

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **11**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年11月 第17卷 第11期(总第199期)

目次

综述

数字图像合成技术综述 吴昊, 徐丹(1333)

图像处理和编码

基于群稀疏的结构化字典学习 郭景峰, 李贤(1347)

SSIM 度量虚拟视点绘制失真的深度图帧内编码 喻莉, 张军涛, 邓慧萍, 向森, 周鹏, 左雯, 王宁(1353)

统计量移位的鲁棒无损图像信息隐藏 李晓博, 周诠(1359)

伪造图像典型篡改操作的检测 左菊仙, 刘本永(1367)

图像分析和识别

融合灰度和 SURF 特征的红外目标跟踪 范新南, 丁朋华, 刘俊定, 张学武(1376)

海面温度栅格图的锋面提取与矢量化 崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂(1384)

交通场景中车辆的运动检测与阴影消除 王彬, 冯远静, 郭海峰, 张贵军(1391)

基于随机点积图的图像标注改善算法 孙登第, 罗斌, 郭玉堂(1400)

图像理解和计算机视觉

有监督子空间建模和稀疏表示的场景分类 段菲, 章毓晋(1409)

对立色 LBP 模型的目标跟踪 张炯, 宁纪锋, 颜永丰, 于伟(1418)

计算机图形学

联合骨架与边界特征的平面形状分解…………… 蒋建国, 周丹凤, 郝世杰, 郭艳蓉, 詹曙(1425)

屏幕空间自适应的地形 Tessellation 绘制…………… 张兵强, 张立民, 艾祖亮, 张建廷(1431)

遥感图像处理

SAR 图像稀疏优化滤波…………… 杨萌, 张弓(1439)

分段线性动态矩匹配条带去除…………… 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 陈蕾, 陈启东(1444)

基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率遥感影像匹配算法…………… 陈梦婷, 闫冬梅, 王刚(1453)

第八届图像图形技术与应用学术会议征文通知…………… (1460)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 11 期

2012 年 11 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTXFZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)11-1453-07

论文引用格式: 陈梦婷, 闫冬梅, 王刚. 基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率遥感影像匹配算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1453-1459.

基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率 遥感影像匹配算法

陈梦婷^{1,2}, 闫冬梅¹, 王刚¹

1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 影像匹配是诸多遥感影像处理和影像分析的一个关键环节。传统基于角点的灰度相关匹配算法由于不具备旋转不变性而需要人工干预进行粗匹配, 无法实现自动化。SIFT(scale invariant feature transform)算法能很好地解决图像旋转、缩放等问题, 但是对于几何结构特征更加清晰、纹理信息更加丰富的高分辨率遥感影像而言, 该算法消耗内存多、运算速度慢的问题非常突出。将两者结合, 提出基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的影像匹配算法。实验结果表明, 相比 SIFT 算法, 该算法大量缩减了运算时间, 同时保留了 SIFT 描述符的旋转不变性和对光照变化的适应性, 克服了灰度相关算法无法实现全自动的缺点, 在高分辨率遥感影像匹配上效果较好。

关键词: SIFT 描述符; Harris 角点; 高分辨率; 影像匹配

Algorithm of high-resolution remote sensing image matching based on Harris corner and SIFT descriptor

Chen Mengting^{1,2}, Yan Dongmei¹, Wang Gang¹

1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Image matching is a fundamental step in remote sensing image processing and analysis. The traditional gray correlation coefficient matching algorithm does not have the rotation invariant feature. SIFT (scale invariant feature transform) algorithm can provide robust matching which is invariant to image scale and rotation. However, for high-resolution remote sensing images with clearer geometric structure and richer texture information, the problem of consuming large memory and slow computing is very prominent. In this paper, the image matching algorithm based on Harris corner and SIFT descriptor is proposed. The experimental results show that, compared to the SIFT algorithm, this algorithm greatly reduces the running time. It preserves the invariance of rotation and change in illumination by using SIFT descriptor, overcomes the shortcomings of the gray correlation coefficient matching algorithm, and has good performance on high-resolution remote sensing image matching.

Key words: SIFT descriptor; Harris corner; high-resolution; image matching

收稿日期: 2012-03-19; 修回日期: 2012-04-20

基金项目: 国家科技重大专项: 高分辨率对地观测系统

第一作者简介: 陈梦婷(1988—), 女, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心硕士研究生, 主要研究方向为光学遥感影像配准。

E-mail: mtchen@ceode.ac.cn

0 引言

高分辨率遥感影像具有地物几何结构清晰, 纹理信息丰富等优点, 目前已在城市生态环境评价、城市规划、地形图更新、地籍调查、精准农业等方面得到了巨大的成功应用^[1]。而影像配准是诸多遥感影像处理和影像分析(如影像融合、镶嵌拼接、变化监测、目标识别等)的关键环节。

在影像配准中, 基于特征的配准方法并不单纯依赖图像的灰度信息, 因此鲁棒性好, 对存在较大时相、视角等差异的遥感影像配准适用性更强, 而该方法的重点在于特征的提取与匹配。

早期的角点特征提取算法, 如 Forstner 算法^[2]、Harris 算法^[3] 往往使用通过在一幅图像上提取出点特征然后在另一幅图像上搜索对应特征的匹配方法, 最常用的就是基于灰度相关系数的匹配。即首先在待配准图像上提取角点特征, 然后取出以角点为中心的小区域, 在参考影像上取出相应区域, 计算两者灰度的相关函数, 以相关函数最大值对应的相应区域中心点为对应特征点^[4]。但是这种匹配方法不具有尺度和旋转不变性, 当拍摄角度和光照条件发生变化时, 无法实现自动匹配。

2004 Lowe 年提出的 SIFT(scale invariant feature transform) 算法^[5] 则很好地解决了图像旋转、缩放、仿射变形等问题, 对视点变化、噪声干扰、光照变化等也有很强的鲁棒性。SIFT 算法在待匹配影像和参考影像上分别提取具有尺度不变性的斑点特征, 然后使用 SIFT 描述符进行匹配。Mikolajczyk 等人^[6] 对包括 SIFT 在内的多种最具代表性的描述符进行了实验和性能比较, 实验结果表明, 无论是在不同的场景, 还是不同的光照变化、图像几何变形、分辨率差异、旋转、模糊和图像压缩等多种情况下, SIFT 描述符的综合性能仍然是最好的。SIFT 算法也被李晓明^[7]、陈裕^[8] 等很多学者应用于遥感影像配准。

但是在特征点提取环节, SIFT 算法由于需要构建影像金字塔等步骤, 存在消耗内存多、运算速度慢的问题。对于几何结构特征更加清晰、纹理信息更加丰富的高分辨率遥感影像而言, 这一缺点显得更为突出。将传统的灰度匹配算法和 SIFT 算法相结合, 利用角点算法中检测性能较好的 Harris 算法提取特征点, 使用 SIFT 描述符对提取出的角点进行描

述和匹配, 大大缩减了运行时间, 同时保留了 SIFT 描述符的旋转不变性和对光照变化的适应性, 克服了灰度相关算法旋转差异性的缺点。在对高分辨率遥感影像数据的实验中验证了算法上述优点的有效性。

1 SIFT 描述符

SIFT 算法主要分为两个部分: 特征点的位置检测和描述符的构造。SIFT 描述符为本文研究重点, 包括确定特征点主方向和使用特征点周围图像信息构造 128 维描述符两个步骤。

在 SIFT 特征点的位置检测中为了使特征点具有尺度不变性, 点检测是在多尺度空间完成的, 主要原理为: 对输入图像使用不同尺度(σ)的高斯核函数进行连续滤波和降采样(sub-sampled), 形成高斯金字塔图像, 然后再对相邻尺度的两个高斯图像相减得到差分 DOG(difference of Gaussians) 金字塔图像。将 DOG 金字塔中每个点与相邻层次和相邻位置的点逐个进行比较, 得到的局部极值位置即为关键点所处的位置和对应的尺度。然后, 通过曲面拟合的方法对关键点进行进一步的精确定位。

1.1 确定主方向

为了保证特征点描述符的旋转不变性, 需要根据检测到的特征点周围局部图像信息求得一个方向基准, 即所谓主方向。

对于检测到的特征点, 使用有限差分计算以特征点为中心, 以 $3 \times 1.5\sigma$ 为半径的区域内图像像素梯度模值 m 和梯度幅角 θ , 即

$$\begin{cases} m(x, y) = \sqrt{L_1^2 + L_2^2} \\ L_1 = L(x+1, y) - L(x-1, y) \\ L_2 = L(x, y+1) - L(x, y-1) \\ \theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L(x, y)$ 表示 (x, y) 处特征点所在尺度的金字塔图像灰度^[5]。

然后使用直方图统计邻域内像素的梯度模和方向。直方图的横轴是梯度方向幅角, 纵轴是梯度方向角对应的梯度模累加值。梯度直方图按照范围 $0^\circ \sim 360^\circ$ 分为 36 个柱, 每 10° 为一个柱。直方图的峰值代表了该特征点邻域内图像梯度的主方向, 即

该点主方向。当梯度直方图中存在另一个相当于主峰值 80% 能量的峰值时,则将这个方向认为是该特征点的辅方向,如图 1,这么做是为了增强匹配的鲁棒性。

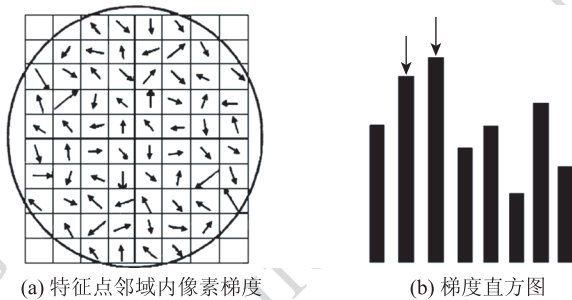


图 1 确定特征点主方向
Fig. 1 Orientation assignment

构造梯度直方图时,每个加入直方图的采样点梯度幅值都要采用圆形高斯加权函数进行加权处理。由于 SIFT 算法只考虑了尺度和旋转不变性,并没有考虑仿射不变性。通过高斯加权,使特征点附近的梯度幅值有较大的权重,可以部分弥补因没有仿射不变性而产生的特征点不稳定的问题。

1.2 构造 SIFT 描述符

将特征点周围的局部区域顺时针旋转主方向代表的角度 θ ,以确保其旋转不变性。在旋转后的区域内,将以特征点为中心的 16×16 的矩形窗口均匀地分成 4×4 个子区域,如图 2。在每个子区域内,计算 8 个方向(0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315°)的梯度直方图。同样,对每个像素的梯度幅值需要进行高斯加权处理。如此,每个特征点将形成 128 维特征矢量,即 SIFT 描述符。

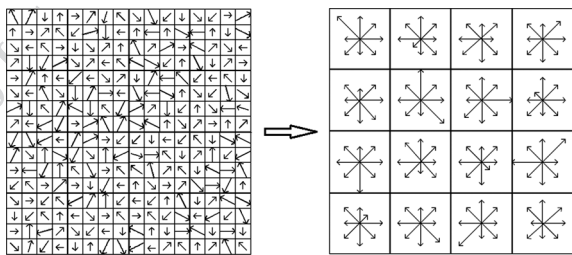


图 2 SIFT 描述符生成
Fig. 2 SIFT descriptor generation

特征矢量形成后,为了去除光照变化的影响,需要对其进行归一化处理,然后对矢量中大于 0.2 的分量统一取 0.2,目的是提高特征的鉴别性。

2 基于 Harris 点和 SIFT 描述符的匹配

由于 SIFT 算法检测特征点时构造影像金字塔、检测极值确定关键点位置等步骤存在计算复杂、耗时长、消耗内存多等缺点,使用 Harris 算法代替 SIFT 进行特征点检测,形成以 Harris 角点和 SIFT 描述符结合的快速影像匹配算法。

具体步骤如下:

- 1) 利用 Harris 算法提取待配准影像和参考影像上的角点特征;
- 2) 确定两幅影像上 Harris 角点的主方向。此时不再生成影像金字塔,直接使用灰度归一化后的原始影像代替之前的 SIFT 特征点所在尺度的金字塔影像,计算角点邻域内各像素的梯度模值和幅角,构建梯度直方图,具体可参见 1.1 小节。直方图峰值所代表的方向就是该特征点的主方向。

- 3) 构造两幅影像上 Harris 角点的 SIFT 描述符。将 Harris 角点周围局部区域顺时针旋转主方向代表的角度,在旋转后的区域内选择角点为中心 16×16 大小的矩形窗口,均分为 4×4 个子区域。每个子区域均按 8 个方向构建梯度直方图,由此可得到 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维的特征矢量,即 SIFT 描述符。

由于没有构建高斯金字塔,按这种方法生成的描述子具有同一尺度,同时保持了旋转不变性、对光照变化的适应性,在同分辨率遥感图像匹配中依然适用。

- 4) 使用最近邻/次近邻比值法进行匹配。即对待配准影像中每个特征点,计算它和参考影像上各特征点描述符的欧式距离,将最近邻(NN)和次近邻(2ndNN)的距离之比($NN/2ndNN$)作为相似性度量,设定阈值,确定候选匹配点对。

- 5) 使用 RANSAC^[9] 算法通过几何一致性检验剔除错误的匹配点对,对匹配结果进行提纯。

3 实验与分析

为验证算法的有效性,选取两组高分辨率遥感影像为实验数据:澳大利亚地区的 GeoEye 影像和北京地区的 SPOT5 影像。其中 GeoEye 全色影像分辨率为 0.5 m,多光谱影像分辨率为 2.0 m,待配准影像和参考影像获取时间相同;两幅 SPOT5 全色影像分辨率为 2.5 m,影像获取时间相差 3 a。

在所有实验中均选取 0.48 作为最近邻/次近邻比值法的阈值,使用匹配正确率和由正确匹配点对通过二次多项式模型计算得到的中误差 RMS 作为衡量影像匹配质量与精度的标准。匹配正确率定义为

$$R_{\text{correct}} = \frac{N_{\text{correctMatches}}}{N_{\text{correspondences}}} \quad (2)$$

式中, $N_{\text{correspondences}}$ 表示得到的匹配点对数, $N_{\text{correctMatches}}$ 表示在得到的匹配点对中通过人工筛选出的正确点对数。

3.1 SIFT 描述符旋转不变性验证

为了验证 SIFT 描述符匹配的旋转不变性,使用传统的灰度相关匹配作对比,即分别对待配准影像和参考影像使用 Harris 算法提取角点特征,然后使用 SIFT 描述符和灰度相关对角点进行匹配,将两组匹配结果作对比。

选取平原地区 GeoEye 多光谱影像和全色影像作为实验数据,为了排除尺度的影响,将全色影像分辨率重采样为 2.0 m。

当待配准影像和参考影像之间不存在旋转时, SIFT 描述符匹配结果如图 3,灰度相关匹配结果如图 4,图中匹配点对均以十字丝表示。

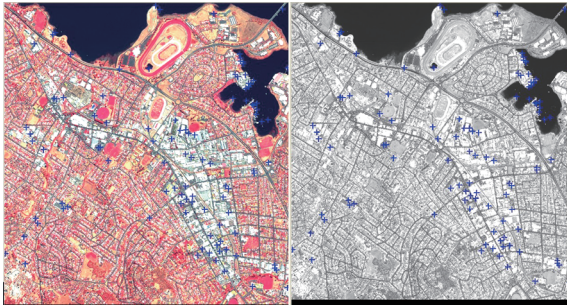


图 3 不存在旋转时的 SIFT 描述符匹配结果

Fig. 3 SIFT descriptor matching result without rotation



图 4 不存在旋转时的灰度相关匹配结果

Fig. 4 Gray correlation coefficient matching result without rotation

从上述两幅图中可以看出,当待配准影像和参考影像之间不存在旋转时,两种方法得到的匹配点对都能够较好的覆盖到全图,匹配正确率如表 1。

表 1 两种方法匹配结果对比
Table 1 Matching results comparison for two methods

匹配方法	匹配点对数	正确率/%
SIFT 描述符匹配	比值法初匹配	150 74.67
	RANSAC 剔除错点对	112 100
灰度相关匹配	51	100

将参考影像顺时针旋转 1°后重复上述过程, SIFT 描述符匹配结果如图 5,灰度相关匹配结果如图 6。



图 5 存在旋转时的 SIFT 描述符匹配结果

Fig. 5 SIFT descriptor matching result with rotation

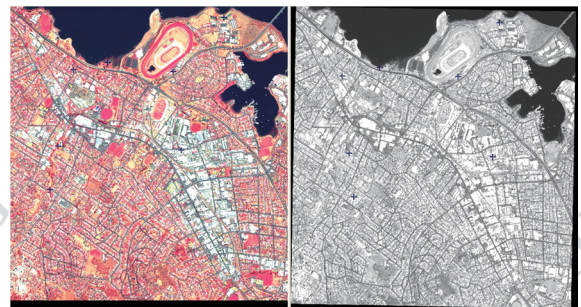


图 6 存在旋转时的灰度相关匹配结果

Fig. 6 Gray correlation coefficient matching result with rotation

从上述两幅图中可以看出,当待配准影像和参考影像之间存在旋转时, SIFT 描述符匹配得到的匹配点对依然能够较好的覆盖到全图,灰度相关匹配得到的匹配点对数则剧烈减少,正确率也大大下降,具体参见表 2。

表 2 两种方法匹配结果对比

Table 2 Matching results comparison for two methods

匹配方法		匹配点对数	正确率/%
SIFT 描述符匹配	比值法初匹配	163	74.85
	RANSAC 剔除错点对	122	100
灰度相关匹配		7	0

由此可得到以下结论:SIFT 描述符匹配具有良好的旋转不变性,传统的灰度相关则无法用于存在旋转关系的影像匹配。

3.2 算法对高分辨率遥感影像匹配的适应性

选取山区分辨率为 0.5 m 的两幅具有视角差的 GeoEye 全色影像和平原地区分辨率为 2.5 m 具有时相差异的 SPOT5 全色影像为实验数据。同样使用灰度相关匹配作对比,为了排除两幅图像之间旋转的影响,人工选取 3 对点消除旋转关系后再做灰度相关匹配。

两种算法作用于山区 GeoEye 全色影像的匹配结果如图 7、图 8。

可看出它们得到的匹配点对在图中位置分布大致相同,基于 Harris 算法的 SIFT 描述符匹配得到的

点对数更多,局部点对更密集,经过 RANSAC 提纯后其匹配正确率和匹配精度也更高,具体可见表 3。

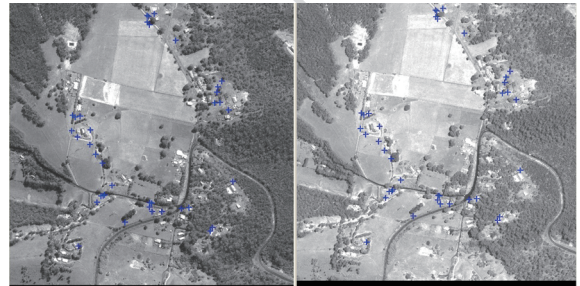


图 7 SIFT 描述符匹配结果

Fig. 7 SIFT descriptor matching result

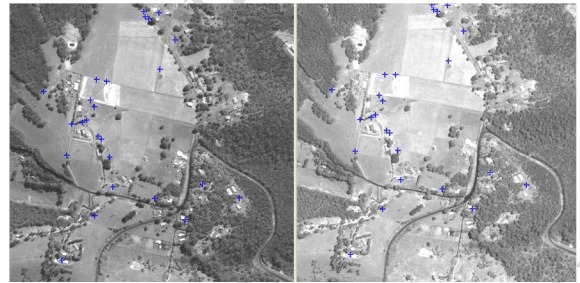


图 8 3 点粗匹配 + 灰度相关匹配结果

Fig. 8 Three points rough matching and gray correlation coefficient matching result

表 3 两种方法匹配结果对比

Table 3 Matching results comparison for two methods

匹配方法		匹配点对数	正确率/%	RMS
SIFT 描述符匹配	比值法初匹配	142	29.58	25.94
	RANSAC 剔除错点对	42	100	1.411 0
灰度相关匹配		25	96	2.237 2

北京城区存在时相差异的两幅 SPOT5 全色影像的匹配结果见图 9、图 10。

两种算法的结果差异类似山区的 GeoEye 影像,

基于 Harris 算法的 SIFT 描述符匹配结果略优于 3 点匹配后的灰度相关算法,匹配正确率与精度具体参见表 4。

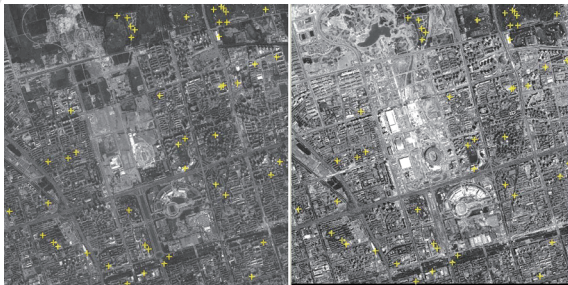


图 9 SIFT 描述符匹配结果

Fig. 9 SIFT descriptor matching result



图 10 3 点粗匹配 + 灰度相关匹配结果

Fig. 10 Three points rough matching and gray correlation coefficient matching result

表 4 两种方法匹配结果对比

Table 4 Matching results comparison for two methods

匹配方法		匹配点对数	正确率/%	RMS
SIFT 描述符匹配	比值法初匹配	63	79.37	35.55
	RANSAC 剔除错点对	50	100	0.5525
灰度相关匹配		40	95	0.5423

从上述实验中可以得出:基于 Harris 算法的 SIFT 描述符匹配无论对山区还是城区的高分辨率遥感影像匹配均适用,而且匹配质量优于传统的 3 点粗匹配 + 灰度相关算法。

3.3 算法时间效率

选取 3.2 节中同样的分辨率为 2.5 m, 影像大小为 2000 × 2000, 具有时相差异的北京城区 SPOT5 全色影像为实验数据, 使用 SIFT 原始算法提取特征点构造描述符并匹配, 与本文提出的基于 Harris 角点的 SIFT 描述符匹配算法对比, 各主要步骤运行时间见表 5。实验系统配置为 CPU: Intel Core2 E4500 2.2GHz, 2G 内存的计算机, Visual Studio 2008 的软件环境, 算法实现语言为 C/C++。

表 5 时间对比

Table 5 Time comparison

算法步骤	SIFT 特征点提取与匹配算法	基于 Harris 的 SIFT 描述符匹配	/s
确定待匹配影像特征点位置	38.531	1.219	
构建待匹配影像 SIFT 描述符	72.563	4.797	
确定参考影像特征点位置	47.828	1.360	
构建参考影像 SIFT 描述符	143.828	13.828	
最近邻/次近邻比值法匹配	140.609	14.093	
RANSAC 算法剔除错点	0.719	0.016	
总计	444.078	35.313	

虽然原始 SIFT 算法得到的匹配点对数是基于 Harris 算法的 SIFT 描述符匹配算法得到匹配点对数的 3.72 倍(参见表 6), 但是这些点对只是在局部地区更为密集(参见图 11), 本文提出的算法得到的匹配点对在全图分布情况与 SIFT 算法相当, 特征点匹配精度优于原始 SIFT 算法。而在时间效率上, 原始 SIFT 算法耗时则为本文算法的 12.58 倍, 故综合比较本文算法优于原始 SIFT 算法。

表 6 两种方法匹配结果对比

Table 6 Matching results comparison for two methods

匹配方法	匹配点对数	RMS
SIFT 特征点提取与匹配算法	186	1.002
基于 Harris 的 SIFT 描述符匹配	50	0.7505

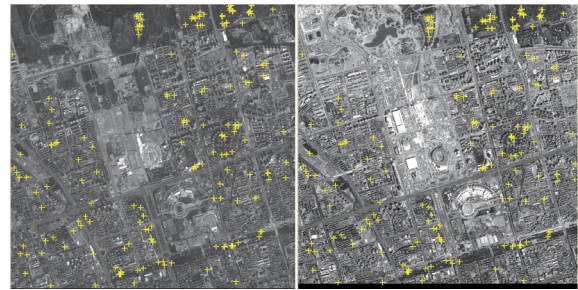


图 11 SIFT 算法匹配结果

Fig. 11 SIFT algorithm matching result

4 结论

根据高分辨率遥感影像特点, 提出一种快速的基于 Harris 算法和 SIFT 描述符的影像匹配方法。实验结果表明, 该方法在保证高分辨率遥感影像匹配效果的前提下, 具有了传统基于角点算法的灰度相关匹配所不具有的旋转不变性。同时, 该方法大大降低了原始 SIFT 算法特征点提取与匹配所需的时间, 提取出的便于人眼识别的角点对也可作为 SIFT 斑点的补充。

参考文献(References)

- [1] Li Y L. Study of mosaicing method in high resolution remote sensing images without geography coordinate[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy Of Sciences), 2005. [李豫玲. 无地理坐标高分辨率遥感影像镶嵌方法的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 中国科学院遥感应用研究所, 2005.]

- [2] Förstner W, Gülch E. A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features [C] // Proceedings of Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data. Interlaken, Switzerland: ISPRS, 1987:281-305.
- [3] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C] // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester, UK: The Plessey Company, 1988:147-151.
- [4] Zhang J Q, Pan L, Wang S G. Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003:97. [张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003:97.]
- [5] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International Journal on Computer Vision, 2004, 60(2):91-110.
- [6] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10):1615-1630.
- [7] Li X M, Zhen L, Hu Z Y. SIFT based automatic registration of remotely-sensed imagery [J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(6):885-892. [李晓明, 郑链, 胡占义. 基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准 [J]. 遥感学报, 2006, 10(6):885-892.]
- [8] Chen Y, Liu Q Y. The unmanned aerial vehicles remote sensing image registration based on SIFT algorithm and mahalanobis distance [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2009, 32(6):50-53. [陈裕, 刘庆元. 基于 SIFT 算法和马氏距离的无人机遥感图像配准 [J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(6):50-53.]
- [9] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.