似性判据。

在实际计算中, 门限降低能够找到更多的控制

点对, 但是控制点的稳定性下降将导致计算速度下降。门限太高, 则无法找到足够数目的控制点。

### 4 消除错配与精度控制

使用仿射不变特征提取与匹配方法能够提供数目可观的控制点对, 但是, 这些控制点中存在一定数目的错配点。使用传统的最小二乘算法无法克服错配点造成的误差。目前已经发展了许多能够容忍一定数量的误配点存在的稳健的变换估计算法<sup>[8]</sup>。由 Fishler 和 Bolles 提出的 RANSAC 算法<sup>[1]</sup>使用随机抽取的点集作为初始点集, 随后不断扩充集合, 效率高且较为稳健。

RANSAC 在输入数据中不断采样最小点集, 每次采样最小点集后估计所要确定的模型参数, 同时把输入参数中和模型参数一致的点称为内点, 不一致划分为外点。最终选择输入数据中内点比例最高的参数值作为 RANSAC 最后解。将此解作为其他方法的初始值进一步优化计算, 从而得到最后的估计参数值。结合前面的 SIFT 特征匹配结果, 运用 RANSAC 算法对仿射变换矩阵的自动稳健估计步骤如下<sup>[1]</sup>:

(1) 设图像  $A, B$ ,  $A$  抽取匹配点用  $P$  表示, 对应  $B$  的匹配点使用  $Q$  表示。匹配点数据集包含  $M$  个控制点对。

(2) 运用 RANSAC 估计图像间变换矩阵: 重复  $N$  次随机采样

① 随机选取 3 对初始匹配点

$\{P_i \sim Q_i, P_j \sim Q_j, P_k \sim Q_k\} (i, j, k \in [1, M])$ , 最小二乘拟合仿射矩阵;

② 使用上面方法推算出的仿射矩阵对  $P$  的各个元素  $P_i$  进行变换, 结果记为  $Q'_i \in Q'$ , 求取各个点的误差  $e_i = \|Q'_i - Q_i\|$ ;

③ 根据内点误差小于某一阈值的原则计算  $A$  的内点;

(3) 由 RANSAC 的  $N$  次随机采样得到了最大内点集合;

(4) 对前一次获得的内点集合重复第 2 步、第 3 步, 直到两次 RANSAC 计算出的内点数目趋于一致, 确定最终的内点集

经过上面的步骤, 能够剔除明显错配的控制点。需要注意的是, 误差门限不能太苛刻, 取 5~10 个像素即可。否则图像上满足其他变换模型的正确匹配

点会被删除。典型情况是满足双二次模型的控制点在仿射模型下总会有几个像素的误差。

如果迭代结束后使用  $A$  的估计误差已经达到精度标准,则可以进行重采样工作和小面元修正,否则,还需要使用更为精确的模型进行进一步校准。

### 5 实验分析

利用仿真数据分别从仿射变换、部分遮挡、整体对比度变化、局部噪声和算法的时间消耗等角度测试特征点在这些参数下的匹配率,同时安排算法效率实验比照算法的性能指标;仿射变换匹配性能使用“匹配点个数”来衡量。采用 9 个仿射模板,包含拍摄姿态:正射(1 个)、侧视(4 个)和斜视(4 个)。仿射模板采用局部仿射补偿。噪声、对比度变化的适应性使用“相对匹配点数”表示,相对匹配点数表示为噪声条件下匹配点个数与理想状态下匹配点个数的比值。参与比较的算法有 SIFT<sup>[3]</sup>、DET 椭圆 SIFT<sup>[6]</sup> 和仿射模板 SIFT。

#### 5.1 仿射变换适应性

仿射变换适应性测试包括对旋转、尺度缩放、线性拉伸的适应性。使用若干组仿射参数进行测试。实验中不断沿 45° 方向斜拉测试图像,绘制拉伸比例与匹配点个数的曲线。由于遥感影像特别是卫星遥感影像的仿射参数动态范围并不是很强烈,因而仿射模版可以缩小规模。结果如图 5 所示。

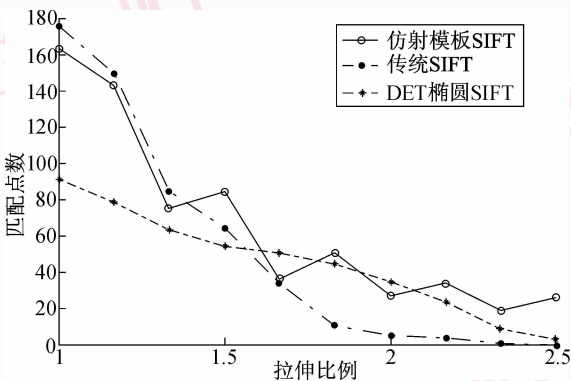


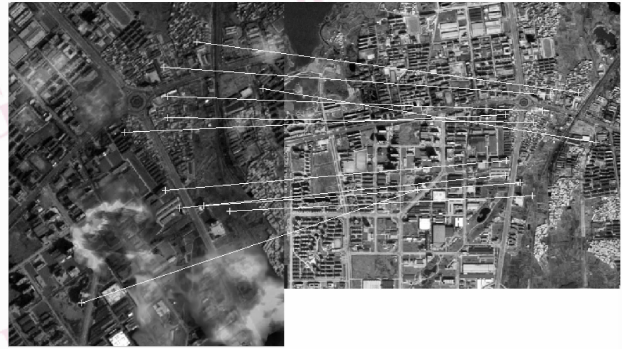
图 5 仿射变换匹配性能曲线

Fig. 5 Test results of affine transformation

#### 5.2 部分遮挡适应性

在实际应用中,由于云遮挡等因素,遥感图像的部分区域可能无法正确成像。通过真实数据测试在部分遮挡情况下算法的稳定性。部分遮挡情况下的

实验结果如图 6 所示。



云层遮挡待配影像

原始影像

图 6 云层遮挡情况下的实验结果

Fig. 6 Test results of partly barrier

#### 5.3 照度变化与噪声环境测试

实验测试在高斯噪声、照度变化情况下算法的稳定性,绘制信噪比和相对匹配点数的曲线,结果如图 7 所示;整体的灰度搬移对特征点匹配性能有一定的影响,归一化图像的灰度搬移从 -0.5 ~ 0.5 变化,如图 8 所示;对比度变换表现为灰度区间的压缩,压缩比例从 1 变化到 4 倍,观测匹配性能如图 9 所示。

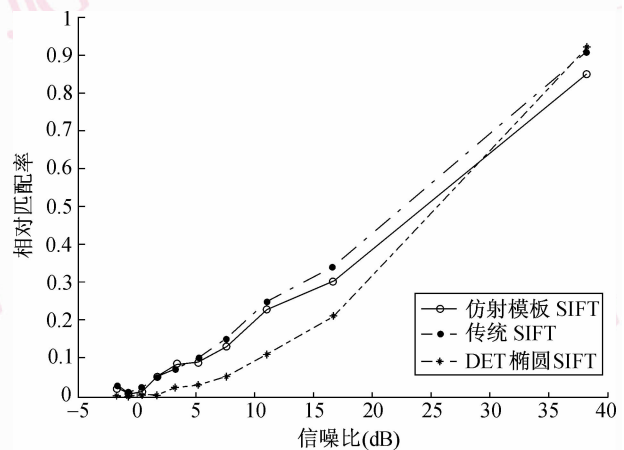


图 7 不同信噪比下的相对匹配率测试结果

Fig. 7 Testing results for Relative match ratios with different SNR (Signal Noise Ratio)

#### 5.4 算法的时间开销实验

本特征提取算法在耗时上要普遍高于 SIFT 方法,且特征提取算法耗费时间与采用的仿射模板个数紧密相关。实验使用的图像 512 × 512,使用模板情况同上。时间统计从特征提取开始到特征矢量输出结束。重复 5 次,取最大时间消耗为准。实验结果如图 10 所示。

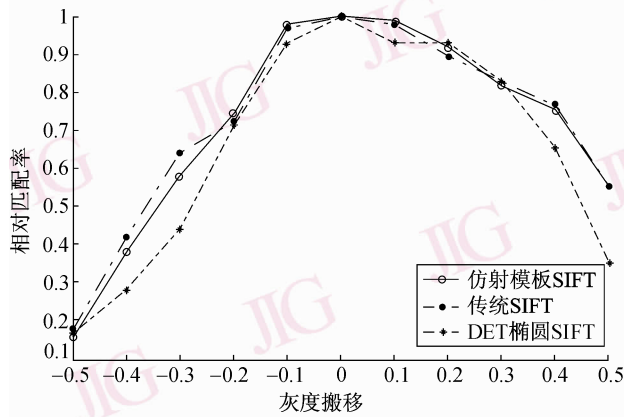


图 8 不同亮度下的相对匹配率测试结果

Fig. 8 Testing results for Relative match ratios with different brightness

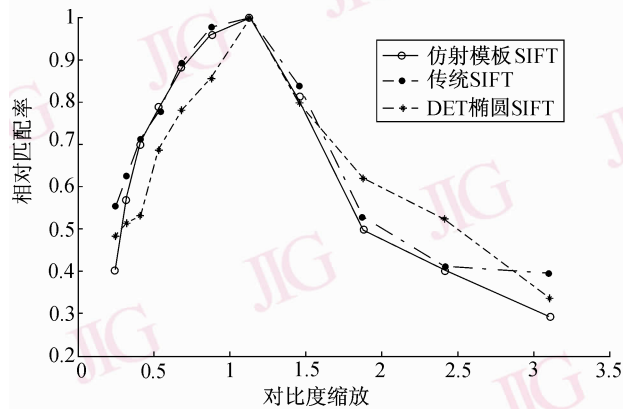


图 9 不同对比度下的相对匹配率测试结果

Fig. 9 Testing results for Relative match ratios with different contrast

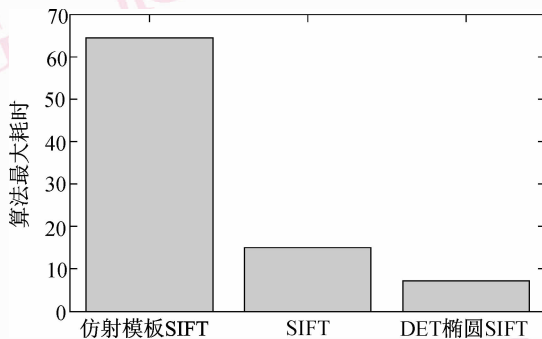


图 10 算法性能比照

Fig. 10 Performance test results

### 5.5 配准精度实验

本算法对局部地表结构变化(如路面翻新、建筑物阴影变化方向)等较为敏感,失配率较高。但是,在图像区域信息较为丰富的情况下,仍然能够探测出足够的匹配点。精度测试点的来源一般有 3

种:一是事先提供的基准点;二是利用更为稳健的特征匹配方法获取的特征点;三是用专业遥感软件手工进行同名点匹配。这里采用第 3 种方法,在 3 组测试影像中各选取 20 个参考点进行测试。误差的定义如下:

$$\begin{cases} x'_i = f(x_i, y_i) \\ y'_i = f(x_i, y_i) \end{cases} \quad (5)$$

表示基准影像的控制点坐标到待配影像的变换,对手工标定的  $n$  个测试点对  $(x_i, y_i) \sim (x'_i, y'_i)$ , 设  $(x_i, y_i)$  经过待评价模型  $T$  后得到  $(x''_i, y''_i)$ , 则  $x, y$  方向的均方根误差为

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x'_i - x''_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - y''_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$x, y$  方向的总均方根误差定义如下,总均方根误差也就是通常说的配准误差:

$$RMSE_{total} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x'_i - x''_i)^2 + (y'_i - y''_i)^2]}{n}} \quad (8)$$

误差如表 1 所示。

表 1 检查点误差一览表

Tab. 1 Check point error table

项目名称	RMSE <sub>x</sub>	RMSE <sub>y</sub>	RMSE <sub>total</sub>
第 1 组	0.734 8	0.728 2	1.034 5
第 2 组	0.674 6	0.673 9	0.953 5
第 3 组	0.643 3	0.754 8	0.991 8
第 4 组	0.842 9	0.760 9	1.135 5
平均	0.723 9	0.729 4	1.028 8

单位:像素

最大误差 1.135 5 像素,达到了一般应用的需求。

## 6 结 论

在实验过程中,仿射变换适应性测试基本符合实际应用的需求,对一定范围内的仿射模型拥有较好的匹配性能。但是,在较为剧烈的单向拉伸变换下,由于特征点出现的尺度已经发生了变化,特征点

的重复率下降剧烈。表现在图5曲线中就是特征点的最终失配。因此需要更加深入的研究,特别是找出仿射变换对特征点特征尺度的影响。

对于遮挡超过40%的场景,该算法仍然具有较高的匹配度,能够满足实际应用的需求。该算法对灰度变化的敏感度较低,实验也体现了SIFT特征在抗噪声能力上的较好表现。通过异时相遥感影像配准实验,该算法的使用价值得到了体现,配准的平均误差达到子像素级,最大误差也得到了有效控制。

### 参考文献 (References)

- 1 Zhang Ji-xian, Li Guo-sheng, Zeng Yu. High precision method for multi-source remote sensing image automatic registration [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(1): 73-75. [张继贤, 李国胜, 曾钰. 多源遥感影像高精度自动配准的方法研究 [J]. 遥感学报, 2005, 9(1): 73-75.]
- 2 Lei Lin, Chen Tao, Su Yi. An automatic remote sensing image registration method using SIFT features [A]. In: Academic Activities Symposia for Graduate Students (2006), National University of Defense Technology [C], Changsha, 2006: 1-4. [雷琳, 陈涛, 粟毅. 一种基于SIFT特征的遥感图像自动配准方法 [A]. 见: 国防科技大学研究生学术活动论文集 (2006) [C], 长沙, 2006: 221-224.]
- 3 Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- 4 Tony Lindeberg. Scale-space for discrete signals [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(3): 234-254.
- 5 Tony Lindeberg. Feature detection with automatic scale selection [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 30(2): 79-116.
- 6 Chen Tao. Research on Affine Invariant Feature Extraction [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. [陈涛. 图像仿射不变特征提取方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.]
- 7 Sun Jia-guang. Compute Graphics [M]. 3rd ed, Beijing: Tsinghua University Press, 1998. [孙家广著. 计算机图形学 [M]. 第3版, 北京: 清华大学出版社, 1998.]
- 8 Chen Fu-xing, Wang Run-sheng. Rapid random sampling consistency method based on prechecking [J]. Journal of Software, 2005, 16(8): 1434-1473. [陈付幸, 王润生. 基于预检验的快速随机抽样一致性算法 [J]. 软件学报, 2005, 16(8): 1434-1473.]
- 9 Fishler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of ACM, 1981, 24(6): 381-395.