

基于BBF优化算法的无人机 遥感图像配准研究

金红华

(吉林广播电视大学 延边分校, 吉林 延吉 133001)

摘要: 针对无人机遥感图像中的亮度、尺度、图像重叠等问题, 利用BBF优化算法设计无人机遥感图像配准方法; 根据无人机遥感成像原理, 获取无人机遥感图像作为配准对象, 通过图像融合、校正等步骤, 完成初始遥感图像的预处理; 提取无人机遥感图像的SIFT特征点和轮廓特征, 利用BBF优化算法搜索当前图像与参考图像之间的特征匹配对, 完成图像的特征匹配; 最终通过粗匹配、精匹配和消除错误匹配点3个步骤, 得出无人机遥感图像的配准结果; 通过效果测试实验得出结论: 优化设计方法的特征匹配点准确率为5.15%, 漏配率为3.75%, 显著优于传统配准算法。

关键词: BBF优化算法; 无人机遥感图像; 图像配准

Research on UAV Remote Sensing Image Registration Based on BBF Optimization Algorithm

JIN Honghua

(Yanbian Branch, Jilin Radio and Television University, Yanji 133001, China)

Abstract: Aiming at the problems of brightness, scale and image overlap in UAV remote sensing images, the best bin first (BBF) optimization algorithm is used to design the UAV remote sensing image registration method. According to UAV remote sensing imaging principle, the UAV remote sensing image is obtained as a registration object, and the initial remote sensing image is preprocessed by the image fusion and correction. The SIFT feature points and contour features of UAV remote sensing images are extracted, the BBF optimization algorithm is adopted to search the feature matching pairs between current image and reference image to complete the feature matching of the image. Finally, through three steps of rough matching, fine matching and eliminating wrong matching points, the registration results of UAV remote sensing images are obtained. The results show that the accuracy of feature matching points of the optimization method is 5.15% and the missing matching rate is 3.75%, which is significantly better than that of traditional registration algorithms.

Keywords: BF optimization algorithm; UAV remote sensing image; image registration

0 引言

无人机是一种基于无线电控制技术设计和制造, 并具有智能自动化控制功能的非载人飞机。随着无线通信技术和自动控制技术的不断发展, 无人机功能得到了显著的提升和改善, 并在某些特定场景可以替代载人飞机作业。通常情况下无人机体积较为灵巧, 飞行灵活, 适用于一些危险的工作场景, 或在一些较为复杂和狭小场景中完成指定任务。从无人机的应用领域来看, 除了军用无人机之外, 民用无人机的应用场景更加多样化, 包括航拍、救援、农业、测绘等。其中, 无人机遥感图像是指利用无人机远程拍摄方式, 生成的反映地表物体分布的图像, 在诸多等领域发挥着重要作用。由于无人机的控制更加精准, 可以实现飞行高度和拍摄角度的自由调整, 并精准地获取遥感

图像。

无人机图像采集经常需要对同一场景进行多角度拍摄, 再对多幅图像进行配准以获取高清的数字遥感图像。此外, 受高清遥感摄像机镜头广角拍摄角度的限制, 遥感数字图像的画幅有限也需要后续的图像配准和拼接工作。图像配准是无人机遥感图像处理应用的基础步骤, 具体是指将多幅包含同一景物的不同图像由不同空间坐标系通过一定模型变换到同一坐标系下的过程。对于有差异的图像, 以消除其差异, 确定其相对的空间位置, 并将其与目标在空间位置上对齐, 为后续的图像研究奠定基础^[1]。数字图像配准具体包括: 不同视点配准、不同时间配准、不同传感器配准以及不同场景模型配准4种类型。目前无人机遥感图像及其配准方法在目标检测、地图测绘等领域都发挥着重要的作用。

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-08-03。

基金项目: 中国管理科学研究院教育科学研究所研究课题(KJCX16276)。

作者简介: 金红华(1969-), 女, 副教授。

引用格式: 金红华. 基于BBF优化算法的无人机遥感图像配准研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 232-237, 245.

现阶段，随着数字遥感图像应用场景和需求的不断增加，学术界对图像配准工作的关注度持续提高，且得出了一系列研究成果。文献 [1] 中提出的基于数学形态学改进的图像配准方法，利用可见光区的植被指数差值和数学形态学的基本原则，提出了一种基于两个方向的匹配方法，并将其与最近邻域的匹配方法进行初步的匹配，在此基础上采用递增式一致性抽样方法实现精细配准，以进一步提升配准的准确度。文献 [2] 中提出的基于格网索引优化的图像配准方法利用 SIFT 方法提取图像中的特征点，并利用欧氏距离对其进行了匹配，通过构建网格指数，消除一些错误的配对，使随机采样的配对更加精确。而文献 [3] 中提出的基于改进 SIFT 的图像配准方法主要是根据 SIFT 算法关于特征点尺度不变性的理论依据及实现方法，提出了消除冗余性能的策略。然而上述传统图像匹配方法，在实际运行过程中存在明显的匹配效果不佳的问题，具体表现为图像匹配误差大、效率低等方面，为改善传统数字遥感图像配准中存在的匹配度差、效率低和误差高等问题，为此本文引入了 BBF (Best Bin First) 优化算法。BBF 优化算法是一种改进的 k-d 树最近邻查询算法，将“查询路径”上的节点进行排序，且总是从优先级最高的的树节点开始。应用 BBF 优化算法对无人机遥感图像配准方法进行优化，以期能够提升无人机遥感图像的配准效果。

1 无人机遥感图像配准方法设计

无人机在空中作业时，针对同一场景要采集多幅数字遥感图像，任意两幅图像之间的配准过程可以描述为：

$$I_{\text{Registration}}(x, y) = g\{I_{\text{consult}}[\psi_{\text{vary}}(x, y)]\} \quad (1)$$

式中，函数 $g(\cdot)$ 和 $\psi_{\text{vary}}(\cdot)$ 分别代表二维空间内的坐标变换函数和灰度变换函数， $I_{\text{consult}}(x, y)$ 和 $I_{\text{Registration}}(x, y)$ 对应的是参考图像和待匹配图像^[2]。在配准窗的区域内，如果两个物体具有同样的折角，则可以很容易地实现两个物体的配准。但在实际应用中，由于数字遥感图像的成像时间、成像位置、成像系统等因素的不同，使得两张影像在不同的拍摄状态下呈现出不同的特征性。此外，由于无人机拍摄或成像时存在着多种干扰（系统噪声、环境噪声等），使得两张影像很难实现完全一致，因此图像配准是一个相当复杂的技术过程^[3]。数字遥感图像配准大体可以分为特征提取、特征匹配、变换、重采样等步骤，利用 BBF 算法进行特征匹配点进行查询，最大程度的提升对无人机遥感图像的配准结果。BBF 算法基于特征匹配的角度，实现多幅不同图像的坐标匹配和灰度值匹配，同时该算法根据图像信号和噪声信号在频域上的差异，还能够实现对系统噪声和环境噪声的抑制，改善数字遥感图像的显示效果。

1.1 获取无人机遥感图像

在无人机前端安装高清遥感相机，控制无人机飞行到指定高度后调整角度拍摄，在辅助成像设备的支持下，得出对应遥感区域任意地物的成像结果，实际地物与其遥感成像结果之间的关系如下：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \kappa_{\text{scale}} A_{\text{revolve}} A_{\text{gesture}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_I \quad (2)$$

其中： (X, Y, Z) 和 $I(x, y)$ 分别为实际环境中任意遥感地物的三维坐标及其成像对应的二维坐标，另外 A_{revolve} 和 A_{gesture} 分别表示无人机的旋转矩阵和飞行姿态矩阵，参数 κ_{scale} 为成像比例系数，该参数的具体取值由成像焦距等因素决定^[4]。无人机按照事先规划好的轨迹飞行，按照固定的采集频率对目标区域的实时遥感图像进行采集。无人机实时拍摄到的图像可以通过无线网络回传到后台中，形成遥感图像数据集再经过预处理后，得出配准过程中的参考图像以及待配准目标。

1.2 无人机遥感图像预处理

无人机遥感成像为远距离成像，出了会受到系统噪声和环境噪声的干扰意外，还会受到外界信号、遮挡物以及大气环境的影响，降低无人机遥感图像的获取质量，间接的对图像的配准结果产生负面影响，为此需要对原始状态下采集到的无人机遥感数字图像进行预处理^[5]。通过对多幅图像的坐标匹配和灰度值匹配，再基于数字信号频域上的差异，能够先剔除系统噪声和环境噪声的干扰。但受到无人机遥感拍摄条件（如光照、天气等）的影响和限制，遥感数字影像在亮度、颜色等参数上会出现畸变，从而影响到后续图像拼接的效果。例如，两幅图像在色彩、亮度、锐度或对比度，等方面存在差异，会导致拼接间隙的出现，所以需要影像进行融合。加权平均方法是最直观的融合方式，在对源图像的像素灰度值进行权重，进行融合时效率最高，可以通过该方法来提高融合图像的分辨率和图像的信噪比。该方法的基本原理如下：

$$I_{\text{fuse}}(x, y) = \begin{cases} I_t(x, y), & (x, y) \in I_t \\ \omega_t I_t(x, y) + \omega_{t+1} I_{t+1}(x, y), & (x, y) \in I_t \cap I_{t+1} \\ I_{t+1}(x, y), & (x, y) \in I_{t+1} \end{cases} \quad (3)$$

公式 (3) 中， $I_t(x, y)$ 和 $I_{t+1}(x, y)$ 分别为 t 和 $t+1$ 时刻采集的无人机遥感图像， ω_t 和 ω_{t+1} 分别表示对应遥感图像的加权重值^[6]。由此完成对无人机遥感图像的融合，实现多个遥感图像样本的统一、批量处理。在此基础上，从图像校正和增强两个方面，完成初始遥感图像的预处理，其中图像校正包括：镜头校正、几何校正、去噪、增强等环节，镜头校正处理对象包括径向畸变和偏心畸变两部分，其中由于安装和振动，物镜系统中的各个单位的镜头，发生了偏移，造成的像点与其精确的理想位置之间的误差，称为光学偏心畸变^[7]。镜头校正过程如下：

$$\begin{cases} \Delta x_{\text{radial}} = (x - x_0)(\kappa_{j1} d_2 + \kappa_{j2} d_4 + \kappa_{j3} d_7) \\ \Delta y_{\text{radial}} = (y - y_0)(\kappa_{j1} d_2 + \kappa_{j2} d_4 + \kappa_{j3} d_7) \\ \Delta x_{\text{partiality}} = \lambda_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2\lambda_2 (x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y_{\text{partiality}} = \lambda_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2\lambda_2 (x - x_0)(y - y_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中： Δx_{radial} 、 Δy_{radial} 、 $\Delta x_{\text{partiality}}$ 和 $\Delta y_{\text{partiality}}$ 分别为镜头径

向畸变和镜头偏心畸变在水平和垂直方向上的校正量, (x, y) 和 (x_0, y_0) 分别为像点坐标和像主点坐标, κ_{j1} 、 κ_{j2} 和 κ_{j3} 对应的是物镜系统的畸变校正系数, d_i 为无人机遥感图像像点的向径, 也就是像点与主点之间的距离, 另外 λ_1 和 λ_2 分别偏心畸变校正系数^[8]。桶形失真是一种典型的几何校正, 它是由图像采集装置的镜头所导致的, 呈现出一种桶形膨胀状的图像失真的现象, 具体表现为图像中的直线以图像中点为中心向外弯曲, 可以通过图像采集装置的镜头焦距和成像距离等参数来对它进行修正, 同时也可以通过平移、旋转等操作, 也能够实现无人机遥感初始图像的几何校正^[9]。采用高斯滤波的方式消除遥感图像中的噪声因素, 处理过程为:

$$I_{\text{Gaussian}}(x, y) = e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (5)$$

式中, σ 为标准差, 将无人机遥感图像中的所有像素点输入到公式 5 中, 最大程度的提升遥感图像中的信噪比。利用自适应直方图均衡化, 对图像进行分块, 设定直方图阈值, 对多余的像素进行切除, 从而获得局部的图像均衡。之后, 再利用双线性插值将图像块衔接起来, 这样就能有效地削弱图像块间不连续的问题。在具体的执行过程中, 将原图像划分成了一组连续但互不重叠的图像块, 并且每个图像块的尺寸都是一样的, 从而获得了每个图像块的直方图, 将直方图中的像素个数大于剪切限制的部分去掉, 就可以得到一个对比度有限的直方图, 并对每个图像块剪切后的直方图进行直方图均衡化^[10]。按照图 1 表示原理对图像的每个点作双线性插值处理。

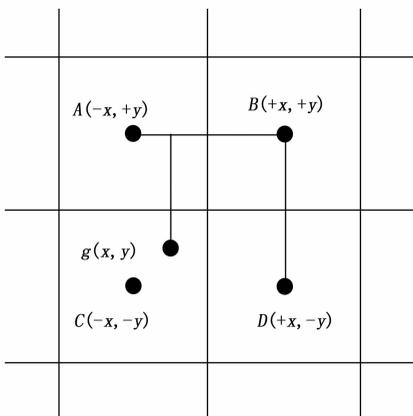


图 1 双线性插值计算原理图

图像双线性插值处理的目的是消除图像块区域间不均匀的过渡。图 1 中 $g(x, y)$ 为像素点的灰度值, $A(-x, +y)$ 、 $B(+x, +y)$ 、 $C(-x, -y)$ 和 $D(+x, -y)$ 分别为 (x, y) 点周围的像素点的灰度值, 如果所求像素点位于图像边界则用该点最临近的两个点进行计算, 如果所求像素点位于图像的 4 个角上则可用其最临近的一个点的像素值代替^[11]。由上述遥感数字图像的预处理流程可知, 图像预处理的过程较为复杂, 这也与使用者对遥感数字图像的质量要求密切相关。通过对数字遥感图像信噪比值的提升, 及对无人机高清遥感相机镜头的校正和调整, 图像的锐度和对比度将得到改

善, 而通常情况下无人机的高清遥感相机也具有强大的防抖功能。再基于图像直方图对遥感图像进行插值处理, 改善图像的均衡度并完成无人机遥感图像的预处理。

1.3 提取无人机遥感图像特征

无人机遥感图像的特征点也就是图像的配准点, 在此次研究中选择 SIFT 作为特征点提取目标, SIFT 特征属于图像的局部特征, 提取过程大体可以分为 4 个步骤: 构建尺度空间、确定特征点位置、确定特征点主方向以及生成 SIFT 特征向量^[12]。

1) 构建尺度空间。

先利用高斯函数对原图像进行比例尺转换, 获得多个比例尺空间中的多个比例尺空间中的一组数据, 并对其进行比例尺空间中的特征抽取。二维图像中在不同尺度下构建的尺度空间可以表示为:

$$C(x, y, \delta) = H(x, y, \delta) \times I(x, y) \quad (6)$$

其中: $H(x, y, \delta)$ 为高斯核, 其中 δ 表示尺度因子。

2) 确定特征点位置。

将采用泰勒公式二次展开法, 在高斯差分的尺度空间上拟合无人机遥感图像, 精确定位特征点的尺度和位置, 最终的定位结果如下:

$$\tau = I(x, y) + \frac{\partial I(x, y)^T}{\partial (x, y, \delta)} + \frac{1}{2} (x, y, \delta)^T \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial (x, y, \delta)^2} \quad (7)$$

公式 (7) 中 $(x, y, \delta)^T$ 表示检测出的特征点距离插值中心的偏移量。高斯差分算子对边缘有很大的影响, 要消除由它导致的边界不稳定^[13]。

3) 确定特征点主方向。

在尺度构建和特征点位置定位的基础, 利用 SIFT 算符在统计域中选择最大的一个梯度, 同时确定遥感数字图像特征点的主方向, 以确保特征点在旋转中主体方向不变。在图像中, 各个极值点的梯度方向角和幅值计算结果如下:

$$\begin{cases} \theta(x, y) = \arctan \frac{C(x, y+1) - C(x, y-1)}{C(x+1, y) - C(x-1, y)} \\ \beta(x, y) = \sqrt{(C(x+1, y) - C(x-1, y))^2 + (C(x, y+1) - C(x, y-1))^2} \end{cases} \quad (8)$$

将公式 (6) 的构建结果代入到公式 (8) 中, 即可得出梯度方向角和幅值的具体取值, 利用直方图对极值点附近区域的像素的梯度和幅值进行统计。

4) 特征向量的生成。

采用高斯图像特征点的方法来刻画特征点, 首先在特征点周围选取 16×16 矩形邻居, 利用高斯窗对邻域进行权重处理, 再将邻域平均划分为 4×4 的小块。在每一子区域中, 对各点进行梯度计算, 并将其划分为 8 个梯度级别, 通过投票的方法, 在 8 个梯度级别中, 通过一个正方形领域, 就可以产生 128 维的特征描述符^[14]。同时, 通过对图像的标准化, 减小了图像中的光照变化对图像的影响。经过上述过程, 可以得到一个能够很好的表达关键点邻近区域的图像信息的 SIFT 的特征描述矢量。除 SIFT 特征点外,

还需要提取无人机遥感图像的轮廓特征，提取结果为：

$$l = \frac{W + V}{\kappa_l} \quad (9)$$

其中： W 和 V 分别为无人机遥感图像的长度和宽度， κ_l 为轮廓长度的控制参数。对初始提取的轮廓特征进行平滑处理，并通过曲率计算实现图像轮廓特征的量化，得出图像轮廓特征的最终提取结果。图像特征提取是图像匹配的关键环节，特征提取的精度将影响到后续遥感图像匹配的最终效果。

1.4 基于 BBF 优化算法匹配图像特征

基于 BBF 优化算法，检索参考图像与待配准图像之间的特征匹配点对，并分析不同像素点之间坐标值、灰度值等参数上的差异。再进一步计算数字遥感图像轮廓特征，确定图像的边缘细节，从而实现全幅数字遥感图像特征点的匹配。BBF 优化算法的运行流程，如图 2 所示。

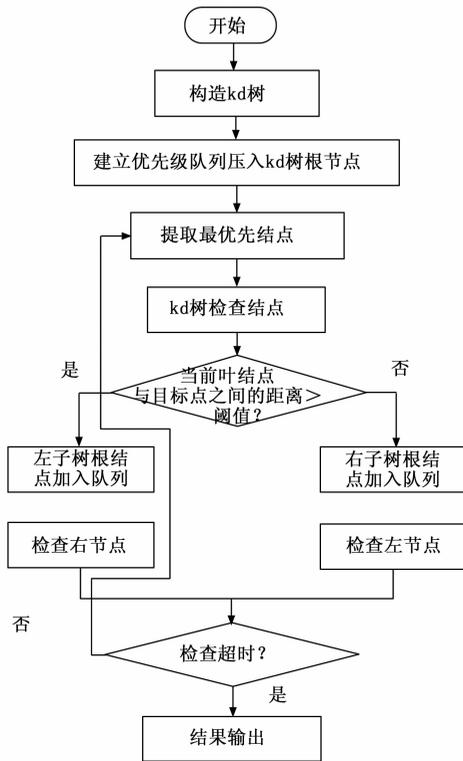


图 2 BBF 优化算法搜索流程图

在实际配准和检索过程中，先通过构造 kd 树的方式明确队列的优先级，并以根节点为起点，融合递归方法，识别出包含目标节点的制定叶片节点；在此基础上，通过对目标点维度和分割维度的对比与迭代循环计算，判断取值与子树值的大小。若其值小于左边的子树，若其值小于右边的子树，直至找到叶结点为止，并且保持当前的查找路线^[15]。将当前叶结点作为“当前最近邻结点”，利用公式 (10) 对当前叶结点与目标点之间的距离进行度量。

$$s = \frac{\sum_{i=j=1}^{n_{tree}} p_i p_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_{tree}} p_i^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_{tree}} p_j^2}} \quad (10)$$

公式 (10) 中 p_i 和 p_j 分别为当前叶结点和目标结点， n_{tree} 为构造 kd 树中的结点总数量。沿搜索路径逆序递归回溯：如果保持在这个节点上的数据点与目标点的距离小于当前近似点与目标点的距离，则将这个节点更新为“当前最近邻点”，并利用公式 (10) 更新最近邻点与目标点之间的距离。过搜索查找得到的最近点，它必须存在于该结点的一个子结点所对应的体元区域中，在该结点对应的兄弟结点所在的空间区域中，看有没有更近的点。如果有更近的点，则回溯查找将会转移到另一个子结点上，继续进行迭代递归查找^[16]。这一递归过程，直至上一分割面或超球面到目标点的距离与目标点到近似结点的距离相等，或者搜索回溯到 kd-tree 根结点，这时回溯结束，确保搜索所得结点为最近临近结点。在返回到 kd 树的根节点后，该节点就会被返回到目标节点的“当前最近邻点”。同时，BBF 算法还设定了一个运行限时机制，当优先级排队中的所有成员都被检查一次，或者算法的运行时间超过了极限，则算法会立刻停止，并将当前查询到的最近邻作为近似的最近邻点^[17]。在图像特征匹配过程中，按照上述流程在无人机遥感图像上构建 kd 树，结合图像特征点的提取结果，搜索得出参考图像中与待配准图像的最近邻点，由此得出图像特征的匹配结果。为保证图像特征的匹配效果，需要判别特征点是否为正确匹配对，判别结果如下：

$$\zeta = \frac{s_i}{s_j} \quad (11)$$

公式 (11) 的计算过程和结果能够反映出数字遥感图像特征点的最近邻距离和次近邻距离，若公式 (11) 的计算结果低于阈值 ζ_0 ，则表示当前的数字遥感图像匹配结果正确，否则不能确定当前 BBF 优化算法的输出结果能否满足要求，或是否为图像特征点的正确匹配结果。

1.5 无人机遥感图像配准的实现

无人机遥感图像配准可以分为粗配准、精配准和消除误差点 3 个步骤，在粗配准过程中将匹配特征点代入到公式 (12) 中，求得仿射变换模型。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \kappa_{zoom} \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \quad (12)$$

上式中 φ 为旋转角度， κ_{zoom} 为缩放系数， Δx 和 Δy 表示特征点在水平和垂直方向上的平移量。然后对图像进行几何校正，完成图像粗配准。在精配准过程中，需要对参考图像以及粗配准的输出结果进行降采样处理，降采样就是对原始图像隔行采样、隔列采样的方法，接着对检测粗配准的空间一致性^[18]。匹配完成后，仍有一些匹配错误的匹配对，这些对在图像拼接过程中会造成重影、拼接缝隙等情况，所以需要消除错误匹配点。通过误差判断模型反复地测试、迭代，最终找到了一个误差最少的数学模型，将有效数据和无效数据进行了区分。在误差排除运算中，选择了迭代数、采样点个数、最小残差初值；计算结果的精确度愈高，则排除的错误点愈准确。在匹配后的特征点中，随机抽取 3 个以上的特征点，用最小二乘法求出转换矩阵，

然后由转换矩阵求出采样点间的残差^[19-20]；若剩余平均数低于现存的最小剩余平均数，将其与转换矩阵一起保留。在此基础上，利用迭代得到的最佳转换矩阵法，计算所以匹配点对残差，并剔除大于一定阈值的匹配点。

2 实验结果与分析

以测试优化设计的基于 BBF 优化算法的无人机遥感图像配准方法的配准效果为目的，设计测试实验，此次实验的基本原理如下：利用无人机设备收集目标区域的遥感图像，以初始采集的遥感图像作为参考图像，通过亮度调整、旋转、缩放以及翻转等步骤，得出图像处理结果，以此作为待配准图像。运行优化设计的图像配准方法，得出配准结果，并通过相关测试指标的计算，得出反映图像配准效果的测试结果。

2.1 实验环境与系统调试

本次实验选择了 DJI Mini 3 Pro 型号的无人机设备，该设备属于旋翼无人机，空机重量为 3.5 kg，负载重量能够达到 2.0 kg，旋翼无人机在水平飞行高度上升和高度下降的稳定性方面有一定优势，而且旋翼式无人机可以说还空中坐标系中指定的某一段悬停，适合遥感图像的拍摄。无人机的实验环境设置如表 1 所示。

表 1 无人机的实验环境设置

序号	参数	参数值
1	最大高度	800 m
2	起降速度	30 km/h
3	平飞速度	45 km/h
4	空载续航	50 公里
5	无人机摄像头分辨率	3 000 dpi
6	工作频率	50 Hz

系统调试的具体步骤如下：

1) 在遥感图像采集之前，需要对无人机及其内置摄像机进行试飞检测，对无人机的总体状态进行检测，判断无人机控制系统运行情况是否正常，电路系统和无线电通信系统是否工作正常等。

2) 除无人机样机外，还需要在地面设置基站，用来接收无人机实时采集的遥感图像。检测地面基站与无人机之间的通信情况。

3) 通过无人机试飞，判断无人机是否能够严格按照规划路线飞行，并完成遥感图像的采集与传输工作，无人机调试完成后进入实验的下一步操作。

4) 查看无人机的作业环境，如果存在严重的遮挡和周围存在强磁干扰等，则无人机图像采集工作将无法顺利进行，需要调整无人机的工作场地。

2.2 生成无人机遥感图像样本

无人机初始采集的遥感图像即为参考图像，参考图像样本的生成结果如图 3 所示。

在图 3 表示图像的基础上，通过改变透明度、旋转等方式，生成图像配准对象，生成结果如图 6 所示。



图 3 无人机遥感图像样本示意图

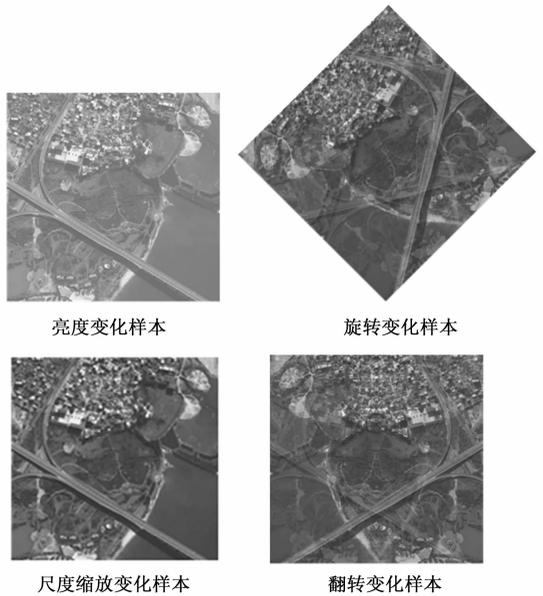


图 4 无人机遥感图像配准对象

图 4 中亮度变化图像样本的透明度 70%，旋转图像配准对象的旋转角度为 45°，尺度缩放比例为 3：2。基于图 3 和图 4 中生成的无人机遥感图像进行相关的配准工作，样本图像为已经预处理完毕和降噪完毕的遥感图像。

2.3 设置图像配准效果量化测试指标

为实现对图像配准效果额量化测试，设置图像特征匹配点的准确率和漏配率作为测试指标，上述指标的数值结果如下：

$$\begin{cases} \eta_{\text{accurate}} = \frac{n_{\text{success}}}{n_{\text{Source Image}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{leak}} = \frac{n_{\text{Source Image}} - n_{\text{mate}}}{n_{\text{Source Image}}} \times 100\% \end{cases} \quad (13)$$

式中， n_{success} 、 n_{mate} 和 $n_{\text{Source Image}}$ 分别表示的是准确匹配特征点、实际匹配特征点以及参考图像中的特征点数量，其中 n_{mate} 的计算公式如下：

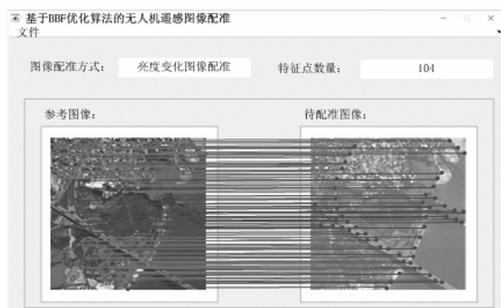
$$n_{\text{mate}} = n_{\text{success}} + n_{\text{error}} \quad (14)$$

式中， n_{error} 为错误匹配特征点。最终计算得出图像特征匹配点的准确率越高、漏配率越低，说明对应方法的图像配准

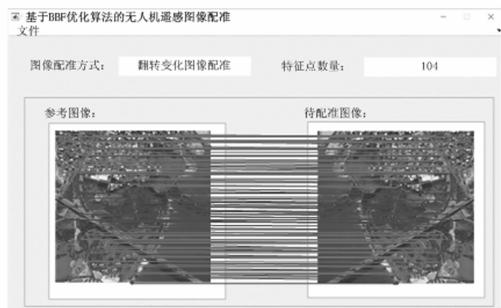
效果越优。

2.4 实验过程与结果分析

针对 4 种不同类型的无人机遥感图像样本，将实验分成 4 个部分，分别将参考图像与待配准图像对象输出到基于 BBF 优化算法的无人机遥感图像配准方法的运行程序中，通过特征提取、特征匹配等步骤，得出待配准对象的实际配准输出结果，图 5 表示的是部分图像的配准结果。



(a) 亮度变化图像



(b) 翻转变化图像

图 5 无人机遥感图像配准结果

按照上述方式进行数字遥感图像的配准，可以得出旋转变化、尺度缩放变化以及翻转变化图像样本的最终匹配结果。为体现出优化设计方法在图像配准方面的优势，设置传统的基于数学形态学改进的图像配准方法和基于格网索引优化的图像配准方法作为实验的对比方法，按照上述步骤就能够得出相应的图像配准结果。通过相关数据的统计，得出反映 3 种方法图像配准效果的测试结果，如表 2 所示。

表 2 图像配准效果测试数据表

配准对象	参考图像特征点数量/个	基于数学形态学改进的图像配准方法		基于格网索引优化的图像配准方法		基于 BBF 优化算法的无人机遥感图像配准方法	
		成功匹配特征点/个	实际匹配特征点/个	成功匹配特征点/个	实际匹配特征点/个	成功匹配特征点/个	实际匹配特征点/个
亮度变化图像	104	95	99	100	102	104	104
旋转变化图像	104	98	100	99	100	102	104
尺度缩放变化图像	104	92	96	98	100	101	102
翻转变化图像	104	94	97	99	101	102	103

将表 1 中的计算得出数据，代入到公式公式 (13) 中，计算得出两种对比方法图像特征匹配点准确率的平均值分别为 91.1% 和 95.2%，平均漏配率分别为 5.8% 和 3.1%，而优化设计方法的平均图像特征匹配点准确率和漏配率分别为 98.3% 和 0.7%。由此证明，优化设计方法能够实现对亮度、旋转、尺度缩放以及翻转等变化图像的配准，且与传统方法相比，图像配准效果更优。与参考图像理论值相比，BBF 优化算法在图像尺度缩放变化和图像翻转变化等层面分别相差了 2 个特征点和 1 个特征点，可以从提升无人机飞行稳定性视角加以控制。

3 结束语

随着无人机设计水平和制造精度的不断提升，其在民用领域的应用的越来越广泛。当前，各种先进的自动化控制技术、智能控制技术、远程控制技术和移动通信技术纷纷被应用到无人机的设计之中，使无人机的智能化水平显著提升，能够替代飞行员去完成各种危险场景下的危险工作。而无人机在遥感图像采集领域的应用较为广泛，因为无人机机体小巧，可以实现飞行高度的自由的上升和降低，而且无人机空中悬停的稳定性较好，有助提升遥感图像拍摄的精度。利用无人机遥感图像的反映局部空间分布，具有机动灵活、时间长、分辨率高、能耗低、成本低、受气象条件影响少等优势，但地表起伏、观测角度多变等因素会导致影像之间的非刚体几何失真、重叠严重。图像配准是解决上述无人机遥感图像问题的手段之一，从此次研究中，通过 BBF 优化算法的应用，以无人机遥感图像为研究对象，实现图像配准方法的优化，从实验结果中可以看出优化方法具有良好的图像配准效果。然而此次实验只准备一组配准对象，得出的测试结果存在一定的局限性，需要在今后的研究工作中进一步补充。

参考文献：

- [1] 陆可, 郑伯桢, 卢春盛, 等. 基于数学形态学改进的无人机影像配准算法 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2021, 44 (10): 1406-1412.
- [2] 张萌生, 杨树文, 贾鑫, 等. 一种基于格网索引优化的遥感影像自动配准算法 [J]. 国土资源遥感, 2021, 33 (1): 123-128.
- [3] 胡育诚, 芮挺, 杨成松, 等. 基于改进 SIFT 的无人机航拍图像快速配准研究 [J]. 计算机科学, 2021, 48 (8): 134-138.
- [4] 赵智祎, 孙婷, 李峰, 等. 基于嵌入式 FPGA 加速 ORB 算法的遥感影像配准方法 [J]. 中国空间科学技术, 2021, 41 (5): 125-135.
- [5] 陈颖, 张祺, 李文举, 等. 参数合成空间变换网络的遥感图像一致性配准 [J]. 中国图象图形学报, 2021, 26 (12): 2964-2980.
- [6] 王亚丽. 结合 Harris 和改进 SIFT 算法的遥感图像配准方法 [J]. 新疆大学学报 (自然科学版) (中英文), 2021, 38 (6): 699-704.

(下转第 245 页)