

基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配方法

闵小翠

(广州华立科技职业学院 计算机信息工程学院, 广州 511325)

摘要: 遥感影像的处理经过预处理、特征提取、匹配等操作后, 每个环节会引入一定的误差, 这些误差在后续控制点匹配时会导致匹配性能的下降; 对此, 研究基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配方法; 利用传感器生成遥感影像, 并通过滤波、去雾、校正等步骤, 提升初始遥感影像质量; 从纹理特征、轮廓特征、光谱特征等方面提取遥感影像特征; 并根据特征提取结果, 量化描述遥感影像控制点; 通过粗匹配、精匹配两个环节得出匹配结果, 采用粗差别除算法剔除遥感影像控制点匹配结果中的误匹配点; 实验结果表明: 优化设计方法相较于双边局部-全局结构一致性方法的平均错误、冗余和缺失匹配系数分别降低了 4.81%、2.45% 和 3.81%, 相较于等角边界距离相似性方法的平均错误、冗余和缺失匹配系数分别降低了 2.32%、0.87% 和 1.47%, 得到了明显降低, 具有更优的匹配效果。

关键词: 粗差别除算法; 遥感影像; 影像控制点; 特征点提取; 控制点匹配

A Remote Sensing Image Control Point Matching Method Based on the Coarse Error Removal Algorithm

MIN Xiaocui

(College of Computer Information Engineering, Guangzhou Huali Science and Technology Vocational College, Guangzhou 511325, China)

Abstract: After pre processing, feature extraction, matching, and other operations, the processing of remote sensing images introduces certain errors in each step, which can lead to a decrease in matching performance during subsequent control point matching. Research on remote sensing image control point matching method based on coarse error removal algorithm is carried out. Using sensors to generate remote sensing images, and improving the initial remote sensing image quality through filtering, defogging, and correction. Extract remote sensing image features from texture features, contour features, and spectral features. And based on feature extraction results, quantitatively describe the control points of remote sensing images. The matching results are obtained through two steps: coarse matching and fine matching. The coarse error removal algorithm is used to eliminate the erroneous matching point pairs in remote sensing image control point matching results. Experimental results show that compared with the bilateral local global structural consistency method, the optimized method reduces the average error, redundancy, and missing matching coefficients by 4.81%, 2.45%, and 3.81%, respectively. And compared with the equiangular boundary distance similarity method, the optimized method reduces those by 2.32%, 0.87%, and 1.47%, respectively, resulting in a significant reduction and better matching performance.

Keywords: coarse error elimination algorithm; remote sensing imagery; image control points; feature point extraction; control point matching

0 引言

遥感影像是指通过遥感技术获取的地球表面的图像

或照片。这些图像通常是由卫星、飞机、无人机或其他遥感平台拍摄或记录的, 记录了各种地物电磁波的照片。遥感影像中控制点是指地面上已知位置的特定地

收稿日期:2024-08-09; 修回日期:2024-09-20。

基金项目:2022 年中国高校产学研创新基金新一代信息技术创新项目(2022IT235);广东省教育厅 2022 年度广东省普通高校特色创新类项目(2022KTSCX372);广州市科学技术局 2024 年度农村科技特派员专题(2024E04J1274);广州市增城区科技创新发展扶持资金项目(经济和社会科技专题项目)(2024ZCKJ13);广东省教育厅第一批省高职院校高水平专业群(GSPZYQ2020082)。

作者简介:闵小翠(1984-),女,硕士,副教授。

引用格式:闵小翠. 基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10):103-110.

物, 这些地物的位置坐标可以通过测量或 GPS 定位等手段精确获取^[1-2]。在遥感图像处理过程中, 这些控制点被用作参考, 以校正和验证遥感影像的地理位置信息, 从而提高影像的定位精度和匹配效果。为保证遥感影像的地理定位准确性、提高遥感数据的利用率, 提出遥感影像控制点匹配方法。

现阶段遥感影像控制点匹配方法有: 文献 [2] 提出的基于残差伪孪生卷积互相关网络的遥感图像控制点匹配方法利用残差层构建的伪孪生网络架构, 对 SAR 图像与可见光图像所提取的特征实施了卷积互相关处理, 以此达成异源遥感图像之间的精确匹配。尽管残差伪孪生卷积互相关网络在理论上能够提升异源遥感图像的匹配精度, 但在实际应用中, 由于图像质量、成像条件、地物复杂度等因素的影响, 匹配精度受到一定限制, 无法达到预期的匹配效果。文献 [3] 提出的改进 AKAZE 算法的无人机影像特征点匹配方法运用 AKAZE 算法来识别图像中的局部稳定且不易变化的特征点, 采用 BEBLID 二进制描述符来刻画这些特征点的独特属性。初步匹配阶段, 通过比较每个特征点的最近邻与次近邻之间的距离比来实现, 为了进一步优化匹配结果, 应用核线几何的约束条件来计算变换矩阵, 这一过程旨在筛选出内点, 从而显著提升匹配的准确性和质量。然而该方法在实际运行过程中, 由于改进 AKAZE 算法引入了更多的计算步骤和参数调整, 导致在处理高分辨率、大数据量的无人机影像时, 计算复杂度增加, 进而影响方法的匹配效果。文献 [4] 提出的基于双边局部-全局结构一致性的遥感影像控制点匹配方法将错配消除问题纳入图匹配框架, 利用局部结构相似性和全局仿射变换一致性构建全局亲和矩阵, 并采用约束整数二次规划方法进行优化, 基于局部结构的 SQFD 构造边的权重, 而使用局部向量相似性来描述两个图之间节点和边的匹配正确性。然而, 该方法主要以静态遥感图像作为匹配对象, 适用性较差。文献 [5] 提出的基于等角边界距离相似性的遥感影像匹配方法从面目标的质心以 10° 为间隔, 顺时针方向从质心向外引 36 条射线, 获取面目标的边缘点, 形成等角边界距离编码, 提出与该编码相适应的几个综合形态指标, 包括自相似度、圆弧度、形态复杂度和质心偏移度, 并建立了面状图斑相似度算法, 结合近邻目标的形态相似度, 实现遥感影像面状图斑匹配算法。然而, 该等角边界距离相似性方法在处理复杂地形时, 存在匹配精度下降的问题。

粗差别除算法是一种基于统计原理的数据预处理方法, 通过分析和比较数据集中的各个观测值, 识别出与大多数观测值显著不同的异常值, 并将其从数据集中剔除, 从而提高数据的准确性和可靠性。对此, 研究基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配方法。以期提升遥

感影像控制点的匹配效果, 具体研究如下:

1) 生成遥感影像, 将遥感成像设备安装在飞行设备上, 根据遥感成像设备得到遥感影像数据。并对获取的遥感影像数据进行滤波增强、云雾去除与几何校正处理。

2) 提取遥感影像特征, 以上述预处理后的遥感影像为处理对象, 从纹理特征、轮廓特征、光谱特征等方面提取遥感影像特征。并根据遥感影像特征的提取结果, 确定初始遥感影像控制点, 并进行坐标变换。

3) 确定初始遥感影像控制点, 选择遥感影像中的控制点, 并将遥感影像中的控制点映射到实际空间坐标系中, 实现模板坐标系与实际空间之间的映射。

4) 实现遥感影像控制点匹配, 将描述的遥感影像控制点作为匹配对象, 进行控制点匹配。首先通过粗匹配快速筛选可能的匹配点对, 缩小搜索范围; 随后, 精匹配阶段进一步验证和优化这些匹配点对, 剔除重复匹配以提高匹配质量; 最后, 利用粗差别除算法深入处理匹配结果。

1 遥感影像控制点匹配方法

遥感影像控制点的基本匹配原理就是在相同的坐标系环境下, 选择遥感影像的特征点作为控制点, 将提取的控制点与设定对象进行匹配, 得出最优匹配点。然而, 在匹配和变换过程中会引入一定的误差, 需要通过误差校正来最小化这些误差。本文设计的遥感影像控制点匹配方法以粗差别除算法作为技术支持, 对初始匹配的遥感影像控制点匹配结果中的偏差控制点进行剔除处理, 有效提升遥感影像控制点的匹配效果。

1.1 生成遥感影像

利用传感器捕捉地球表面反射、辐射或发射的电磁辐射, 并将其转化为可视化的动态图像。将遥感成像设备安装在飞行设备上, 根据生成遥感影像对分辨率的要求, 确定遥感飞行设备的飞行高度, 即:

$$H = \frac{f \times L}{a \times R} \quad (1)$$

其中: f 和 L 分别为遥感设备的镜头焦距和地面采样距离, a 为遥感影像的生成分辨率, R 为分辨率因子, 当 $R = 1$ 时, 表示标准分辨率; 当 $R < 1$ 时, 表示低分辨率; 当 $R > 1$ 时, 表示高分辨率。

利用遥感成像设备^[3], 得出遥感影像数据为:

$$I(x, y) = \kappa_{\text{att}} \cdot \phi \cdot \mu(x, y) I'(x, y) + [1 - I'(x, y)] \cdot \tan \theta \quad (2)$$

其中: κ_{att} 和 ϕ 分别为太阳辐射到达地面的衰减系数和太阳辐照度, $\mu(x, y)$ 为 (x, y) 位置上的地表反射率, $I'(x, y)$ 为 (x, y) 位置的实际坐标数据, θ 为成像角^[4]。按照上述方式, 通过反射信号的接收与拼接, 即可得出遥感影像样本的生成结果^[5]。

1.2 遥感影像预处理

针对 1.1 小节获取的遥感影像数据 $I(x, y)$ 进行滤波增强、云雾去除与几何校正处理^[5-6]。为了同时调整图像亮度范围和对比度，并降低遥感影像中的噪声含量，采用同态滤波和高斯滤波相结合的方式，完成遥感影像的滤波增强处理。遥感影像同态滤波处理过程可以量化表示为：

$$I_{\text{hom}}(x, y) = (\delta_{\text{high}} - \delta_{\text{low}}) \{1 - e^{-c[l(x, y)/F_0]^2}\} - I(x, y) \quad (3)$$

式中， δ_{low} 和 δ_{high} 分别为控制遥感影像低频和高频增益的参数， c 为控制滤波函数形状的常数， $l(x, y)$ 和 F_0 分别为频域中任意像素点到频谱中心的距离和截止频率，其中 $l(x, y)$ 的计算函数如下：

$$l(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{M}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{N}{2}\right)^2} \quad (4)$$

其中： M 和 N 分别为初始遥感影像的宽度和高度。完成同态滤波处理后，能够增强遥感影像对比度并去除阴影^[7]。

遥感影像高斯滤波处理过程可以量化表示为：

$$I_{\text{Gaussian}}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-x^2+y^2/2\sigma^2} I_{\text{hom}}(x, y) \quad (5)$$

其中： σ 为标准差，该参数的具体取值决定了高斯函数的宽度和平滑程度^[8]。将初始生成遥感影像中的所有像素点输入到上述公式中，即可得出遥感影像的滤波增强处理结果。

利用物理模型法去除遥感影像中的云雾，即基于大气散射模型，通过估算大气光和透射率来恢复无雾图像。遥感影像云雾去除处理结果如下：

$$I_{\text{fog}}(x, y) = \frac{I(x, y) - G}{\max(\lambda, \lambda_0)} + I_{\text{Gaussian}}(x, y) \quad (6)$$

其中： G 为遥感影像成像环境中的全局大气光强， λ 和 λ_0 分别对应的是透射率及其下限值^[9]。在实际的处理过程中，根据实际情况确定并调整相关参数，保证遥感影像的最佳处理效果。

几何校正的主要目的是消除或减轻遥感影像中的几何畸变，使得影像中的地物能够按照其真实的地理位置进行准确表达。遥感影像几何校正结果为：

$$\begin{cases} I_{\text{check}}(x) = I_{\text{fog}}(x)(1 + \Delta x)\kappa_{\text{rotate}-x} \\ I_{\text{check}}(y) = I_{\text{fog}}(y)(1 + \Delta y)\kappa_{\text{rotate}-y} \end{cases} \quad (7)$$

其中： Δx 和 Δy 分别为遥感影像在水平和垂直方向的平移量， $\kappa_{\text{rotate}-x}$ 和 $\kappa_{\text{rotate}-y}$ 分别为遥感影像在水平和垂直方向的旋转系数^[10]。重复上述操作，通过滤波、去雾和校正 3 个步骤，实现遥感影像的预处理，并将预处理结果赋值给初始生成影像。

1.3 提取遥感影像特征

遥感影像特征是遥感影像控制点的重要组成部分，

以上述预处理后的遥感影像为处理对象，从纹理特征、轮廓特征、光谱特征等方面，提取遥感影像特征。

1.3.1 纹理特征

遥感影像的纹理特征分量包括：粗糙度、对比度、方向度。粗糙度是描述图像表面质感的一个关键特征，通常用于区分不同地物的表面平滑度或粗糙度^[11]，表示为：

$$\tau_{\text{roughness}} = \frac{1}{MN} \sum_{I(x)=1}^M \sum_{I(y)=1}^N Q_{\text{nest}}[I_{\text{check}}(x), I_{\text{check}}(y)]$$

其中： $Q_{\text{nest}}(x, y)$ 为平均强度差。

对比度是影像中小区域灰度变化的总量，反映了纹理的清晰程度以及邻近像元之间的反差。表示为 $\tau_{\text{contrast}} = \frac{g_{\text{max}} - g_{\text{min}}}{g_{\text{max}} + g_{\text{min}}}$ 。其中， g_{max} 、 g_{min} 是最大灰度值与最小灰度值。

方向度特征反映地物的空间分布和排列规律表示为：

$$\tau_{\text{direction}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [|I_{\text{check}}(x_i) - I_{\text{check}}(x_j)| + |I_{\text{check}}(y_i) - I_{\text{check}}(y_j)|]}{2}$$

基于此，获得纹理特征提取结果为：

$$\tau_{\text{texture}} = (\tau_{\text{roughness}} + \tau_{\text{contrast}} + \tau_{\text{direction}}) \quad (8)$$

1.3.2 轮廓特征

遥感影像的轮廓特征采用 SIFT 特征子形式进行表示，SIFT 特征算子的提取原理如图 1 所示^[12]。

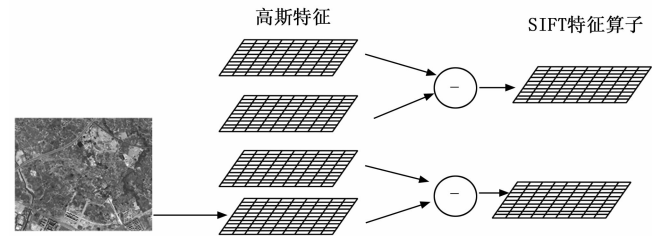


图 1 SIFT 特征算子提取原理图

通过高斯模糊和尺度空间金字塔构建，检测局部极值点并精确确定其位置和尺度。利用梯度方向直方图确定关键点的主方向，最终组合子块特征向量形成关键点的最终特征向量^[13-14]。则轮廓特征分量的提取结果为：

$$\tau_{\text{Main direction}} = \tan^{-1} \left[\frac{C(x, y+1) - C(x, y-1)}{C(x+1, y) - C(x-1, y)} \right] \quad (9)$$

其中： $C(x, y)$ 为尺度空间在像素点 (x, y) 位置上的具体取值^[15]。

1.3.3 光谱特征

另外遥感影像光谱特征分量为光谱均值，该特征分量的提取结果如下：

$$\tau_{\text{spectrum}} = \frac{1}{n_{\text{pixel}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{band}}} \beta_i \quad (10)$$

其中: β_i 为遥感图像中第 i 个像元的反射率值, n_{pixel} 表示的是遥感图像中包含的像元总数。

根据上述流程获取遥感影像特征 $\tau = \tau_{\text{texture}} + \tau_{\text{Main direction}} + \tau_{\text{spectrum}}$ 。

1.4 描述遥感影像控制点

根据上述遥感影像特征 τ 的提取结果, 确定初始遥感影像控制点, 并对控制点进行坐标变换。

1.4.1 确定初始遥感影像控制点

根据遥感影像特征分量的提取结果, 选择遥感影像中的控制点, 遥感影像控制点涉及其在影像上的坐标位置以及特征属性, 由此可以将遥感影像中任意控制点的量化描述结果为:

$$\begin{cases} K_x = \tau_{\text{con}}(x) \times \tau x_K \\ K_y = \tau_{\text{con}}(y) \times \tau y_K \end{cases} \quad (11)$$

式中, (x_K, y_K) 为控制点在实际空间中的二维坐标, $\tau_{\text{con}}(x)$ 和 $\tau_{\text{con}}(y)$ 为遥感影像综合特征在水平和竖直方向上的分量, 求解结果为:

$$\begin{cases} \tau_{\text{con}}(x) = \tau_{\text{con}} \times \cos\vartheta \\ \tau_{\text{con}}(y) = \tau_{\text{con}} \times \sin\vartheta \end{cases} \quad (12)$$

其中: ϑ 为特征偏向角^[16]。按照上述方式即可得出遥感影像当前帧的控制点描述结果, 在实际的控制点量化描述过程中, 要求控制点数量不为 1, 且均匀地分布在影像上, 以确保整个影像区域的几何校正精度。

1.4.2 遥感影像控制点坐标变换

由于遥感影像控制点匹配过程中使用的匹配模板可能存在与当前遥感影像不处于同一坐标系中, 因此需要对控制点进行坐标变换, 基本变换原理就是将遥感影像中的控制点映射到实际空间坐标系中, 进而根据匹配模板实现模板坐标系与实际空间之间的映射, 通过上述两个步骤, 即可将描述的遥感影像控制点映射到匹配模板所处的坐标系中^[17]。遥感影像坐标系与空间环境坐标系之间的转换关系, 如图 2 所示。

根据图 2 表示的转换关系, 可以得出遥感影像中任意一点到空间环境中的转换结果为:

$$\begin{bmatrix} H_x(i) \\ H_y(i) \\ H_z(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W & P \\ 0^U & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(i) \\ y(i) \\ 1 \end{bmatrix}, (K_x, K_y) \in I(x, y) \quad (13)$$

其中: $x(i)$ 、 $y(i)$ 为遥感影像中的任意一个像素点, W 、 P 和 U 分别表示旋转、平移以及景深系数, 由此可以得出遥感影像像素点在空间环境中的映射结果, 即控制点 $[H_x(i), H_y(i), H_z(i)]$ ^[18]。由于遥感影像处于动态变化状态, 因此需要对描述的控制点进行动态输出, 即按照遥感影像中的图像帧顺序, 对控制点进行连续输出, 从而实现控制点的追踪与动态输出。

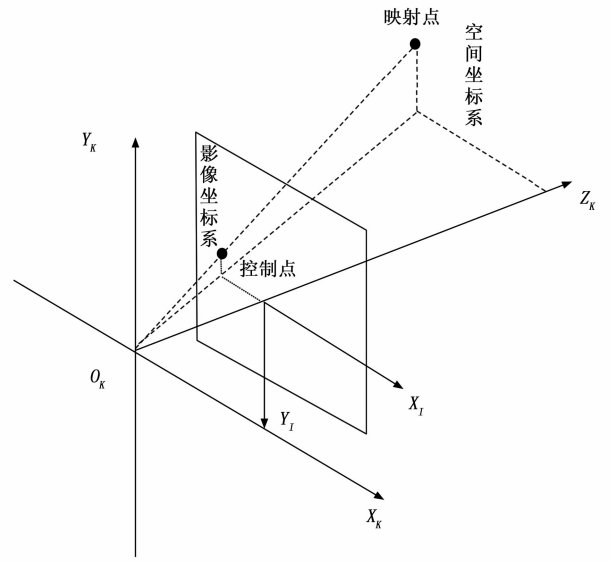


图 2 遥感影像坐标系与空间环境坐标系的转换关系图

1.5 实现遥感影像控制点匹配

将上述描述的遥感影像控制点 $[H_x(i), H_y(i), H_z(i)]$ 作为匹配对象, 进行遥感影像控制点匹配。基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配过程首先通过粗匹配快速筛选出可能的匹配点对, 缩小搜索范围。随后, 精匹配阶段进一步验证和优化这些匹配点对, 剔除重复匹配以提高匹配质量。最后, 利用粗差别除算法深入处理匹配结果, 通过量化分析匹配点间的相互关联性和系统误差, 构建解析曲面单元模型以探测粗差。该算法通过比较模型误差与预设标准, 识别并过滤掉误匹配点对, 有效实现了遥感影像控制点的高效、准确匹配。

1.5.1 粗匹配

粗匹配的主要目的是快速地从大量候选匹配点中筛选出可能的匹配点对, 以缩小搜索范围, 为后续的精匹配提供初始的匹配点对集合^[19]。粗匹配的基本原理就是计算选择遥感影像控制点与模板影像中的匹配点进行相似度计算, 计算公式为:

$$s_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{n_w} [B(i) - K(j)]^2} \quad (14)$$

其中: $B(i)$ 为设定的模板影像中的第 i 个匹配点, $H(j)$ 表示第 j 个匹配对象, n_w 为控制点向量维度, 一般包括 x 和 y 两个维度。

对于每个匹配点设定阈值为 s_0 , 计算公式为:

$$s_0 = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_w} \omega_k [B_k(i) - K_k(j)]^2} \quad (15)$$

其中: ω_k 为第 k 个维度的权重。

若 $s_{ij} \leq s_0$, 则说明当前控制点与匹配模板中的第 i 个节点互为匹配对, 否则认为当前控制点与对应匹配点无法形成匹配对, 需进行下一组控制点与模板点的匹

配，直至所有控制点、模板特征点均匹配完成为止。则最终的匹配结果以公式 (17) 的形式输出：

$$D_{\zeta} = [B(i), K(j)], s_{ij} \leq s_0 \tag{16}$$

由此实现遥感影像控制点的粗匹配工作，并输出相应结果。

1.5.2 精匹配

精匹配的主要任务是对粗匹配阶段筛选出的匹配点对进行进一步的验证和优化，剔除重复匹配节点。首先利用公式 17 计算控制点匹配对的冗余度：

$$\gamma = \frac{D_{\zeta} \cdot D_{\xi}}{\|D_{\zeta}\| \cdot \|D_{\xi}\|} \tag{17}$$

其中： D_{ζ} 和 D_{ξ} 为粗匹配输出的任意两个匹配对，若计算得出控制点匹配对之间的冗余度高于 0.9，则说明 D_{ζ} 和 D_{ξ} 互为冗余匹配对，此时需要剔除 D_{ζ} 或 D_{ξ} ，降低匹配结果的冗余度。

1.5.3 利用粗差剔除算法过滤误匹配点对

除了重复匹配点对外，由于控制点之间的相似性、噪声干扰等因素，导致粗匹配输出结果中存在误匹配点对，为保证控制点的匹配精度，采用粗差剔除算法去除粗匹配结果中的误匹配点对^[20]。粗差剔除算法的执行原理与流程如图 3 所示。

考虑到影像匹配中粗差的具体特性，于影像中对应区域的局部细微区域内，通过全面考量匹配点间的相互关联性以及成像即刻可能存在的系统误差，我们能够构建出最优地符合同名像点数学模型所需的解析曲面单元。遥感影像控制点匹配对的粗差探测过程可以量化表示为：

$$\begin{cases} e_x = \gamma | B_x - h_{\text{tran}}(K_x) - \varphi_x | \\ e_y = \gamma | B_y - h_{\text{tran}}(K_y) - \varphi_y | \end{cases} \tag{18}$$

其中： φ_x 和 φ_y 为统计关系点位的误差均值， $h_{\text{tran}}()$ 为曲面窗口元间模型变换函数。根据公式 (17) 的计算结果，判断误差是否满足如下剔除条件：

$$\begin{cases} e_x > \kappa_b \vartheta_x \\ e_y > \kappa_b \vartheta_y \end{cases} \tag{19}$$

式中， ϑ_x 和 ϑ_y 分别为曲面元模型误差在水平和竖直方向上的分量， κ_b 为标准偏差倍数。将粗匹配、精匹配的输出结果代入公式 (17) 中，判断计算结果是否满足公式 (18) 表示的剔除条件，若满足剔除条件，则认为对应的遥感影像控制点匹配点对为误匹配点对，对其进行过滤处理，否则无需执行过滤操作。重复上述操作，对遥感影像中描述的所有控制点进行匹配与剔除过滤，完成遥感影像控制点的匹配工作。

2 匹配效果测试实验分析

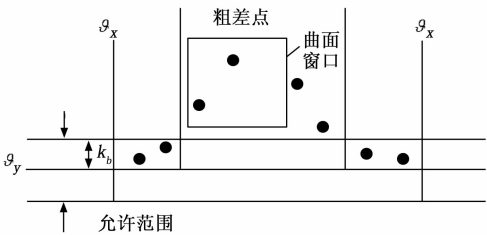
为了测试优化设计基于粗差剔除算法的遥感影像控制点匹配方法的匹配效果，设计匹配效果测试实验，此次实验的基本原理为：利用成像设备，在不同的实验环境下生成遥感影像样本，以此作为实验对象。在开发环境下，通过优化设计方法的运行得出不同类型遥感影像控制点与模板图像之间的匹配结果，并与预期匹配结果进行比对，得出反映匹配效果的测试结果。

2.1 准备遥感影像样本

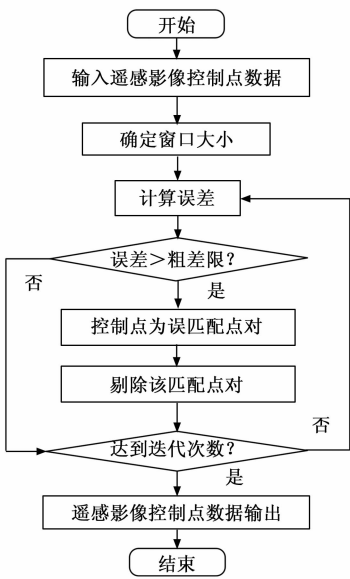
2.1.1 选择并安装遥感成像设备

遥感成像设备包括数字航测相机和无人机两个部分，数字航测相机选择的是 DMZ 相机。选择的无人机设备型号为 Trimble UX5，该无人机机身采用航空泡沫材料和碳纤维骨架的复合结构，具有极高的抗冲击能力，能够在复杂环境中稳定工作。将选择的 DMZ 相机安装到无人机设备上。

选择的无人机内置云台可以实现镜头垂直向下拍摄，镜头视场角 94°。为了测试优化设计方法对不同分辨率遥感影像控制点的匹配效果，通过控制无人机的飞行高度，分别生成低分辨率遥感影像和高分辨率遥感影像，对应的无人机飞行高度分别为 500 m 和 200 m。无人机的飞行高度均为 5 m/s，且在遥感影像生成过程中无人机的航线一致。设置相机的曝光时间为 1/2 s，增益为 +6 dB，手动白平衡数值设置为 2 500，连续成像



(a) 算法原理



(b) 算法流程

图 3 粗差剔除算法原理与流程图

时间为 30 min。

2.1.2 确定遥感成像目标

此次实验选择某市区作为遥感成像目标, 该市的总占地面积为 550 km^2 , 包含多个居民区、河流以及商业区等。城市高层建筑主要集中在市中心区域, 河流分布在城市内部, 并沿河建设了多个公园和绿地。

2.1.3 生成遥感影像样本

根据遥感成像目标的分布情况, 规划无人机的飞行路线, 在硬件设备的支持下, 生成低分辨率和高分辨率两种不同类型的遥感影像样本。图 4 为遥感影像样本的某一帧图像生成结果。



(a) 低分辨率

(b) 高分辨率

图 4 遥感影像样本示意图

按照上述方式可以得出所有遥感影像样本的生成结果, 并保证所有影像样本格式均为 JSON, 影像尺寸大小均为 1280×860 。将初始生成的遥感影像样本作为控制点的匹配模板, 在此基础上分别对初始遥感影像样本进行旋转、平移、投影等变换处理, 即可得出待匹配的遥感影像。其中某一待匹配遥感影像的生成结果如图 5 所示。



图 5 待匹配遥感影像样本生成结果

按照上述方式可以得出所有遥感影像样本的生成结果, 为保证实验结果的可信度, 共准备 200 个遥感影像样本, 且对其进行逐一编号。具体实验流程如下所示:

1) 选择数字航测相机 (DMZ 相机) 和无人机 (Trimble UX5) 遥感成像设备进行遥感影像样本的获取。

2) 使用 Matlab 进行图像处理和分析, 在 Matlab 环境下编写并优化基于粗差剔除算法的遥感影像控制点匹配方法, 并使用 Python 的 Pandas 库进行数据管理和

分析。

3) 将初始生成的遥感影像样本作为控制点的匹配模板。对初始遥感影像样本进行旋转、平移、投影等变换处理, 生成待匹配的遥感影像, 如图 6 所示。

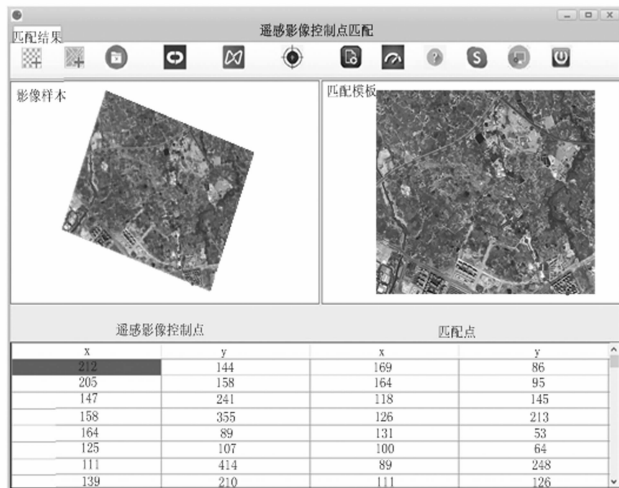


图 6 低分辨率遥感影像控制点匹配结果

4) 在 Matlab 中运行优化设计方法, 对生成的 200 个遥感影像样本进行控制点匹配, 并记录每次匹配的结果。

5) 使用 Python 的 Pandas 库对匹配结果进行统计分析, 生成匹配效果的统计图表。

2.2 设定粗差剔除算法运行参数

优化设计的遥感影像控制点匹配方法以粗差剔除算法作为技术支持, 为保证优化设计方法在实验环境中的正常运行, 需要对相关运行参数进行设置。其中曲面窗口大小为 200×200 , 标准偏差倍数为 3, 即任何超出拉伊达准则 3 倍的控制点都可能被视为粗差点。根据影像的分辨率分别设置低分辨率和高分辨率中像素值的绝对阈值为 5 和 10。由于优化设计匹配方法需要迭代运行粗差剔除算法, 因此设置迭代次数为 100。将上述运行参数设定结果以数据方式输入到控制点匹配方法的运行程序中。

2.3 描述匹配效果测试实验过程

优化设计的基于粗差剔除算法的遥感影像控制点匹配方法选择 IDE 作为开发环境, 既可独立运作, 也能无缝接入其他应用程序中。在上述开发环境下, 实现优化设计方法的开发, 将准备的低分辨率遥感影像样本输入到匹配方法对应的运行程序中, 得出对应的控制点匹配结果, 如图 6 所示。

按照上述方式, 可以得出所有遥感影像样本的控制点匹配结果。实验设置传统的基于双边局部-全局结构一致性的遥感影像控制点匹配方法和基于等角边界距离相似性的遥感影像匹配方法作为实验对比方法, 在相同

的实验环境下，实现对比方法的开发，并得出相应的控制点匹配结果。

2.4 设置匹配效果测试指标

实验设置错误匹配系数、冗余匹配系数和缺失匹配系数作为控制点匹配效果的测试指标，错误匹配系数和冗余匹配系数的测试结果如下：

$$\left\{\begin{aligned}\eta_{\text{err}} &= \frac{N_{\text{err}}}{N} \times 100\% \\ \eta_{\text{redu}} &= \frac{\frac{N_{\text{repeat}}}{2}}{N} \times 100\% \\ \eta_{\text{deletion}} &= \frac{N - N_{\text{mate}}}{N} \times 100\%\end{aligned}\right. \quad (20)$$

式中， N_{err} 、 N_{repeat} 和 N 分别为匹配错误的控制点数量、匹配重复的控制点数量以及待匹配的控制点总数量， N_{mate} 为成功匹配的遥感影像控制点，根据设定的遥感影像模板可以确定变量 N 的具体取值。最终计算得出错误、冗余和缺失匹配系数取值越小，证明对应方法的匹配效果越优。

2.5 匹配效果测试实验结果与分析

2.5.1 低分辨率遥感影像控制点匹配效果

通过低分辨率遥感影像控制点匹配数据的统计，得出优化设计方法在低分辨率遥感影像控制点匹配工作中的匹配效果测试结果，如表 1 所示。

表 1 低分辨率遥感影像控制点匹配效果测试数据表

样本编号	待匹配控制点总数量/个	基于双边局部-全局结构一致性的遥感影像控制点匹配方法			基于等角边界距离相似性的遥感影像匹配方法			基于粗差别除算法的遥感影像控制点匹配方法		
		匹配错误控制点数量/个	重复匹配控制点数量/个	成功匹配控制点数量/个	匹配错误控制点数量/个	重复匹配控制点数量/个	成功匹配控制点数量/个	匹配错误控制点数量/个	重复匹配控制点数量/个	成功匹配控制点数量/个
1	80	5	6	75	2	4	78	1	2	80
2	120	6	8	115	3	4	118	1	2	118
3	160	7	8	153	5	4	156	0	4	160
4	180	3	4	172	4	6	177	1	4	179
5	220	5	6	210	1	4	217	1	2	219
6	100	9	10	95	6	6	97	2	2	100
7	90	6	6	88	4	8	89	1	4	89
8	150	4	8	144	2	2	149	0	2	150

将表 1 中的数据代入公式 (17) 中，计算得出 3 种方法的平均错误匹配系数分别为 4.73%、2.82% 和 0.78%，平均冗余匹配系数分别为 2.88%、2.01% 和 1.10%，平均缺失匹配系数分别为 4.38%、1.81% 和 0.47%。

2.5.2 高分辨率遥感影像控制点匹配效果

以高分辨率遥感影像作为匹配对象，按照相同方式统计匹配结果数据，通过公式 (18) 的计算得出高分辨率遥感影像控制点匹配效果的测试结果，如图 7 所示。

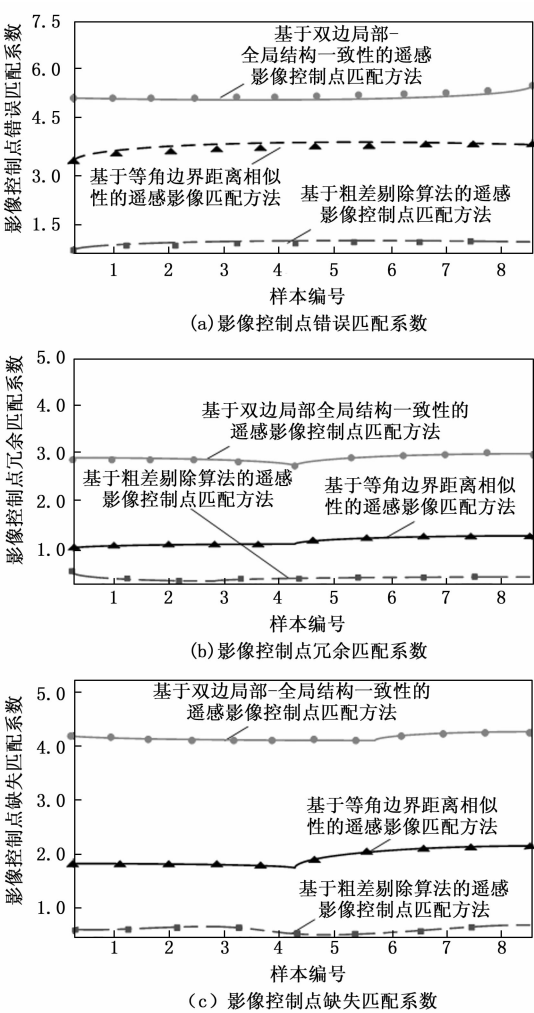


图 7 高分辨率遥感影像控制点匹配效果对比结果

通过对图 7 中数据的分析，发现基于双边局部-全局结构一致性的遥感影像控制点匹配方法错误、冗余和缺失匹配系数的平均值分别为 5.40%、2.85% 和 4.22%，基于等角边界距离相似性的遥感影像匹配方法错误、冗余和缺失匹配系数的平均值分别为 3.54%、1.27% 和 1.88%，而优化设计方法得出平均错误、冗余和缺失匹配系数分别为 1.22%、0.40% 和 0.41%。相较于双边局部-全局结构一致性方法平均错误、冗余和缺失匹配系数分别降低了 4.81%、2.45% 和 3.81%，相较于等角边界距离相似性方法平均错误、冗余和缺失匹配系数分别降低了 2.32%、0.87% 和 1.47%。

3 结束语

准确的遥感影像匹配结果对于地表特征提取、地物信息分析、地图制作和更新、城市规划、土地管理等多

个领域都具有重要意义,能够为科学研究提供可靠的数据基础,为实际应用提供决策支持。在此次研究中,通过匹配策略与粗差剔除算法相结合,成功地降低了错误匹配和重复匹配的风险,确保了匹配控制点的精确性与有效性。粗差剔除算法在这一过程中发挥了关键作用,有效滤除了那些可能干扰匹配精度的异常数据点,为后续的影像处理和地理空间分析奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王高杰,郝向阳,苗书锋.一种视觉导航影像特征点整体匹配算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(22):255-263.
- [2] 邹融平,朱 斌,王晨阳,等.基于残差伪李生卷积互相关网络的异源遥感图像匹配算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(12):458-466.
- [3] 宗慧琳,袁希平,甘 淑,等.改进 AKAZE 算法的泥石流区无人机影像特征匹配[J].测绘通报,2023(2):91-96.
- [4] CHEN Q Y, FENG D Z. Feature matching of remote-sensing images based on bilateral local-global structure consistency[J]. IET Image Processing, 2023, 17(14): 3909-3926.
- [5] 陈 军,马世岩,陈 玲,等.基于等角边界距离相似性的遥感影像面状图斑匹配研究[J].地球信息科学学报,2022,24(11):2234-2244.
- [6] 张 昆,王 涛,张 艳,等.一种基于面阵摆扫式航空影像的特征匹配方法[J].地球信息科学学报,2022,24(3):522-532.
- [7] 姚永祥,段 平,李 佳,等.联合对数极坐标描述与位置尺度特征的无人机影像匹配算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(8):1271-1278.
- [8] 刘伟玉,万 一,张永军,等.基于相位均匀卷积的 LiDAR 深度图与航空影像高效匹配方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(8):1309-1317.
- [9] 高孟豪,郭立君,张 荣,等.基于匹配线索回归的侧面脊柱关键点检测[J].激光与光电子学进展,2024,61(4):327-334.
- [10] 王明军,易 芳,李 乐,等.自适应局部邻域特征点提取和匹配的点云配准[J].红外与激光工程,2022,51(5):431-440.
- [11] 潘 峰,沈建新,秦 顺,等.融合 GMS 的 ORB 特征点提取与匹配算法[J].计算机工程与设计,2022,43(8):2244-2251.
- [12] 王浩桐,郭中华.锚框策略匹配的 SSD 飞机遥感图像目标检测[J].计算机科学与探索,2022,16(11):2596-2608.
- [13] 王 炎,刘根旺,张 晰,等.多时相 SAR 船只目标的特征点匹配方法对比分析[J].计算机应用,2023,43(s2):186-190.
- [14] 曹现刚,袁 娜,王 鹏,等.面向煤矸体体积检测的图像特征匹配算法研究[J].煤炭技术,2023,42(2):175-178.
- [15] 黄妍妍,盖绍彦,达飞鹏.三支空间变换注意力机制的图像匹配算法[J].系统工程与电子技术,2023,45(11):3363-3373.
- [16] 张 珊,张 卡,赵立科,等.结合网状描述符和单应约束的近景影像直线匹配[J].地球信息科学学报,2022,24(11):2186-2197.
- [17] 杨 威,曹金山,张 欢,等.拓扑结构引导的遥感影像匹配外点去除算法[J].激光与光电子学进展,2022,59(18):427-435.
- [18] 谢勋伟.累积结构特征描述的多模态遥感影像匹配[J].电讯技术,2022,62(12):1780-1785.
- [19] 王丽娜,梁怀丹,王中石,等.面向可见光和 SAR 影像配准的特征点检测[J].光学精密工程,2022,30(14):1738-1748.
- [20] 姜 三,罗海涵,危 迟,等.特征聚类与霍夫投票约束下影像匹配粗差剔除[J].测绘科学,2023,48(11):69-81.
- [11] 程 翔,常浩然,刘 岩.单片集成光耦隔离式驱动芯片[J].光学精密工程,2023,31(7):1022-1030.
- [12] 郭显鑫,马文博,汪晓文,等.基于光耦的脉冲指令开关机控制电路[J].电源技术研究与设计,2019,43(9):1536-1538.
- [13] 崔城诚,陈 伟,张 璇,等.基于 Labview 的流量控制系统开发[J].自动化技术与应用,2023,42(6):143-145.
- [14] 石 英,陈心浩,倪文军,等.基于 FPGA 与 LabVIEW 的虚拟示波存储系统设计与实现[J].实验室研究与探索,2023,42(4):21-33.
- [15] 黄伟群,李信合,宋洁乐,等.基于电流磁效应的定子反嵌测量系统设计[J].家电科技,2022(6):47-59.
- [16] 鹿文龙,王 刚.基于 PGA900 的薄膜微压传感器研究[J].电子产品世界,2022,29(1):52-55.
- [17] 司 毅,杨 威,杜爱华,等.基于 Labview 的天线自动测试系统设计与实现[J].舰船电子对抗,2023(1):117-120.
- [18] 谢 艳,贾雨龙,郝红斌,等.基于 C# 和 RS485 的分布是多点位温湿度监控系统设计[J].自动化控制理论与应用,2022(8):13-22.
- [19] 毛开梅,黄晓明,邹 星,等.面向对象的计算机监控软件程序设计方法[J].微型电脑应用,2018,34(10):40-42.
- [20] 王振华,萧耀友.某型导弹控制系统电池自动测试仪设计[J].中国设备工程,2018(12):119-120.

(上接第 22 页)