

遥感影像仿射不变特征匹配的自动优化

程亮¹ 龚健雅² 韩鹏³ 宋小刚⁴

(1 南京大学地理信息科学系, 南京市汉口路 22 号, 210093)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(3 西安测绘研究所, 西安市雁塔中路 1 号, 710054)

(4 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京市德胜门外祁家豁子, 100029)

摘要: 针对基于仿射不变特征的遥感影像匹配技术, 提出了一种自动优化方法, 以进一步提高匹配准确性。根据典型需求形成了两套优化实施方案, 基于所提出的自动优化方法实现了相应具体算法。针对不同类型的多组影像, 自动优化的效果与相应方案的预定目标一致, 充分证明了本方法的有效性与适用性。

关键词: 仿射不变特征; 特征匹配; RANSAC; 自动优化; 匹配正确率

中图法分类号: P237.3

影像匹配问题一直是摄影测量与遥感、计算机视觉等领域研究的热点。遥感影像(包括卫星影像、航空影像等)信息量大、作用范围广、地物种类繁多, 面对千变万化的遥感影像, 现有的影像匹配方法仍然存在许多问题^[1]。影像不变特征检测与提取技术取得成功, 作为该领域的最新技术, 仿射不变特征提取技术已成功应用于遥感影像匹配^[2-4]。对于视角角度变化不大、纹理良好的遥感影像, 在仿射不变特征基础上进行特征匹配, 可以取得相当好的匹配效果。然而, 当视点角度变化大、重叠度小、纹理贫乏或高度重复的影像时, 仿射不变特征的匹配成功率迅速衰减, 因此, 针对仿射不变特征匹配的优化处理具有重要意义。

随机抽样一致性算法 RANSAC 作为当前最流行的鲁棒估计方法得到了广泛使用^[5]。利用 RANSAC 算法优化仿射不变特征匹配, 无疑值得研究。一般情况下, RANSAC 算法具有惊人的鲁棒估计能力, 甚至当样本中存在 50% 以上的误匹配时, 依然可以有效获取正确的匹配。然而, 基于 RANSAC 算法的仿射不变特征匹配优化技术仍存在一些问题: 针对不同类型影像, RANSAC 一致性检测时的容差阈值(文中简称为距离阈值)需要进行相应的调整, 才能获得期望的匹配优化效果。通常的方法是根据目视判断优化

效果人工逐步调整距离阈值以逼近优化的期望, 人工方式无法实现优化处理的自动化, 且随意性很大。

1 遥感影像仿射不变特征匹配自动优化方法

1.1 仿射不变特征匹配

本文方法的基本流程如图 1 所示。

在现有仿射不变特征检测算法中, 典型算子有^[6-8] MSER、Harris-Affine、Hessian-Affine、EBR、IBR 和 Salient regions。在大多数情况下, MSER^[6] (maximally stable extremal region detector) 算子相对具有最佳匹配能力^[9]。然而, MSER 算子检测出的特征为面特征, 几何形状为不规则区域, 相对 Harris-Affine 等算子几何定位精度不高。需要指出的是, 本文的目标旨在实现遥感影像的全自动匹配, 在无先验知识与几何约束等条件下, 对信息复杂、千变万化的遥感影像直接进行密集的精确定位, 可靠性难以得到保证且技术难度太大。本文从遥感影像处理的实际出发, 将自动匹配定位于自动的粗匹配。在此目标下, 匹配的可靠性要比匹配精度更具意义。本文选用 MSER 作为仿射不变特征检测算子。将当

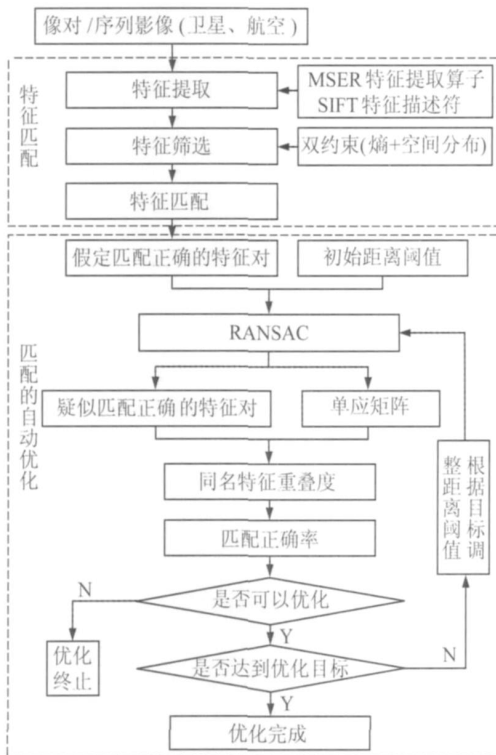


图 1 本文遥感影像仿射不变特征匹配自动优化方法的基本流程图

Fig. 1 Flow of Automated Optimization

前最佳的特征提取算子 MSER 和最佳的特征描述符 SIFT^[10-11]结合起来,完成仿射不变特征提取工作。

值得注意的是,某些情况下特征匹配的结果中误匹配的数量并不很多,利用 RANSAC 算法优化后效果适得其反,造成优化处理整体出错,这种情况多是由于误匹配的特征刚好密集分布在一起,造成了 RANSAC 估计发生错误。因此,本文在 RANSAC 优化前,采用了基于空间分布均衡性与信息量双重约束的特征筛选方法,对仿射不变特征提取的结果进行筛选,选取空间分布均衡、信息量大的特征,以有利于后续的特征匹配及其优化工作。基于空间分布均衡性与信息量双重约束的仿射不变特征筛选的方法,具体参见文献[2]。

经过特征筛选后,以欧氏距离为相似性度量进行特征匹配。两组特征进行匹配时,以某一特征与另一组所有特征两两计算距离,比较其中的最短距离与次短(second closest)距离,如果最短距离小于次短距离的 0.6 倍,则认为两两特征对应。

1.2 特征匹配的自动优化

1.2.1 匹配正确率

单应矩阵(homography)在多视几何中扮演了极其重要的角色,其表示两个平面之间的可逆齐次变换,已广泛应用于摄像机标定、三维重建、

图像拼接等领域。虽然单应矩阵的应用是有条件的,但其却适用于遥感影像的处理。针对遥感影像的特点,本文以单应矩阵为 RANSAC 算法的几何约束模型,同时以 MSER 算子与 SIFT 描述符共同作用获取的仿射不变特征为面域,受文献[9]启发,利用单应矩阵将同名特征区域套合,计算同名特征的重叠度,进而计算两组特征整体的正确匹配率,利用匹配正确率定量评价优化处理的质量。其具体计算方法如下。

1) 利用单应性矩阵将同名仿射不变特征区域套合,根据式(1)计算同名特征的重叠度:

$$\text{Overlap} = \frac{R_{\mu_a} \cap R_{(H^T)\mu_bH}}{R_{\mu_a} \cup R_{(H^T)\mu_bH}} \quad (1)$$

式中, a 、 b 表示立体像对; H 是单应性矩阵; R_{μ_a} 表示 a 片上某特征区域面积; $R_{(H^T)\mu_bH}$ 表示 b 片上的同名特征根据单应矩阵转换到 a 片上的特征区域面积; $R_{\mu_a} \cap R_{(H^T)\mu_bH}$ 表示对应特征区域的交集; $R_{\mu_a} \cup R_{(H^T)\mu_bH}$ 表示对应特征区域的并集。

2) 匹配正确率的计算首先需要地面真值(ground truth),本文在重叠度的基础上,假定如果同名特征区域的重叠度大于 50%,则认为两者一一对应,即此匹配为正确匹配。计算正确匹配数目与匹配对总数的比,即匹配正确率:

$$\text{Ratio}_{\text{CM}} = \frac{NB_{\text{CM}}}{NM_{\text{TM}}} \quad (2)$$

式中, NB_{CM} 表示正确匹配的数目; NM_{TM} 表示匹配对总数。

1.2.2 匹配的自动优化

根据预定的优化目标,在匹配正确率的指导下自动地逐步调整距离阈值,实现优化处理的自动化。具体步骤为:根据预定的优化目标确定 RANSAC 的初始距离阈值;根据特征匹配的结果与初始距离阈值,进行 RANSAC 的初步优化,得到疑似正确匹配的特征对与单应矩阵;根据单应矩阵将疑似正确匹配的特征对套合,计算匹配正确率;考察匹配正确率是否达到预定的优化目标,如果匹配正确率尚未达到预定目标,则需要根据目标要求调整距离阈值进行新一轮的 RANSAC 估计,如果匹配正确率已经达到预定目标,则优化结束。迭代的过程中,需要根据预定的目标,判断实际情况有无优化可能,如果发现无优化的可能,则直接终止。

2 两套典型的优化方案及实现算法

根据对匹配准确率、匹配特征数量要求的侧

重点不同,顾及现有技术水平,本文归纳出两套典型的优化方案。优化方案一:以剔除所有错误匹配为优化目标,不惜牺牲其中一些原本正确的匹配;优化方案二:以保留尽量多的正确匹配为目标,虽然难免包含一些错误的匹配,但要求严重误匹配(指对应特征的空间分布明显错误,与其余特征满足的几何约束严重不一致)必须被排除。

基于本文所提出的自动优化方法,方案一的具体实现算法如下(简称算法一)。

1) 以 MSER、SIFT 分别为仿射不变特征提取算子与特征描述符,在特征筛选的基础上进行特征匹配。

2) 以极小的数值(本文取值 10^{-6})作为初始距离阈值,利用 RANSAC 算法进行初步估计

3) 根据估计出的单应矩阵与疑似正确匹配,计算匹配正确率。如果匹配正确率不为 100%,则说明现有的匹配结果对于方案目标而言已无优化可能,优化终止;如果匹配正确率为 100%,进入下一步。

4) 进行第一次迭代,根据式(3)计算距离阈值的取值,跳转至步骤 3),进行新一轮的 RANSAC 优化。计算匹配正确率,直到找到匹配正确率为 100%时的最大距离阈值为止,优化处理成功结束。

$$f(n) = \begin{cases} 5 \times 10^{-\frac{n+1}{2}}, & n \text{ 为奇数} \\ 1 \times 10^{-\frac{n}{2}}, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3)$$

式中, n 为迭代次数。

优化方案二要求保留尽量多特征的同时,剔除严重误匹配。基于单应矩阵的匹配正确率计算模式使得此方案的实现成为可能,当特征匹配结果中存在严重误匹配或存在较多的误匹配时,单应矩阵的估计将会发生严重的偏差,此时在单应矩阵辅助下计算得到的匹配正确率必定异常低,通常都等于零。正是由于单应矩阵具有这样的敏感性使得我们可以断定,如果匹配正确率异常低,则说明特征匹配的结果中必然错误较多或者存在严重误匹配。实验表明,当匹配正确率为 30%或以上时,严重误匹配即会被完全剔除,剩余的误匹配也非常少。基于本文的自动优化方法,方案二的具体实现算法如下(简称算法二)。

1) 以 MSER、SIFT 分别为仿射不变特征提取算子与特征描述符,在特征筛选的基础上进行特征匹配。

2) 以极宽松的距离阈值(本文取值 512),进行 RANSAC 算法初步估计。

3) 根据优化后的疑似正确匹配与单应矩阵,计算匹配正确率。如果匹配正确率等于 0 或者异常低(小于阈值,本文取阈值 40%),则进入下一步;否则认为优化结果已经达到方案二的预定目标,优化结束。

4) 减小距离阈值跳转到步骤 3),距离阈值每次减小至原阈值的 1/2,重新进行 RANSAC 估计,直到匹配正确率大于阈值(40%)。

3 实验与分析

3.1 实验数据

为了测试本文仿射不变特征匹配自动优化方法的有效性与适用性,采用了多组不同类型的影像,进行仿射不变特征提取。根据文中的两套优化实施方案,对特征匹配结果进行了自动优化实验。实验数据包括一组卫星影像与两组航空影像,涉及不同视角变化、不同纹理特征、不同重叠度、不同空间分辨率的影像。卫星影像像对下载于 ISPRS 官方网站 www.isprs.org,为树木茂密地区的 IKONOS 影像,空间分辨率 1 m,大小约为 600 像素 \times 700 像素,如图 2 所示。图 3 为建筑物密集航空影像像对,拍摄于丹麦 Silkeborg 地区,像对的视角变化较大,左图为下视影像,右图为倾斜摄影影像,倾斜角为 46° ,实验影像约为 650 像素 \times 600 像素。图 4 为建筑物与树木混合的超高分辨率航空影像像对,影像空间分辨率为 5 cm,大小约为 3 200 像素 \times 2 000 像素,像对的重叠度很小。

3.2 实验结果与分析

采用 MSER 算子与 SIFT 描述符对三组遥感影像进行处理,在提取仿射不变特征的基础上,对所提取的特征基于空间分布与信息量双重约束进行筛选,再进行特征匹配。针对 IKONOS 卫星影像特征匹配的结果,分别按照优化方案一与优化方案二进行自动优化,效果如图 2 所示。根据方案一的目标,匹配正确率设为 100%,算法一迭代 5 次,耗时约 270 s(耗时包括特征匹配、匹配的自动优化两部分的处理时间,算法由 Matlab 实现),自动获取的距离阈值为 0.005,获得特征对 119 对。通过人工目视检查,没有发现错误的匹配,所有对应特征对均为正确匹配,如图 2(a)所示。根据方案二的目标,此时匹配正确率设定为大于 40%,算法二迭代 5 次,耗时约 320 s,自动获取的距离阈值为 16,共有特征对 179 对。通过人工目视检查,发现其中存在 5 对错误匹配,如图 2(b)所示。

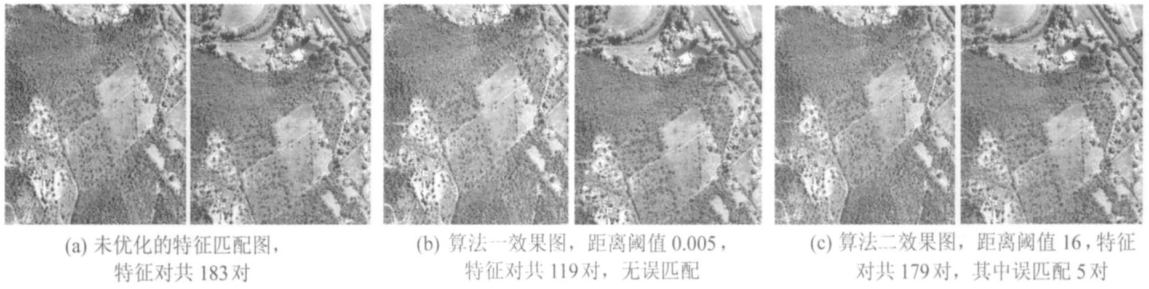


图 2 卫星影像仿射不变特征匹配的自动优化 (IKONOS 影像, 树木茂密)

Fig. 2 Results of Automated Dptimization

图 3 显示了针对视角变化大、建筑物密集的航空影像仿射不变特征匹配的优化效果,图 3(a)、(b) 分别是根据方案一、方案二进行自动优化的效果。根据方案一,匹配正确率设为 100%,算法一迭代 8 次,耗时约 360 s,自动获取的距离阈值为 0.01,共获得特征对 114 对。通过人工目视检查,没有发现错误的匹配,所有对应特征对均为正确匹配。根据方案二,此时匹配正确率需要大于 40%,算法二迭代 5 次,耗时约 300 s,自动获取的距离阈值为 16,共有特征对 135 对。目视发现其中存在 4 对错误匹配。图 4 显示了方法处理超分辨率、建筑物树木混合纹理、重叠度小的航空影像的效果,图 4(a)、4(b) 分别是根据方案一、方案二进行自动优化的效果。根据方案一,算法一迭代 6 次,耗时约 280

s,自动获得阈值为 0.001,获得 29 对正确的匹配,无错误匹配;根据方案二,算法二迭代 10 次,耗时 390 s,自动获取的阈值为 0.5,获得 47 对匹配,目视检查无错误匹配。

三组影像仿射不变特征匹配的优化处理效果相当,算法一虽然牺牲了部分正确的匹配,但确保了所有错误匹配被剔除;算法二剔除了严重误匹配的同时可能保留了个别误匹配,但获得了相对算法一更多的正确匹配,三组实验中算法二比算法一获取的正确匹配数分别多 46%、15%、62%。实验中使用了不同纹理特征、不同视角变化、不同重叠度、不同分辨率的影像,两套算法自动优化效果与相应方案的预定目标一致,证明了本文优化方法的有效性与适用性。



图 3 航空影像仿射不变特征匹配的自动优化 (建筑物密集,视角变化大)

Fig. 3 Results of Automated Optimization

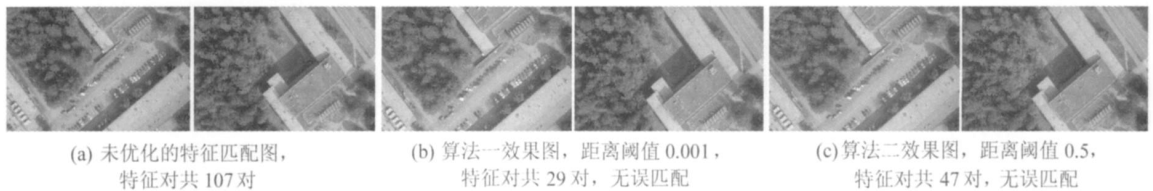


图 4 航空影像仿射不变特征匹配的自动优化 (超分辨率,建筑物树木混合,重叠度小)

Fig. 4 Results of Automated Optimization

参 考 文 献

[1] 朱庆,吴波,赵杰. 基于自适应三角形约束的可靠影像匹配方法[J]. 计算机学报,2005, 28(10): 1 734-1 739

[2] Remondino F. Detectors and Descriptors for Photogrammetric Applications[C]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bonn, Germany, 2006

[3] Labe T, Forstner W. Automatic Relative Orientation of Images[C]. The 5th Turkish-German Joint

- Geodetic Days, Berlin, 2006
- [4] 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
- [5] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- [6] Matas J, Chum O, Urban M, et al. Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(10): 761-767
- [7] Tuytelaars T, Gool L Van. Matching Widely Separated Views Based on Affine Invariant Regions[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(1): 61-85
- [8] Mikolajczyk K, Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(1): 63-86
- [9] Mikolajczyk K, Tuytelaars T, Schmid C, et al. A Comparison of Affine Region Detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 65(1/2): 43-72
- [10] Mikolajczyk K, Schmid C. A Performance Evaluation of Local Descriptors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(10): 1 615-1 630
- [11] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110
- [12] Cheng Liang, Gong Jianya, Yang X, et al. Robust Affine Invariant Extraction for Image Matching[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2):

第一作者简介:程亮,博士,主要从事数字摄影测量、LiDAR 数据处理等方面的研究。

E-mail:geocl@163.com

Automatic Optimization for Affine Invariant Feature Matching on Remote Sensing Imagery

CHENGLiang¹ GONGJianya² HAN Peng³ SONG Xiaogang⁴

(1 Department of Geographic Information Science, Nanjing University, 22 Hankou Road, Nanjing 210093, China)

(2 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(3 Xi'an Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an 710054, China)

(4 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Qijiahuozi, Beijing 100029, China)

Abstract: An automated optimization method for affine invariant feature matching on remote sensing imagery is proposed. The correct matching rate is developed as an evaluation criterion of the optimized processing for affine invariant feature matching, which guarantees the quality of the optimized processing and realizes automated processing. Overlap rate is calculated by projecting a local region onto the corresponding region based on homography, upon which a correct matching rate is determined. For different purposes, two classical optimization solutions are introduced. The algorithm for each solution is implemented based on the proposed method. By using one stereo satellite image and two stereo aerial images with different types, the experiment indicates that the results of feature matching can be optimized automated and accurately by our method according to corresponding optimization solution.

Key words: affine invariant feature; feature matching; RANSAC; automated optimization; correct matching rate

About the first author: CHENGLiang, Ph. D. His research interests cover digital photogrammetry and LiDAR data processing.
Email: geocl@163.com