

代安进,戴华阳,阎跃观,等.基于 Delaunay 三角网约束的倾斜影像匹配[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,38(2): 35-40. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.005

DAI A J, DAI H Y, YAN Y G, et al. Oblique Images Matching Based on Delaunay Triangulation Constraint[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2): 35-40. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.005

基于 Delaunay 三角网约束的倾斜影像匹配

代安进,戴华阳*,阎跃观,朱元昊,赵传武

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:针对倾斜影像存在尺度变化大、匹配困难的问题,提出一种基于 Delaunay 三角网约束的倾斜影像匹配方法.首先检测影像上的最大稳定极值区域(Maximally Stable Extremal Regions, MSER)作为初始匹配点,然后利用这些初始匹配点构建 Delaunay 三角网,并以同名三角形、核线、灰度等作为约束条件,迭代匹配左、右影像上三角网内的尺度不变特征变换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)特征点.试验表明:所提方法能获得可靠的匹配结果,匹配点分布均匀,具有较高的匹配正确率和匹配精度.

关键词:倾斜影像;特征匹配;Delaunay 三角网;最大稳定极值区域;尺度不变特征变换

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)02-0035-06

Oblique Images Matching Based on Delaunay Triangulation Constraint

DAI Anjin, DAI Huayang, YAN Yueguan, ZHU Yuanhao, ZHAO Chuanwu

(College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems caused by large scale variation of oblique images, a matching algorithm for oblique images based on Delaunay triangulation is proposed in this paper. Firstly, the initial set of matching points is detected by the method of maximally stable extremal regions (MSER), and then the Delaunay triangulation is constructed by these points. Secondly, corresponding points obtained from the set of scale-invariant feature transform (SIFT) featured by traversing every triangle in turn, with constraint conditions of corresponding triangles, epipolar constraint and intensity correlation. The experiments results show that the proposed algorithm could obtain reliable matching results, and has advantages in terms of matching points distribution, correct matching rate and registration accuracy.

Keywords: oblique images; feature matching; delaunay triangulation; maximally stable extremal regions; scale-invariant feature transform

倾斜摄影测量是近年来新发展起来的一项测绘技术,在三维重建、建筑物提取、国土资源等方面已经得到了广泛的应用^[1-3].但在影像获取时,不同拍摄角度的传感器会导致同一地物在倾斜影像和正射影像上呈现出较大的几何畸变和辐射畸变,增加影像匹配的难度,因此,倾斜影像匹配一直是国内外学者研究的热点^[4-6].

收稿日期:2020-09-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574242; 51404272)

*通信作者, E-mail: dhy@cumtb.edu.cn

影像匹配主要包括基于灰度匹配和基于特征匹配两类,但对于存在较大几何畸变的倾斜影像来说,基于特征匹配的方法更为适合^[7-8].目前,SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)算法、SURF(Speeded Up Robust Features)算法、ASIFT(Affine-Scale-Invariant Feature Transform)算法、MSER(Maximally Stable Extremal Regions)算法、Hessian-Affine算法和Harris-Affine算法等已经应用到倾斜影像匹配中.闫利等^[9]使用SIFT算法对大范围的倾斜影像进行匹配,实现了“空三”过程的全自动处理;VERYKOKOU等^[10]使用SURF算法提取特征点,并采用随机抽样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)算法进行提纯,实现倾斜影像和正射影像的配准;肖雄武等^[11]基于ASIFT算法提出一种具有视点不变性的倾斜影像快速匹配方法,该方法通过估算影像的相机轴定向参数和计算初始仿射矩阵,再对倾斜影像进行逆仿射变换,然后完成匹配;韩宇^[12]针对倾斜影像存在仿射变形的问题,应用MSER算法提取仿射不变特征,并利用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)剔除初始匹配中定位精度差的点对,得到精度较高的匹配点对;姚国标等^[13]采取将不同算法结合的思路,融合Hessian-Affine和Harris-Affine这2种仿射不变特征算法,在初始匹配的基础上利用归一化互相关(Normalized Cross Correlation, NCC)测度消除误匹配,再通过最小二乘匹配和投影变换模型提高配准精度.

由上述方法得到的倾斜影像匹配结果,往往也存在一些不足:SIFT算法和SURF算法等对于倾角较大影像的鲁棒性较差;ASIFT算法是一种模拟算法,其计算复杂度高,效率比较低;MSER算法、Hessian-Affine算法和Harris-Affine算法等虽然能有效检测倾斜影像上的仿射不变特征,但由于仅单独使用其中的某一种算法,匹配点的点位精度一般比较低.因此,针对这些问题,本文提出一种以稳定的Delaunay三角网为区域约束条件,融合MSER算法和SIFT算法的倾斜影像匹配方法.

1 理论与算法

1.1 MSER算法和SIFT算法

MSER算法是一种图像仿射不变区域检测算法,最早由Matas等于2002年提出,该算法受到分水岭思想的启发,通过寻找图像中灰度值总大(小)于其邻域的像素区域,确定最大(小)稳定极值区域^[14].通过试验,MIKOLAJCZYK等^[15]对目前常用的仿射不变特征区域检测算法进行了比较,结果表明:在不同影像畸变的情况下,MSER算法的稳定性最好.因此,该算法被广泛地应用于影像匹配.

SIFT算法是目前最常使用的图像特征提取算法之一,由LOWE^[16]在1999年提出.SIFT算法首先需要构建高斯差分(Different of Gaussians, DOG)尺度空间,然后在尺度空间上进行极值检测,并消除边缘响应,确定关键点方向及生成描述子,最后得到SIFT特征.该算法具有旋转、尺度不变性,同时对影像间的视角变化、噪声、仿射畸变等也具有一定的稳定性.

1.2 本文算法

本文采用基于Delaunay三角网约束的方法对倾斜影像进行匹配,算法流程如图1所示.首先,采用MSER算法对左、右影像进行特征检测,并将检测到的特征点作为初始匹配点;以左影像为参考影像,并将其初始匹配点作为顶点构建Delaunay三角网,同时在右影像上建立与之相对应的同名三角网,以约束迭代区域;然后,使用SIFT算法分别对左、右影像进行特征检测,并将其作为迭代匹配的候选点;以同名三角网为迭代区域,通过面积、最小内角等约束剔除“狭长三角形”;在确定“良好三角形”的情况下,将三角形内部的SIFT特征点作为候选匹配点集,通过核线、灰度等约束确定新的同名点;最后,以包括初始匹配点和新的同名点的点集为基础,重新构建同名三角网,继续迭代,直到匹配点数量满足一定条件或者不再产生新的同名点为止,迭代结束.

1.2.1 约束条件

1)同名三角形约束.在构建Delaunay三角网时,不可避免地存在一些“狭长三角形”或面积较小的三角形,而此类三角形内部通常缺少足够的影像特征,因此,为了减少误匹配和提高算法效率,在迭代过程中需要对其进行剔除.本文采用三角形面积和三角形最小内角2个指标来进行约束.

2)核线约束.为了提高匹配效率和精度,根据同名点位于同名核线上的原理,在迭代过程中引入核线约束,将搜索维度由二维降为一维.首先,利用初始匹配点计算出基础矩阵,并计算左影像上所迭代特征点

的对应核线,在右影像上计算待匹配点到该核线的距离,接着进行阈值判断,即该距离如果小于设定的距离阈值,则满足核线约束条件,进入下一步;否则,即视为误匹配点,需要剔除.

3) 灰度约束.在匹配过程中,候选点之间的灰度相关程度也是一个重要的指标,一般使用 NCC 算法来计算两影像的灰度相关系数^[17].然而,由于倾斜影像存在仿射变形,NCC 算法难以获得可靠的结果.本文提出一种改进的 NCC 匹配算法来计算两影像间的灰度相关系数,从而对倾斜影像的匹配点进行正确的灰度约束^[8].

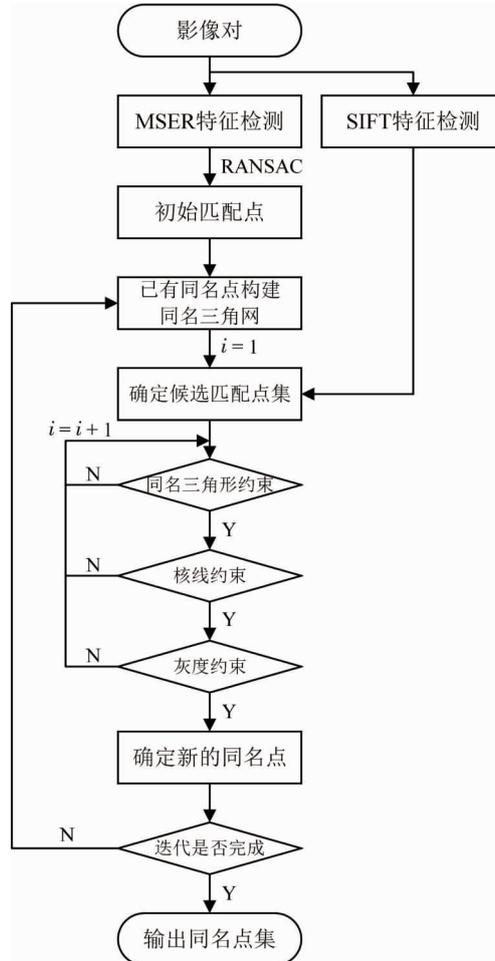


图 1 算法流程

1.2.2 算法原理

首先对待匹配影像上的模板进行仿射变换,得到一个“平行四边形”模板;然后对其进行二次线性插值,得到与参考影像上的模板大小相同的窗口;最后,按照式(1)计算 2 个模板的灰度相关系数 γ .

$$\gamma = \frac{\sum_{u=-w}^w \sum_{v=-w}^w (g_{u,v} - \mu_g) (g'_{u,v} - \mu'_g)}{\sqrt{\sum_{u=-w}^w \sum_{v=-w}^w (g_{u,v} - \mu_g)^2 \sum_{u=-w}^w \sum_{v=-w}^w (g'_{u,v} - \mu'_g)^2}} \quad (1)$$

式中: $g_{u,v}$ 和 $g'_{u,v}$ 为左、右影像相关窗口内 (u, v) 处的灰度值; μ_g 和 μ'_g 为左、右影像相关窗口内的灰度平均值; w 为相关窗口的尺寸.

1.2.3 特征检测

首先利用 MSER 算法分别对左、右影像进行特征检测,并采用 RANSAC 算法剔除错误的匹配点,然后获得左、右影像的初始匹配点,分别存储在 2 个点集上.同时,分别在左、右影像上检测 SIFT 特征点,并作为随后迭代匹配的候选点.

1.2.4 构建同名三角网

在初始匹配点的基础上,构建左、右影像的同名三角网.以左影像为参考影像,以它的初始匹配点集作为三角形的顶点,构建 Delaunay 三角网;按照对应匹配的同名点,在右影像上直接构建三角网,与左影像形成同名三角网,并分别存储在 2 个三角网集合中.

1.2.5 约束迭代

在筛选后的“良好三角形”集合中,依次迭代,确定新的同名点.在试验中,设置三角形面积阈值为 30,三角形最小内角阈值为 15° ,核线距离阈值为 0.5,灰度相关系数阈值为 0.75.每一次迭代结束后,即将新确定的同名点分别存储到左、右影像的同名点集,并根据预先设置的条件决定是否继续迭代,如果不满足,则将初始匹配点和新的同名点共同作为三角形的顶点,重新构建同名三角网,继续迭代.如果迭代已经不能产生新的同名点,则迭代结束并输出同名点集.

2 试验结果与分析

2.1 试验数据和环境

为验证本文算法的有效性,选取 3 组不同类型的影像进行匹配试验.试验影像如图 2 所示,图 2 来自 MIKOLAJCZYK 提供的公开影像数据集^[15].图 2 各子图中左侧为参考影像,右侧为待匹配影像,其中,图 2a 影像分辨率为 850×600 像素,具有旋转和缩放变化,纹理丰富;图 2b 影像分辨率为 800×640 像素,是不同视角下的立体像对;图 2c 为无人机倾斜影像,影像分辨率为 $6\,000 \times 4\,000$ 像素,存在明显的仿射畸变.试验基于 Windows10 X64 操作系统、MATLAB R2018a 和 VLFeat 开源计算机视觉库进行.

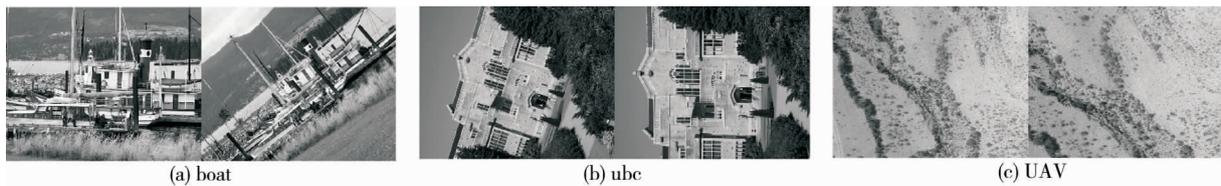


图 2 试验影像

同时,为了有效地评价试验结果,分别采用匹配点数 N_t 、正确匹配点数 N_c 、匹配正确率 C_r 、匹配精度 ε 等指标对算法性能进行分析.

$$C_r = \frac{N_c}{N_t} \times 100\%; \quad (2)$$

$$e = \text{dis}(x', \mathbf{H}_{\text{true}}x); \quad (3)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N_t} \left\{ \sum_{i=1}^{N_t} [\text{dis}(x'_i, \mathbf{H}_{\text{true}}x_i)]^2 \right\}}. \quad (4)$$

式中: e 为点位误差; x 和 x' 为影像对上一对同名点的坐标; \mathbf{H}_{true} 为影像对间的真实单应矩阵; $\text{dis}()$ 为求解欧式距离.

按照式(3)计算各匹配点对的点位误差 e ,若 $e < 1.5$ 则认为是正确匹配点;反之,则认为是错误匹配点.匹配精度 ε 的值越小,即匹配精度越高.

2.2 结果与分析

采用本文算法对 3 组测试影像进行匹配试验,试验结果如图 3~图 5 所示.图 3a 是首次迭代时以 MSER 作为特征点建立的 Delaunay 三角网,图 3b 中的填充三角形是根据三角形面积阈值和三角形最小内角阈值确定的“狭长三角形”.可以发现,这些三角形大多分布在三角网的边缘处,数量较少,而且其内部特征也不丰富,在寻找特征点的过程中,

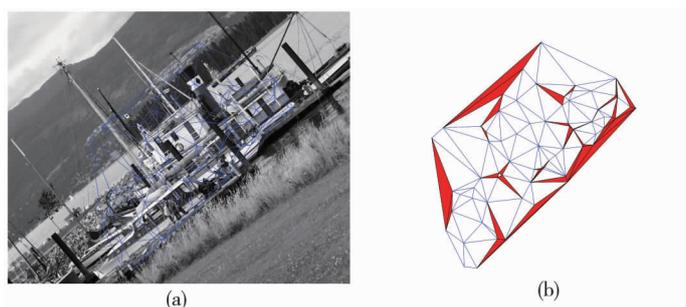


图 3 狭长三角形

可以去除它们以减少不必要的迭代,提高算法效率。

图 4 为以 MSER 作为特征点构建的 Delaunay 三角网,以及迭代得到的 SIFT 特征点(“十”字形)的分布情况。由图 4 可知:三角网基本覆盖了各像对间的重叠部分,满足立体像对匹配的要求;虽然 MSER 特征点的数量较少,分布稀疏,但三角形内部的 SIFT 特征点数量较多,且均匀分布在三角网内部,说明本文融合 MSER 和 SIFT 这 2 种算法得到的特征点能够有效地互相补充。在图 4c 中,由于该无人机影像所拍摄的区域植被稀疏,存在大量裸地,没有明显的特征地物,因此,匹配点主要集中在三角网边缘植被处,中部几乎没有匹配点。

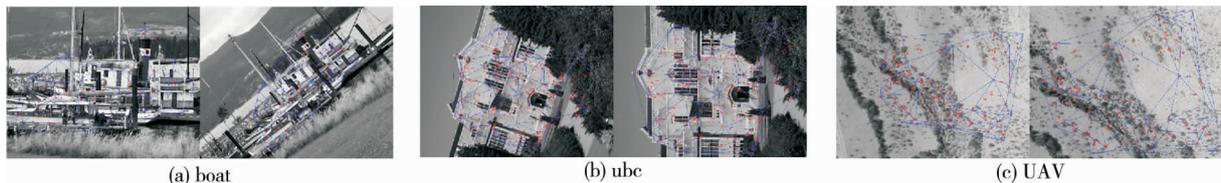


图 4 Delaunay 三角网及匹配点分布

图 5 是本文算法得到的匹配点连线效果图。由图 5 可知:在不同类型的畸变测试影像中,本文算法都得到了较好的结果。

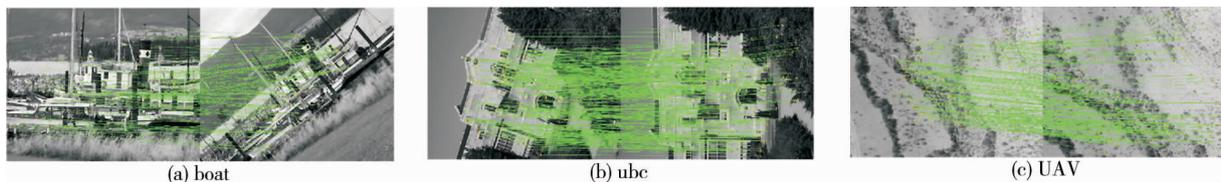


图 5 本文算法匹配结果

为了进一步验证本文算法的性能,将本文算法与文献[18-19]的算法进行对比,所得结果如表 1 所示^[18-19]。由表 1 可知:本文算法的匹配正确率和匹配精度都优于文献[18-19]的匹配方法。在匹配点数方面,由于本文算法采用 Delaunay 三角网进行局部区域约束,导致影像的边缘区域会丢失少量的特征点,因此,特征点在整体数量上少于另外 2 种算法,但倾斜影像的边缘区域本身就具有较大畸变,在特征点检测时也表现出不稳定性。虽然本文算法的匹配点数少于另外 2 种算法,但其具有较高的匹配正确率和匹配精度。同时,针对特征地物较少、匹配难度较大的无人机倾斜影像,本文算法也表现出良好的匹配效果,说明该算法具有较强的鲁棒性。对于不同畸变类型的影像,综合匹配点数、匹配正确率和匹配精度这 3 个指标,本文算法都得到了较好的匹配结果。

表 1 不同算法匹配结果

试验影像	算法	匹配点数 N_t	匹配正确率 C_t	匹配精度 ε
第一组 (boat)	文献[18]算法	263	0.93	1.64
	文献[19]算法	251	0.83	4.15
	本文算法	216	0.96	0.85
第二组 (ubc)	文献[18]算法	394	0.95	1.03
	文献[19]算法	382	0.87	3.92
	本文算法	362	0.98	0.97
第三组 (UAV)	文献[18]算法	228	0.95	1.44
	文献[19]算法	219	0.86	3.78
	本文算法	208	0.97	1.31

3 结论

1) 基于 MATLAB 仿真试验,验证了采用 Delaunay 三角网约束,融合 MSER 和 SIFT 算法实现倾斜影像匹配的可行性。

2)根据 MSER 和 SIFT 算法各自的优点,提出一种以 MSER 作为特征点构建 Delaunay 三角网,通过同名三角网、核线、灰度等约束条件迭代匹配 SIFT 特征点的倾斜影像匹配方法.

3)本文算法得到的匹配点分布均匀,匹配正确率和匹配精度较高,对于不同畸变类型的影像都具有较强的鲁棒性.

4)由于无人机倾斜影像具有较高的空间分辨率,这给特征点的检测增加了时间成本,在后续的研究中将进一步提高算法的时效性.

参考文献:

- [1] 周晓敏,孟晓林,张雪萍,等.倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法[J].测绘科学,2016,41(9):159-163.
- [2] 李德仁,肖雄武,郭丙轩,等.倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(6):711-721.
- [3] 韩杰,王争.无人机遥感国土资源快速监测系统关键技术研究[J].测绘通报,2008(2):4-6.
- [4] GRUEN A. Development and status of image matching in photogrammetry[J]. Photogrammetric Record, 2012,27(137):36-57.
- [5] 姚国标.倾斜影像匹配关键算法及应用研究[J].测绘学报,2015,44(3):354.
- [6] 孙钰珊,张力,艾海滨,等.倾斜影像匹配与三维建模关键技术发展综述[J].遥感信息,2018,33(2):1-8.
- [7] 张培佩,王永波,宋伟.基于改进 SIFT 算法的无人机影像匹配[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):90-95.
- [8] 余美.倾斜立体影像匹配若干问题研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [9] 闫利,叶志云.几何约束条件下的 SIFT 倾斜影像匹配[J].测绘通报,2016(1):37-40.
- [10] VERYKOKOU S, IOANNIDIS C. Automatic rough georeferencing of multiview oblique and vertical aerial image datasets of urban scenes[J]. Photogrammetric Record, 2016,31(155):281-303.
- [11] 肖雄武,郭丙轩,李德仁,等.一种具有仿射不变性的倾斜影像快速匹配方法[J].测绘学报,2015,44(4):414-421.
- [12] 韩宇.基于 MSER 特征的无人机倾斜影像匹配算法[J].矿山测量,2018,46(2):37-40.
- [13] 姚国标,邓喀中,张力,等.融合互补仿射不变特征的倾斜立体影像高精度自动配准方法[J].测绘学报,2013,42(6):869-876.
- [14] 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.
- [15] MIKOLAJCZYK K, TUYTELAARS T, SCHMID C, et al. A comparison of affine region detectors[J]. International Journal of Computer Vision, 2005,65(1):43-72.
- [16] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004,60(2):91-110.
- [17] 杨通钰,彭国华.基于 NCC 的图像匹配快速算法[J].现代电子技术,2010,33(22):107-109.
- [18] 刘欢,肖根福,欧阳春娟,等.初-精结合和多特征融合的多源遥感图像配准[J].遥感信息,2018,33(6):61-70.
- [19] 王晓华,邓喀中,杨化超.集成 MSER 和 SIFT 特征的遥感影像自动配准算法[J].光电工程,2013,40(12):31-38.