

文章编号: 1007 4619(2006) 06 0885 08

基于 SIFT 特征的遥感影像自动配准

李晓明^{1, 2}, 郑 链¹, 胡占义³

(1. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081; 2 山西大学 数学系, 山西 太原 030006
3. 中国科学院 自动化研究所模式识别国家重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 遥感影像的自动配准是长期以来一直未能很好解决的一个重要问题。本文将视频图像匹配中获得巨大成功的 SIFT(Scale Invariant Feature Transform) 特征应用于遥感影像的自动配准问题中, 并且针对遥感影像的成像特点, 给出了一种具体的特征匹配方法。对航空和航天遥感影像在不同的变形、不同的光照变化和不同的分辨率下进行的大量实验表明, 该方法具有稳定、可靠、快速等特点。

关键词: 遥感影像; 自动配准; SIFT 图像配准

中图分类号: TP751. 1 文献标识码: A

SIFT Based Automatic Registration of Remotely-sensed Imagery

LI Xiaoming^{1, 2}, ZHENG Lian¹, HU Zhan-yi³

(1. Department of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Department of Mathematics, Shanxi University, Shanxi Taiyuan 030006, China;

3. National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Automatic registration of remotely-sensed imagery is a classical problem, and has not been well solved till now. In this paper, SIFT(Scale Invariant Feature Transform) feature, which has shown great success in computer vision, is introduced into image registration in remote sensing. In addition, we also proposed a feature matching approach based on the specific characteristic of the remote sensing imagery. Numerous experiments have been conducted for both aerial and satellite imageries under various conditions such as geometric distortion, illumination variation and different resolution. The results showed that our matching approach performs well and is stable, reliable and efficient.

Key words remotely-sensed imagery; automatic registration; SIFT(Scale Invariant Feature Transform); image registration

1 引 言

图像配准是遥感、医学、计算机视觉等很多领域中的一个基本问题。在遥感领域, 实现图像融合、变化检测、图像校正、图像镶嵌等应用中, 图像配准都是必不可少的一个关键步骤。由于遥感信息量大,

应用范围广, 因此实现自动配准一直是人们追求的目标。

提取和匹配图像特征是实现图像自动配准的一个重要环节, 关于这个问题的研究, 文献中已有大量报道, 如文献 [1—3]。典型的流程是: 首先在待配准的图像中分别选取一些显著特征, 如封闭区域、边缘、线段交点、角点等, 然后确定这些特征的对应关

收稿日期: 2005-09-05; 修订日期: 2005-11-23
基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (编号: 60375006)和山西省自然科学基金 (编号: 20051032)资助。
作者简介: 李晓明 (1965—), 男, 副教授, 现为北京理工大学在读博士生。目前与中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室合作, 从事遥感图像配准、计算机视觉和模式识别方面的研究工作, 已发表论文 10 多篇。 E-mail: xmlf@nlpriia.ac.cn

系。用于特征匹配的特征描述子和相似性度量标准有很多,如灰度相关、二值图像相关、链码相关、结构匹配、斜面匹配、不变矩之间的距离、动态规划和松弛法等等^[2],然而,对于遥感影像来说,由于成像条件和场景的复杂性,这些现有的技术仍然难以可靠地解决图像特征的对应问题^[4-5]。

近几年来,在计算机视觉领域,基于局部不变量描述子(Local Invariant Descriptor)的方法在目标识别和匹配方面取得了显著的进展。Mikołajczyk和Schmid^[6]针对不同的场景,对光照变化、图像几何变形、分辨率差异、旋转、模糊和图像压缩等6种情况,就多种最具代表性的描述子(如SIFT,矩不变量,互相关等10种描述子)进行了实验和性能比较,结果表明,在以上各种情况下,SIFT描述子的性能最好。

SIFT最初是作为一种关键点的特征提出来的,这种特征对图像的尺度变化和旋转是不变量,而且对光照的变化和图像变形具有较强的适应性,同时,这种特征还具有较高的辨别能力,有利于后续的匹配。正是借助于这些特点,使得传统图像配准中的许多诸如前面提到的共性问题得到了很大程度的改善。

基于SIFT描述子的匹配方法已被成功地应用到了很多领域,如目标识别^[7]、全景图拼接^[8],从运动恢复结构^[9]等。然而,就所能查阅的文献看,目前还没有SIFT在遥感图像配准问题中的应用研究。本文旨在研究SIFT在遥感图像配准中的性能。其次,本文还给出了一种针对遥感影像的具体匹配方法。针对遥感平台的高度比成像目标的高度要大得多的特点,本文采用整体几何约束来检验匹配的正确性,不仅提高了匹配的可靠性,而且具有实现简单的特点。最后,本文给出了部分航空和航天遥感影像在不同的变形、不同的光照变化和不同分辨率下的配准实验结果。实验结果表明,基于SIFT特征的方法应用于遥感图像配准中,同样具有精度高、鲁棒性强、稳定性高、速度快等优点,可望为遥感图像实现自动配准提供一些参考。

2 SIFT特征

SIFT特征的构造方法包括关键点的检测和描述子的构造两部分。

2.1 关键点(或兴趣点)检测

为了使特征具有尺度不变性,关键点检测是在多尺度空间完成的。关于多尺度空间理论和尺度不

变性理论可参看文献[7]和[10]。

主要原理为:将输入图像通过不同尺度(σ)的高斯核函数连续滤波和下采样(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DOG(Difference of Gaussians)金字塔多尺度空间表示。对DOG尺度空间每个点与相邻尺度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。

另外,通过曲面拟合的方法可以对关键点进行进一步的精确定位。

2.2 SIFT描述子的构造

在构造SIFT描述子之前首先为每个关键点赋予一个主方向。主方向是指关键点邻域内各点梯度方向的直方图中最大值所对应的方向。后续的描述子构造均以该方向为参照,这样所构造的描述子具有旋转不变性。

描述子的构造过程为:对任意一个关键点,在其所在的尺度空间(即高斯金字塔结构的某一层),取以关键点为中心的16像素 \times 16像素大小的邻域,再将此邻域均匀地分为4 \times 4个子区域(每个子区域大小为4像素 \times 4像素),对每个子区域计算梯度方向直方图(直方图均匀分为8个方向)。然后,对4 \times 4个子区域的8方向梯度直方图根据位置依次排序,这样就构成了一个4 \times 4 \times 8=128维的向量,该向量就是SIFT描述子。其中,第1维对应于第一个子区域的第一个梯度方向,第2维对应于第一个子区域的第2个梯度方向,第9维对应于第二个子区域的第一个梯度方向,依次类推。

2.3 SIFT特征的主要特点

从理论上说,SIFT是一种相似不变量,即对图像尺度变化和旋转是不变量。然而,由于构造SIFT特征时,在很多细节上进行了特殊处理,使得SIFT对图像的复杂变形和光照变化具有了较强的适应性,同时运算速度比较快,定位精度比较高。如:

- 在多尺度空间采用DOG算子检测关键点,相比传统的基于LoG(Laplacian of Gaussian)算子^[11]的检测方法,运算速度大大加快;
- 关键点的精确定位不仅提高了精度,而且大大提高了关键点的稳定性;
- 在构造描述子时,以子区域的统计特性,而不是以单个像素作为研究对象,提高了对图像局部变形的适应能力;

●对于 16×16 的关键点邻域和 4×4 的子区域, 在处理梯度幅度时都进行了类似于高斯函数的加权处理, 强化了中心区域, 淡化了边缘区域的影响, 从而提高了算法对几何变形的适应性;

●该方法不仅对通用的线性光照模型具有不变性, 而且对复杂的光照变化亦具有一定的适应性。

关于这部分内容的细节, 可参看文献 [7]。

3 基于 SIFT 特征的遥感影像对应点匹配方法

在文献 [7] 中, 采用 SIFT 特征匹配和聚类的方法, 来解决目标的识别问题。本文给出一种基于 SIFT 描述子的图像配准方法。

对遥感图像的自动配准而言, 希望能确定尽量多的、比较精确的且分布比较均匀的关键点, 然后通过数据拟合来减少整体误差。本文所采用的方法是: 首先根据最近邻 (NN) 和第二近邻 (SCN) 的距离之比 (NN / SCN), 选择那些可靠性较高的匹配点用来计算几何约束模型, 然后, 在这个几何模型的约束下, 再对其余可能的匹配点进行验证, 来扩展更多的匹配点对; 最后去除由于图像自相似或对称性造成的可能的错误匹配点对。具体步骤如下:

(1) 对 NN / SCN 设定较小的阈值 (在本文的实验中取 $NN / SCN \in [0.6 \ 0.7]$), 如果 SIFT 描述子之间的欧氏距离小于这个阈值, 确定为可能的匹配点对。

(2) 应用 RANSAC (Random Sample Consensus)^[12] 鲁棒方法, 通过几何一致性检验, 去除 Outliers 并初步估计几何约束模型。采用的几何模型为:

●对于近似同一视点获取的图像, 采用单应矩阵 (Homography Matrix) 约束模型。

●对于不同视点获取的图像, 采用基本矩阵 (Fundamental Matrix) 约束模型。

(3) 确定更多的匹配点对。除了根据 NN / SCN 确定的匹配点对外, 这一步对其余的、仅仅根据最近邻距离 (NN) 确定的可能的匹配点进行判断。如果这些点对满足第二步计算出来的基本矩阵或者单应矩阵约束条件, 判断为匹配对, 否则予以剔除。

(4) 调整匹配点对的局部分布。通过数据点来拟合几何模型时, 为了提高精度, 通常希望这些数据点能在图像中尽量均匀地分布。由于第三步得到的匹配点对大部分都是正确的, 这里可以在一定邻域内保留任意一个关键点, 而把分布比较密集的其他

关键点去除。

(5) 计算精确的几何约束模型。对已经确定的所有可能的匹配点对, 设定较小的容差 (Error Tolerance), 再一次应用 RANSAC 方法进行几何一致性检验。将少数精度较低的匹配点对当作 Outliers 去除。

(6) 不同视点图像对应点对的进一步验证 (仅对不同视点的图像而言)。不同于单应矩阵约束, 对于不同视点的图像配准问题, 由于极线约束并不能建立关键点的一一对应关系, 而遥感场景中自相似结构或对称结构是经常出现的, 因此, 需要进一步去除由于这些因素造成的错误匹配对。

通常, 遥感平台的高度比成像目标的高度要大很多, 这样, 可将地面成像目标近似看作处于同一平面。在这种假设下, 图像之间近似满足单应矩阵约束。对于航天遥感图像来说, 这种近似比较好, 但对于航空遥感图像来说, 由于航空遥感平台的高度比航天平台要低得多, 地形起伏的影响比较大, 因此这种近似效果相对较差。

本文所采取的策略是多次采用单应矩阵约束来选择 Inliers。该方法基于这样的假设: 假设这些匹配点近似分布于空间的某几个平面内, 这样, 对于同一个平面上的点来说, 满足某一单应矩阵约束条件。具体实现步骤是: 第一次先用 RANSAC 方法采用单应矩阵模型选择出部分 Inliers, 把这些点看作近似处于同一平面; 再对其余点对用同样的方法选择出另一部分 Inliers, 把这些点看作近似处于另一个平面, 这样重复多次, 直到剩余的点少于设定的某个阈值为止。实验发现, 一般通过 1—3 次就够了。

通过这样的处理, 可能会失去部分本来是正确的匹配点对, 但实验结果表明, 这种损失是很小的。

4 遥感图像配准实验

关于 SIFT 特征的性能, 已有多位作者针对数码相机图像进行过实验和比较。比如, 文献 [7] 的实验指出, 在图像噪声为 10% 的情况下, 仍有近 80% 的关键点的位置和尺度可以正确检测, 体现了 SIFT 特征的稳健程度; 再比如, 即使两幅图像的成像视点相差超过 50° 时, 最终可以正确检测到的特征仍然在 50% 以上, 这说明 SIFT 特征对几何形变具有较强的适应性; 正如前言中所述, 文献 [6] 已经对 10 种描述子的不同性能进行了测试和对比, 有兴趣的读者可参阅该文献了解更多的相关内容。

这一部分给出 SIFT 特征在遥感图像配准中的实验结果, 来检验本文给出的配准方法的可行性。由于这些图像都来自真实数据, 没有理论数据可参照, 无法给出定量的评价, 主要通过目视对结果进行主观评价, 希望能为读者提供一个参考作用。

4 1 不同视点的图像配准

图 1—图 3是三组不同场景的航空遥感图像的匹配情况。遥感图像是由航空飞机飞行过程中从不同视点拍摄, 然后经过数字化扫描得到的。

可以看出, 三组图像都同时包含了不同程度的几何变形和光照变化, 而且还存在其他噪声。实验结果表明: 第一, 该方法最初都可以检测到大量的关键点, 通常对 500×500 像素大小的图像, 可检测到 1000 点以上 (这与场景结构有关)。第二, 本文选用 NN-SCN (阈值选为 0.6) 筛选出的匹配点可靠性比较高, 说明这种选择是合理的。如图 1 中的两幅图中 (图像大小为 673×676 像素), 初始检测到的关键点分别为 1100 点和 682 点, 采用 NN-SCN 筛选出

的可能的匹配点为 290 对, 通过检验, 这 290 对匹配点全部是正确的, 即正确匹配点与所选出的匹配点的比率为 100%, 而在图 2 和图 3 中, 这个比率分别为 97% 和 91%。第三, 通过最近邻扩展更多的匹配点对是必要的, 通过这样处理, 最终的匹配点对增加了很多; 第四, 经过最后的单应矩阵约束检验, 由于图像自相似和对称结构造成的错误匹配会大大去除 (本实验中消除了所有的错误匹配点); 第五, 随着图 1、图 2 和图 3 综合噪声 (包括几何变形、光照变化和其他噪声) 的增大, 最终的匹配点对逐渐减少, 在图 1、图 2 和图 3 中的最终匹配点对分别为 259、132 和 69。第六, 关于精度问题, 通过目视, 没有发现明显的错误匹配点对。

4 2 不同分辨率的图像配准

图 4 和图 5 是卫星 SPOT5 对上海同一地区获取的不同分辨率的遥感图像。其中图 4 (a) 和图 5 (a) 是分辨率为 10m 的彩色图像, 图 4 (b) 和图 5 (b) 分别是分辨率为 5m 和 2.5m 的全色图像。

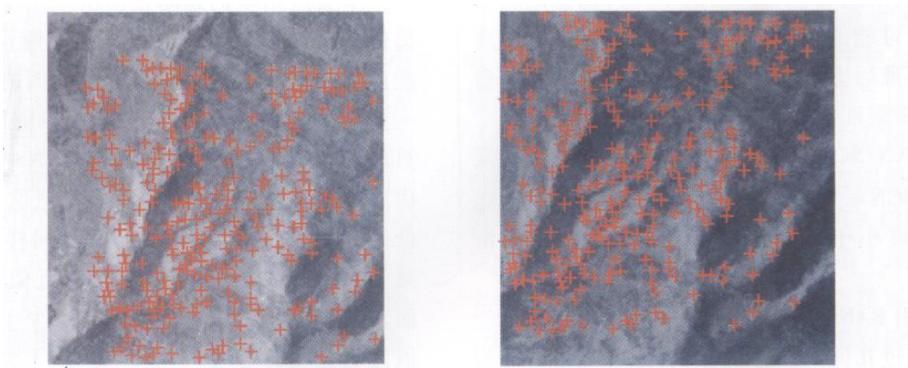


图 1 地形场景图关键点匹配
Fig.1 Keypoint matching for terrain scene

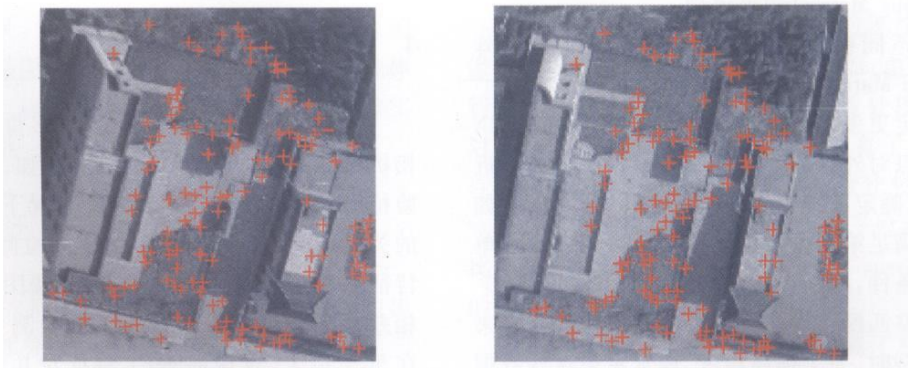


图 2 建筑场景图关键点匹配
Fig.2 Keypoint matching for building scene

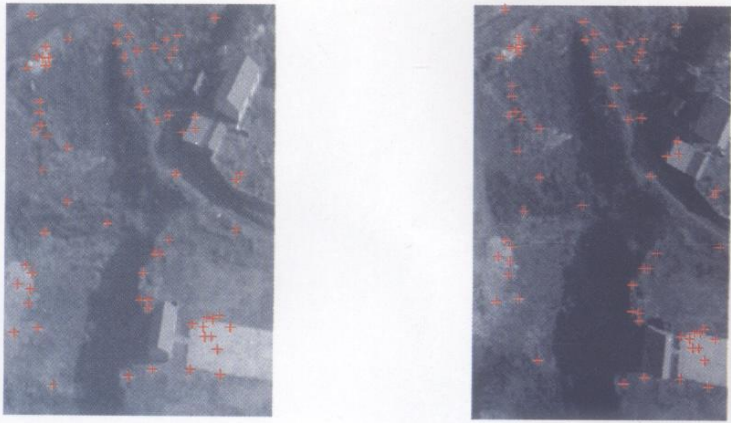
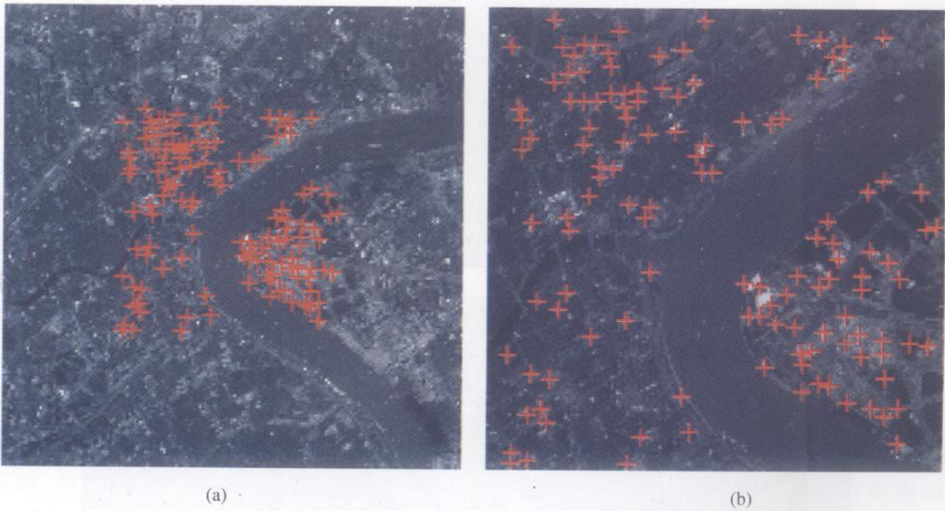
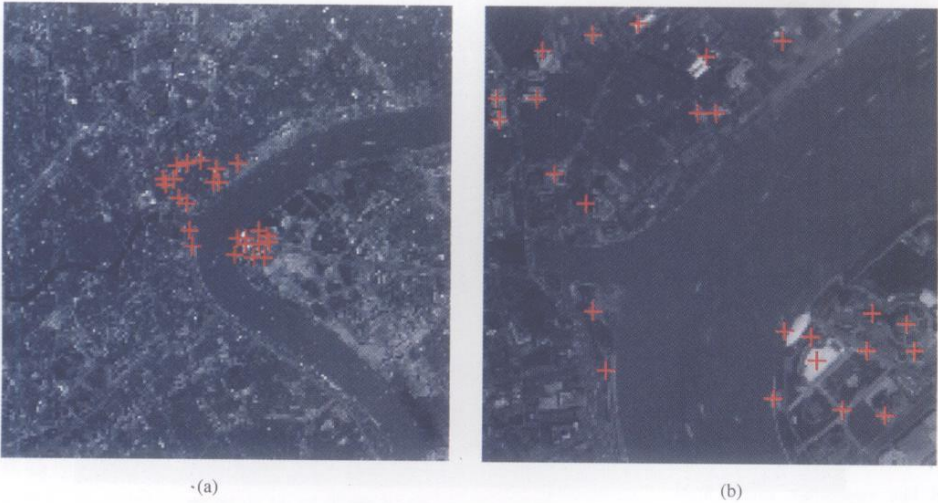


图3 城郊场景图关键点匹配
Fig.3 Keypoint matching for suburb scene



(a) (b)
图4 不同分辨率图像关键点匹配(1)
Fig.4 Keypoint matching for images with different resolution(1)



(a) (b)
图5 不同分辨率图像关键点匹配(2)
Fig.5 Keypoint matching for images with different resolution(2)

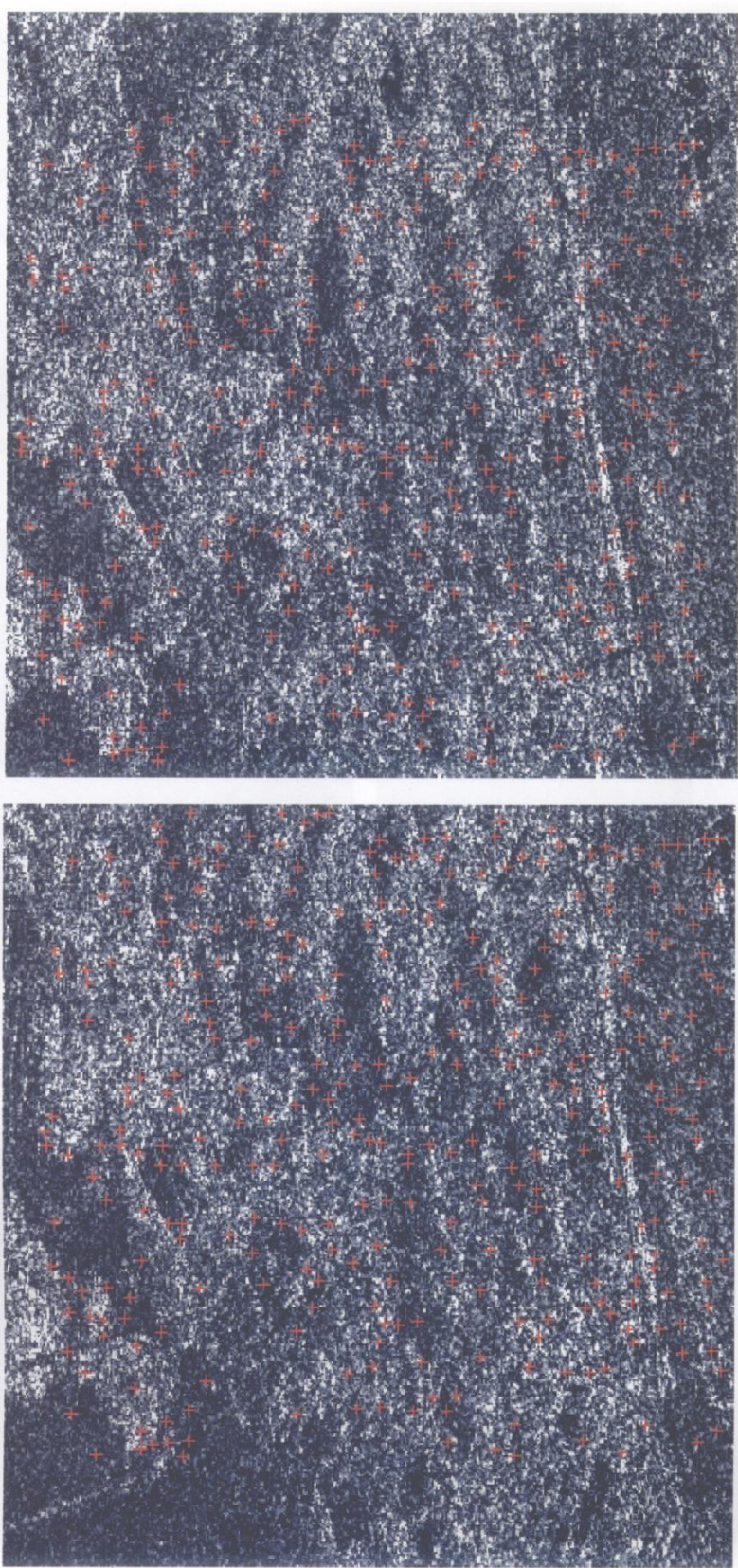


图 6 SAR 图像关键点匹配

Fig. 6 Keypoint matching for SAR images

匹配结果显示, 即使在分辨率相差 4 倍时, SIFT 描述子仍然可以检测出一定数量的可靠对应点。另一方面也可以看出, 分辨率相差越大, 相应的匹配点对也随之减少。如图 4 和图 5 中, 最终的匹配点对分别为 125 对和 24 对 (图像大小均为 512×512 像素)。另外值得注意的是, 即使两幅图像的重合部分较小, 仍然可以检测到不少正确的匹配点对, 这也是 SIFT 特征具有高辨别力的体现。

4 3 SAR 图像的配准

除了可见光波段图像外, 本文还对 SAR 干涉图像进行了实验。结果如图 6 所示 (注: 在对 SAR 图像的实验中, 仅使用了 SAR 图像的幅值图)。

在图 6 中, 两幅图像中的初始关键点分别为 3651 点和 3562 点, 采用本文第三部分描述的关键点匹配方法, 应用单应矩阵约束条件, 最终的匹配点为 328 对 (图像大小 523×504)。

可以看出, 这类图像具有类似纹理的结构, 即使人工选取控制点也是很困难的事。然而, 采用 SIFT 特征准确地检测出了大量的特征对应点, 这也再一次反映出 SIFT 特征具有很高的辨别能力。

最后说明一下该算法的速度问题。本文采用了 C 语言和 Matlab 混合编程, 匹配算法和程序代码还未进一步优化, 运行在奔腾 4 /2.8MHz 内存为 512 兆的计算机上。在这种情况下, 对 $700 \text{ 像素} \times 700 \text{ 像素}$ 大小的图像, 目前所需要的时间大约为几秒到几十秒之间。计算时间与图像大小和关键点的多少有很大的关系。

另外, 本文对大量的遥感图像对进行了实验, 均取得了满意的结果。由于页面限制, 仅报道了以上几组实验结果。

5 结 论

本文采用 SIFT 特征对遥感图像自动配准问题进行了实验研究。尽管遥感图像较数码相机图像具有更复杂的综合噪声, 但基于 SIFT 特征的自动配准方法应用于遥感图像时仍然取得了较好的效果。初步实验表明, 首先, 该方法在图像具有较复杂的变形 (包括几何变形、分辨率变化和光照变化等) 的情况下, 仍然可以准确地匹配到大量的稳定特征。另外, SIFT 特征在遥感图像中同样表现出较高的辨析能力, 从而简化了后续的匹配过程。

值得指出的是, 该方法也有一定的局限性。尽管

该方法可用于不同分辨率的图像配准, 但当分辨率相差超过 4 倍后, 稳定的特征点将变得很少, 甚至根本检测不到; 另外, 该方法仅适用于相同波段或相近波段的遥感图像配准, 对波段相差较大的图像不适用。

最后, 在结束本文之前, 以下两点需要特别注明一下:

(1) 遥感图像一般数据量很大, 本文实验仅仅使用了一小块图像。这主要是因为, 一是, 目前还没有处理遥感大数据量的专门软件, 二是, 正像引言中所述, 本文的主要目的是将视频图像中获得巨大成功的 SIFT 方法引入到遥感图像配准中, 所以本文主要关心的是 SIFT 特征对遥感图像中的辨析力及配准的效果, 计算效率不是目前考虑的重点 (当然, 对一个实用的系统来说, 效率同样是一个需要认真考虑的问题)。

(2) 本文没有给出本文方法与遥感影像配准中的一些经典的人机交互方法的比较, 这主要是因为: 首先, 本文的目的不是说本方法优于其他方法, 仅仅是引入一种新方法; 其次, 将一种人机交互方法与一种全自动方法进行比较也不是很客观和公正的; 再者, 人机交互方法与自动化方法进行比较也有一些技术困难。这主要是因为, 一是全自动方法一般可以得到大量匹配点, 而人机交互方法一般不可能取太多匹配点; 另一个是人机交互得到的控制点一般均有比较明显的几何或物理意义, 而全自动方法得到的匹配点对一般表示的是灰度变化的信息, 没有明显的几何或物理意义。

致 谢 感谢建设综合勘察研究设计院的王丹研究员提供大量航空遥感图像, 中国林业科学研究院资源信息研究所的李增元研究员提供干涉 SAR 图像及北京星图环宇科技有限公司的苏东卫博士提供 SPOT5 图像。

参 考 文 献 (References)

[1] Brown L G. A Survey of Image Registration Techniques[J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24: 325—376.
[2] Zitová B, Flusser J. Image Registration Methods: A Survey[J]. *Imaging and Vision Computing*, 2003, 21: 977—1000.
[3] Moigne J L, Campbell W J, Crump R E. An Automated Parallel Image Registration Technique Based on the Correlation of Wavelet Features[J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1849—1864.
[4] Kennedy R E, Cohen W B. Automated Designation of Tie points for Image to image Coregistration[J]. *International Journal of*

Remote Sensing 2003 **24**(17): 3467—3490.

[5] Bentouba Y, Taleb N, Kpalma K *et al*. An Automatic Image Registration for Application in Remote Sensing[J]. *IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing* 2005 **43**(9): 2127—2137.

[6] Mikolajczyk K, Schmid C. A Performance Evaluation of Local Descriptors[J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2005 **27**(10): 1615—1630.

[7] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale invariant Keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision* 2004 **60**(2): 91—110.

[8] Brown M, Lowe D G. Recognising Panoramas [A]. In Proceedings of the 9th International Conference on Computer Vision(ICCV03)[C]. Nice: October 2003.

[9] Schaflitzky F, Zisserman A. Multi view Matching for Unordered Image Sets or How do I Organize my Holiday Snaps? [A]. Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision (ECCV02)[C]. 2002.

[10] Lindeberg T. Scale Space Theory in Computer Vision[M]. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science. Kluwer Academy Publishers, Dordrecht, Netherlands 1994.

[11] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors[J]. *International Journal of Computer Vision* 2004 **60**(1): 63—86.

[12] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Automated Cartography[J]. *Communication of the ACM* 1981 **24**(6): 381—395.