

GPS 拒止条件下的景象匹配导航方法研究*

李家松¹, 李明磊¹, 魏大洲², 李威², 吴伯春²

(1.南京航空航天大学 电子信息工程学院,江苏 南京 210016;2.中国航空无线电电子研究所,上海 200233)

摘要:提出了一种在 GPS 拒止条件下使用视觉词袋辅助航空景象匹配导航的方法。在景象匹配导航任务中,基准地图比空中探测的图像具有更大的覆盖范围,当基准地图有大量相似或重复纹理特征出现时,仅依靠特征匹配难以得出正确的对应关系。首先对基准卫星影像地图进行区块划片,并利用视觉词袋技术对每一片区块进行编码,利用统计特性计算局部区块特征矢量,即区块特征直方图;然后,对空中探测图像使用同一词袋进行编码,用于从大量候选区块中筛选出初始对应区块;最后,使用尺度不变特征进行精配准并计算飞行器相对位置。实验使用了直升机拍摄的空中影像与高清卫星影像中提取的基准地图进行实验分析,并与先进技术进行比较,结果表明该方法具有良好的匹配可靠性和配准精度,能够在 GPS 拒止条件下为基于景象匹配的航空飞行器定位需求提供支持。

关键词:视觉词袋;飞行器定位;景象匹配;区块匹配;图像配准

中图分类号:TN967.2

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211575

中文引用格式:李家松,李明磊,魏大洲,等. GPS 拒止条件下的景象匹配导航方法研究[J].电子技术应用,2022,48(3):88-93.

英文引用格式:Li Jiasong, Li Minglei, Wei Dazhou, et al. Research on scene matching navigation method under GPS-denied environments[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 88-93.

Research on scene matching navigation method under GPS-denied environments

Li Jiasong¹, Li Minglei¹, Wei Dazhou², Li Wei², Wu Bochun²

(1.College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2.China Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: This paper presents a visual word-based method for scene-matching aided navigation, which can work under GPS-denied environment. Since the reference satellite images may have many similarities and repetitive textures, it is difficult to initialize the correct correspondences between the reference satellite images and the aerial images only by feature matching. The paper proposes a bag of visual word(BOVW) based method to find the initial corresponding region. First, the reference satellite image is divided into blocks and encoded each block by BOVW model to generate a feature vector, namely block feature histogram. Then, the aerial images are encoded with the same model for screening the initial region from a large collection of blocks. Finally, the scale-invariant features are used to refine registration and calculate the accuracy position. In this paper, the aerial images taken by helicopters and the reference maps extracted from high-resolution satellite images are used for experimental analysis, and the performance is validated by extensive comparisons to state-of-the-art techniques. The experimental results show that the proposed method has good matching reliability and registration accuracy, and can provide support for aircraft positioning requirements based on scene-matching under GPS-denied environment.

Key words: bag of visual word; aircraft positioning; scene-matching aided navigation; block matching; image registration

0 引言

无人机的导航定位直接影响到无人机能否有效执行任务,是无人机应用的基础和关键技术。目前,最为成熟的无人机导航方式是基于导航卫星的全球导航定位(Global Positioning System, GPS)技术结合惯性导航技术的组合导航方式,但在一些高山峡谷地形、有恶意干扰

或是由于战时期间服务方不提供卫星导航信号,卫星导航系统会出现拒止失效的情况,惯性导航系统在定位过程中会有累积误差,无法单独实现长航时导航。景象匹配导航在 GPS 信号拒止情况下与惯性导航系统相结合,可以实现长航时与高精度的自主导航^[1]。研究适用于全场景而且较为稳定的景象匹配方法对于提升无人机的

* 基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj20200413);国家自然科学基金(41801342);中央高校基本科研业务费专项资金(NZ2020008)

视觉定位导航能力具有重要意义。

从基准地图和空中影像中得到稳定的特征是景象匹配需要解决的首要问题。Lowe 提出了一种尺度不变特征变换算子(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)^[12],在尺度域和空间域上同时检测像素变化极值点,并通过梯度方向进行分配进而满足对旋转和尺度的不变性。但 SIFT 特征计算量大,很难保证算法的实时性。Dellinger 等人^[13]和杨颀等人^[14]分别结合 SAR、稀疏随机投影(Sparse Random Projection, SRP)提出一些加速匹配的算法。在 SIFT 基础上,又有许多学者进行补充扩展研究,Morel 将用于提取特征的原始图片做仿射变换进而提出了 ASIFT 算法^[15](Affine Scale Invariant Feature Transform),可以用于大视角变换的场景,但需要对场景进行多角度采样。杨佳宾^[16]等人开发出一种 Dense SIFT 特征用于无人机影像的快速拼接,可在空中影像中提取更多特征点用于匹配。张晓闻等人^[17]基于稀疏表示和拓扑相似性提出一种图像匹配方法,能够有效提高匹配效率,并对轮廓部分有较好的匹配结果。Yu 等人^[18]提出了一种基于 Harris-Laplace ROEWA 和 Harris-Laplace Sobel 技术的特征检测策略,并改进了 SIFT 特征的描述符,有效地解决了 SAR 图像与光学图像配准时有较大的非线性强度差问题。

除了要关注特征点自身的稳定性与重复性,基准地图和空中影像在尺度上也具有较大的差异,从两种图像上提取特征的数量也有较大的差异,如何在这种差异存在的情况下实现正确的局部匹配是景象匹配需要研究的另一个问题。特征匹配中,较为常见的是最近邻搜索确定匹配特征,或是使用欧氏距离或汉明距离计算特征之间的相似度。霍斯多夫距离(Hausdorff Distance, HD)有着对局部边缘形变不敏感的特点,但在图像受到噪声污染或是存在遮挡时,容易出现误匹配。Huttenlocher 提出的 Partial HD^[9]和 Dubuisson 提出的 Modified HD^[10]均在距离集上进行处理,减少误匹配的发生。虽然采用这些方案可以有效地减少误匹配出现,但是仍然很难解决在众多相似特征中找到正确匹配的问题。Wang 等人^[11]根据人类视觉系统认知原理提出基于结构相似性(Structural Similarity, SSIM)的度量模型,赵武锋^[12]和 Mehul^[13]又分别在复小波域下验证结构相似性度量模型的合理性,将局部区域的特征信息进行处理并运用到景象匹配中,更符合视觉系统的特点。

使用多种特征可以准确地表达影像中的细节信息,徐培罡^[14]等人融合场景的像素一致性信息、空间信息和外观信息,采用 K-means 聚类进行量化并统计直方图,对场景的特征进行表达,实现了高分辨率遥感场景分类。更进一步, Csúrká^[15]等人提出的视觉词袋模型(Bag of Visual Words, BOVW)通过挖掘未标记样本在底层特征上的语义信息,在标记样本和未标记样本之间建立联系,

有效地缓解需要大量标记样本进行训练的问题。Csúrká 的研究表明:BOVW 模型可以有效表达影像语义特征,并具有一定的泛化能力。

基于上述研究方法,本文吸取使用 BOVW 模型对场景进行切片分类和使用点特征进行场景匹配的思想,构建了“先分类,再配准”的技术框架,实现在 GPS 拒止情况下的景象匹配导航。首先建立一个 BOVW 模型,然后将基准地图切片并逐一编码,每一个切片地区都对应一个特征词袋矢量。当无人机遇到 GPS 拒止情况时,触发景象匹配模块开始工作,将无人机拍摄的空中影像使用 BOVW 模型编码,并与所在区域的基准地图的区域编码相比较,找出最相似的区域作为定位匹配区域。最后,在各自区域上提取特征,优化迭代计算变换矩阵,最终实现精确匹配与精定位。

1 基于 BOVW 的景象匹配导航算法原理

1.1 方法流程

在 GPS 拒止条件下,基于 BOVW 模型的景象匹配导航方法流程如图 1 所示,具体分为建立地图特征矢量库和匹配导航两部分。

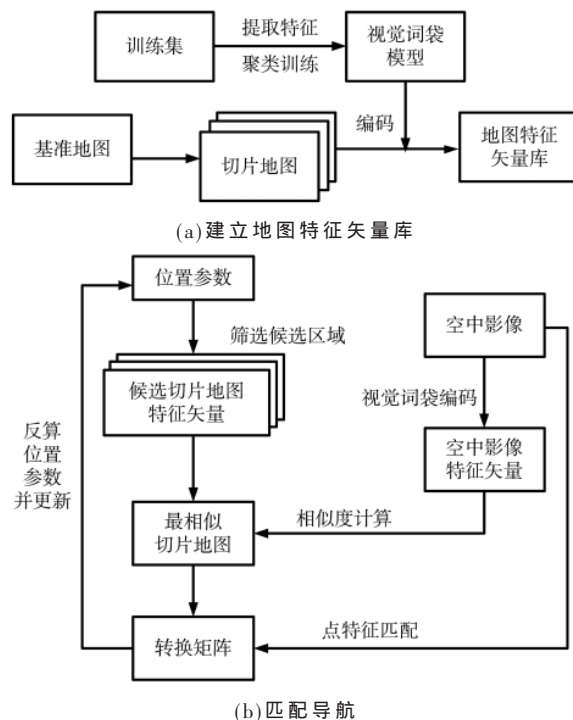


图 1 GPS 拒止条件下基于 BOVW 模型的景象匹配导航方法流程

1.2 基于 BOVW 的地图区域编码与匹配方法

使用 BOVW 对基准地图做区域性编码匹配包括 3 个步骤:(1)训练 BOVW 模型并将基准地图切片;(2)对切片后基准地图逐一编码建立地图特征矢量库;(3)对机载空中影像进行编码并与切片后基准地图进行匹配搜索。

区分一幅图像,可以将图像提取出的特征点做统计分类,形成特征直方图用于区分。而图片中的特征点在

特征空间中会有局部相似的分布情形,因此可以使用 K-means 算法^[16]对特征点聚类训练,从海量特征点中找到几百个聚类中心当作视觉关键点,形成 BOVW 模型。

得到 BOVW 模型通常需要经过 3 个步骤:特征检测、特征表示、聚类训练。在基准地图上使用 BOVW 模型就要从地图中提取特征,然后迭代训练。但仅使用基准地图作为训练集很容易使训练出的词袋模型过拟合,即得到的视觉关键词彼此之间区分度不大。所以应该在原本的训练集中加入一些与基准地图差别比较明显的图像用于训练,本文选用的是 ImageNet12^[17-18]作为补充训练集。ImageNet12 数据集具有目标种类复杂、视觉特征多样化的特点,可以弥补基准地图特征较为单一的缺点。

在 BOVW 模型训练好后就可以将基准地图进行切片并逐一编码,将地图切片的过程会考虑到飞行器的导航参数。根据飞行器的飞行高度和预先得到的机载光电图像传感器内参数可以算出空中影像在地面的覆盖范围,按照覆盖范围不同对基准地图做不同规格的切片操作,然后使用词袋模型对每个切片图像做编码,计算每块区域的特征直方图,切片图像大小根据式(1)确定:

$$\begin{bmatrix} W \\ H \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{h}{f \cdot s} \begin{bmatrix} \text{col} \\ \text{row} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $[\text{col}, \text{row}]^T$ 表示空中图像尺寸, h 表示飞行高度, h 可以根据预设飞行高度进行调整, f 表示相机的焦距, s 表示基准地图影像的比例尺, $[W, H]^T$ 表示最终的切片图像大小。切片情况如图 2 所示。



图 2 切片地图(相邻切片地图之间有一定的重叠区域)

不同区块对应的直方图之间有明显的区分度,将待匹配图像的特征直方图也计算出来,并与目标区域的直方图逐一匹配,就可以快速而又精确地确定匹配的初始位置。经过编码后的切片地图可以表示为一簇特征矢量 V_r , 待匹配图像可以用特征矢量 V_l 表示,则待匹配图像与切片地图的相似度 c 为:

$$c_i = \left\| V_r^i - V_l \right\|_2 \quad (2)$$

其中, i 表示第 i 个切片地图。在计算相似度时,如果使

用全体切片地图会造成很严重的计算资源浪费,所以在计算之前需要对筛选区域做约束。

机载导航参数提供了飞行器位置的估计初值 $P_c = [X_c, Y_c, h]^T$ 和像空间坐标系相对于基准坐标系的旋转矩阵 R 。如图 3 所示,像空间坐标系的 Z 轴方向的单位基向量在基准坐标系下的位置可以计算为 $P' = R^{-1}[0, 0, -1]^T$ 。沿像空间坐标系 Z 轴指向,其与地面的交点为 Q ,即能够定位出图像中心对应基准地图影像上的估计位置 $[X_0, Y_0]^T$,计算过程为:

$$Q = P_c + \lambda (P' - P_c) \quad (3)$$

其中 $\lambda = \frac{h}{(P' - P_c) \cdot [0, 0, -1]^T}$, 推导可以得出:

$$Q = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_{31}h/r_{33} \\ -r_{32}h/r_{33} \\ -h \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, r_{31} 、 r_{32} 和 r_{33} 是旋转矩阵的第 3 行元素。有了地面观测中心的坐标,结合式(1)的计算方法,可以将待配准初始区域设定在范围内。搜索初始区域内的所有切片图块就可以得到一系列相关系数,而最终的确定的区域 A 为:

$$A = \text{argmax}(c_i) \quad (5)$$

有时为了保证结果的正确性,区域会保留最大相关系数和次大相关系数对应的 2 个区块,之后在下一步使用特征点做精确匹配时进行筛选。

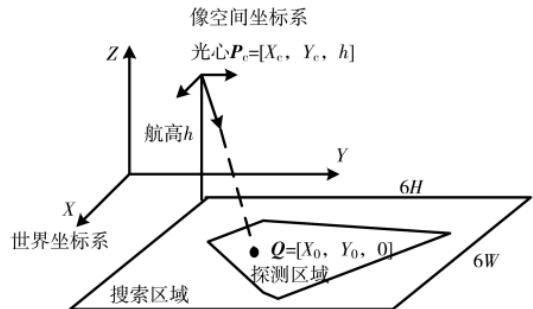
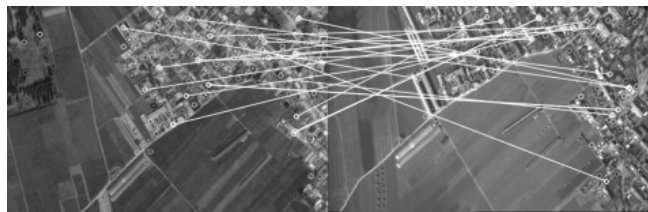


图 3 空中图像探测区域与配准搜索区域的关系

1.3 基于特征点的精确匹配导航

经过上文使用 BOVW 模型进行区域性匹配得到匹配初始位置后,就可以使用特征点的方法进行精确匹配。这是由于筛选过初始位置后,确定的匹配参考区域和待匹配图像代表的区域尺寸大小基本相同,非相关区域的相似特征被有效地排除在外,因此使用特征点进行精确匹配就变得可行。参考图像与待匹配图像上提取的特征点最终都以点坐标的形式表示,分别为 $p_r = (x_r, y_r)$ 和 $p_l = (x_l, y_l)$, 建立起的对应为 $C_{kj} = \{p_{rk}, p_{lj}\}$, 表示第 k 个参考点与第 j 个匹配点有对应关系。卫星基准地图影像与航空图像特征对应关系如图 4 所示。

根据机载导航系统及飞行器自身水平仪提供参数,可以获取飞行器自身的俯仰和翻滚参数,结合光电图像



(a) 卫星基准切片地图

(b) 航空影像

图4 卫星基准地图影像与航空图像特征对应关系
(住宅区域边缘或道路上的特征可以正确对应)

传感器的安装参数就可以将待匹配图像映射为类似正射影像的形式:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{P}^{-1}\mathbf{K}^{-1}\mathbf{h}}{s} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $[u_i, v_i]^T$ 是光电图像中第 i 个像素坐标, $[X_i, Y_i]^T$ 表示第 i 个像素经过映射后的坐标, $\mathbf{K}$ 表示光电图像传感器内参数, $\mathbf{P}$ 表示安装矩阵, s 表示基准地图的比例尺。映射过程如图 5 所示。



图5 映射过程

参考图像来自于基准地图,是根据卫星探测成像制成的地图,地面建筑物的高度与卫星轨道高度在数量级上相差很大;同时待匹配图像也被映射为类似正射影像的形式,地面建筑物可以认为都投影到了大地平面上,因此在参考图像与待匹配图像中可以将高程信息忽略,认为两幅图像只存在着旋转和平移的关系。根据 $C_{ij} = \{p_{ik}, p_{vj}\}$ 对应关系,可以列出一组超定方程:

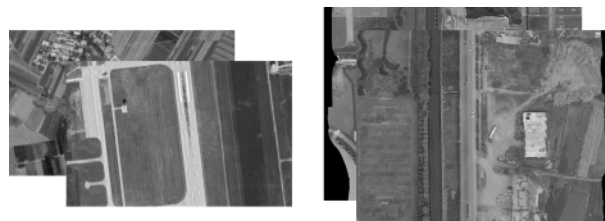
$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{H}$ 是一个单应矩阵,它描述的是两个平面之间的变化。使用随机一致性检验方法^[19](Random Sample Consensus, RANSAC)可以求出单应变化矩阵。由于在对空中图像做预处理时已经将其映射为正射影像,因此可以认为空中图像与切片地图之间只有旋转、位移以及放缩的关系,可以为单应矩阵的第 3 行添加一个约束条件: $\|\mathbf{h}_3\|_2 = 1$, 即 $h_{31} = h_{32} = 0$ 。这时单应变换退化成仿射变换,简化计算的

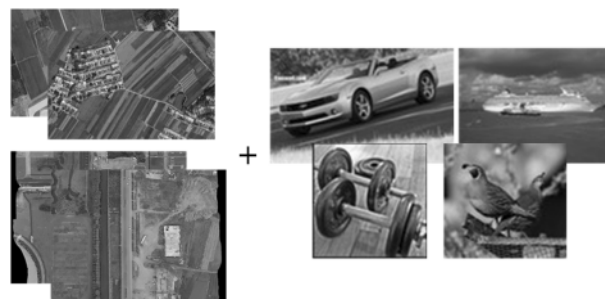
同时也加快了位姿求解的速度。

2 相关实验与分析

本文使用了两类具有不同地貌特征的实验数据来定量地评估算法性能,每组数据具有航空序列影像和对应的基准卫星高清地图影像。首先分析了使用不同训练集训练出的 BOVW 模型对地图区域匹配的影响,如图 6 所示。



(a) 基准地图训练集



(b) 组合训练集

图6 只有基准地图训练集与添加 ImageNet12 为补充训练集

本文使用 SURF 特征作为词袋模型的统计特征,设置聚类中心为 500,即确定最终提取出的视觉关键词为 500 个。分别使用两个词袋作为编码码本为基准地图做区域编码,并拿其中一个区域与其他区域做相关度计算,得到结果如图 7 所示。

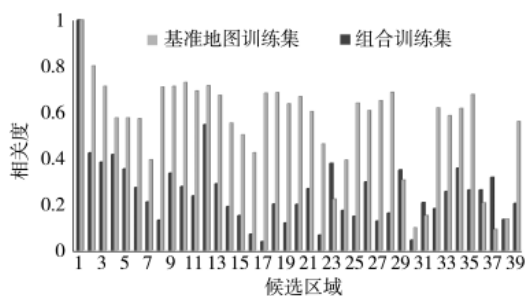
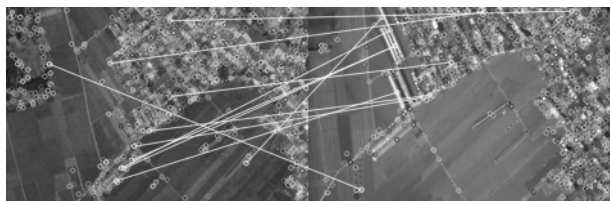


图7 不同训练集编码后地图之间相关性

图 7 中相关度越接近 1 表示两块区域越相似,经过 BOVW 模型编码后在一整块基准地图内,区域之间的对比度有明显增加。以第 1 块切片作为参考,越靠近它的相关度越大,反之亦然,这说明使用 BOVW 模型确实对匹配初始区域筛选有所帮助。关于两种不同训练集的效果,只使用基准地图作为训练集得到的区分度更明显。但是由于相邻切片有重叠区域,因此相邻切片的

际上是较为相似的场景,应当具备相似的区域特征矢量。但是,仅使用基准地图影像训练出的 BOVW 模型第 2 块切片与第 1 块切片的相关度只有 0.405 8,所有切片区域中最高相关度只有 0.552 7。显然,这种情况属于模型过拟合的情况。使用过拟合模型会让测试结果很差,使用测试数据进行实验后,统计得到:使用基准高清地图影像训练出的模型的区域匹配正确率为 60.6%;添加补充训练集后模型的区域匹配正确率提升到 92.8%。因此,添加 ImageNet12 数据集作为补充训练集可以有效提高视觉关键词的丰富度并提高区域匹配的正确率。

在精确匹配部分,本文使用了 SIFT、SURF 和 ORB 3 种特征进行对比实验,实验中分别检验了 3 种特征精确匹配的速度和匹配效果。首先对匹配结果的正确性进行比较,经过调参,SIFT 和 SURF 特征都可以得到正确的匹配结果,如图 8、图 9 所示。



(a)SIFT 匹配



(b)SURF 匹配

图 8 SIFT 和 SURF 特征匹配结果



(a)SIFT 配准



(b)SURF 配准

图 9 SIFT 配准结果和 SURF 配准结果

使用 ORB 算法提取特征进行匹配的结果如图 10 所示,ORB 特征虽然可以在相关区域提取出大量相似特

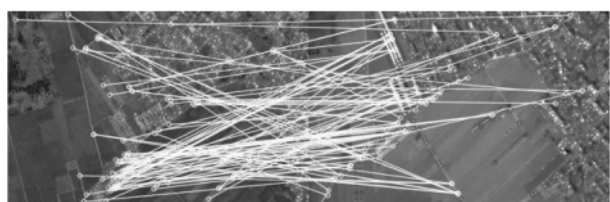


图 10 ORB 提取特征与特征对应

征,但由于 ORB 使用的 FAST 角点的特性,导致提取出的特征较为集中,使用非极大值抑制后仍然会有大量特征堆积在一个区域导致无法找到足够多的正确匹配点对。

在精度方面,算法在求解出单应矩阵后,使用 Levenberg-Marquardt 算法^[20]进一步细化以减少重投影误差,使用下式计算变换的重投影误差:

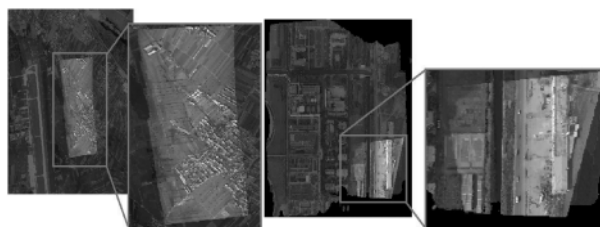
$$\sum_i \left(x'_i - \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 + \left(y'_i - \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 \quad (8)$$

最终,在使用实验数据测试计算后,在高清地图影像数据分辨为 1 m/pixel 时,综合精定位精度误差为 0.643 845 m,综合精定位重投影误差统计结果如表 1 所示。

表 1 实验序列影像精定位重投影误差统计结果

误差范围/pixel	分布比例/%
0~0.1	9.42
0.1~1.0	82.51
>1.0	8.07

经过实验验证,本文提出的算法对不同地形区域都有一定的适应性,配准结果准确无误,实验结果如图 11 所示。



(a)实验结果 1

(b)实验结果 2

图 11 实验序列影像与基准地图配准结果

本文与 Liu 等人^[21]提出的 SIFT flow 配准融合方法作比较,SIFT flow 可以将两种场景逐像素融合,但这种融合是非刚性的融合,如图 12(a)中箭头指示区域所示,道路与房屋部分都发生了不同程度的扭曲形变。而本文使用的算法做出的变换是刚性变换,与 SIFT flow 相比在形式上要更适用于飞行器视觉导航定位的场景。同样,本文也与未做切片地图的匹配结果相比较。实际上,未做切片的基准高清地图影像中可以提取出大量相似特征,直接在空中图像中提取出的特征做特征匹配很难得到正确匹配关系。经过反复实验,未做切片的基准高清地图影像与空中图像无法得到有效的特征对应关系,也就无法计算出有效的单应变换矩阵,实验结果如图 12(b)所示。

3 结论

本文设计使用了 BOVW 模型对基准地图进行区块



(a) SIFT flow 配准结果 (b) 未切片地图与空中影像匹配结果

图 12 SIFT flow 融合结果和未做切片特征匹配结果

性编码,解决了空中拍摄影像很难与基准影像对应的问题,在纹理特征大面积相似的情况下,依然可以准确地定位到匹配的初始区域,为飞行器视觉自主导航提供了一种低成本高精度的新思路。

能够在基准地图的一定范围内快速确定初始位置是景象匹配的关键,本文算法将基准地图切片,使用 BOVW 模型为切片地图逐片编码,将原本离散的特征通过统计的方式统一化,使得搜索初始位置这一过程的计算量大大减少。

本文算法在搜索初始位置时添加了位置约束,避免了在计算区块相关度时将空中影像的区块特征矢量与所有切片地图的区块特征矢量进行相关计算,实现了初始区域的快速定位。经过实验验证,本文算法在空中拍摄影像与基准地区的纹理特征大致相同的场景的应用效果较好;当待搜索匹配区域与空中拍摄区域有一定差异时,本文算法也能实现较为精准的定位。

参考文献

- [1] 孙世宇,张岩,李建增,等.基于景象匹配的航摄影像二维定位方法[J].系统工程与电子技术,2018,40(11):2415-2419.
- [2] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- [3] DELLINGE R F, DELON J, GOUSSEAU Y, et al. Sarsift: a SIFT-like algorithm for SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(1): 453-466.
- [4] 杨颀,杨春玲.基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J].光学学报,2014,34(11):106-110.
- [5] MOREL J M, YU G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2009, 2(2): 1-31.
- [6] 杨佳宾,姜永涛,杨幸彬,等.基于 Dense SIFT 特征的无人机影像快速拼接方法[J].地球信息科学学报,2019,21(4):588-599.
- [7] 张晓闻,任勇峰.结合稀疏表示与拓扑相似性的图像匹配算法[J/OL].计算机工程与应用:1-7[2020-12-10]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20201202.1354.026.html.
- [8] YU Q, NI D, JIANG Y, et al. Universal SAR and optical image registration via a novel SIFT framework based on nonlinear diffusion and a polar spatial-frequency descriptor[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021,

171:1-17.

- [9] HUTTENLOCHER D P, KLANDERMAN G A, RUCKLI-DGE W J. Comparing images using the hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1993, 15(9): 850-863.
- [10] DUBUISSON M P, JAIN A K. A modified Hausdorff distance for object matching[C]//Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition, Jerusalem, Israel, 1994: 566-568.
- [11] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [12] 赵武锋,沈海斌,严晓浪.基于双树复数小波的结构相似度测量法[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(8):1385-1388.
- [13] MEHUL P S, WANG Z, SHALINI G, et al. Complex wavelet structural similarity: a new image similarity Index[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(11): 2385-2401.
- [14] 徐培昱,张海青,王超,等.基于多重分割关联子的高分辨率遥感场景分类[J].地理科学,2018,38(2):293-299.
- [15] CSURKA G, DANCE C R, FAN Lixin, et al. Visual categorization with bags of keypoints[EB/OL]. (2011-02-28) [2021-03-30]. https://wenku.baidu.com/view/5baf27c2d5-bbfd0a7956736e.html.
- [16] NOROUZI M, FLEET D J. Cartesian K-Means[C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland, OR, 2013: 3017-3024.
- [17] FEI-FEI L, RUSSAKOVSKY O. Analysis of large-scale visual recognition[R]. Bay Area Vision Meeting, October, 2013.
- [18] FEI-FEI L. ImageNet: crowdsourcing, benchmarking & other cool things[R]. CMU VASC Seminar, March, 2010.
- [19] FISCHLER M A. Random sample consensus[J]. Comm. of ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [20] 杨涛,张艳宁,张秀伟,等.基于场景复杂度与不变特征的航拍视频实时配准算法[J].电子学报,2010,38(5):1069-1077.
- [21] LIU C, YUEN J, TORRALBA A. SIFT flow: dense correspondence across scenes and its applications[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2011, 33(5): 978-994.

(收稿日期:2021-03-30)

作者简介:

李家松(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:目标跟踪与定位。

李明磊(1987-),通信作者,男,博士,副教授,主要研究方向:计算机视觉识别定位、激光雷达点云处理、工业测量、三维遥感,E-mail:minglei_li@nuaa.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所