DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0118-05

# 基于改进 KAZE 算法的露天煤矿无人机影像匹配方法

贺东东[1], 郝 跃[1], 白怡明[2], 杨 卓[2]

(1.国能新疆准东能源有限责任公司, 乌鲁木齐 830000; 2.中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 沈阳 110015)

**摘 要**:针对露天煤矿无人机影像处理中 SIFT 算法因高斯分解导致的边界模糊及匹配误差大问题,提出基于改进 KAZE 算法的露天煤矿无人机影像匹配方法。通过 Retinex 对数运算去除影像光照分量,得到去雾处理后的露天煤矿无人机影像。应用融合非线性扩散滤波思想、快速显示扩散算法改进 KAZE 算法,分析预处理后的影像,在非线性尺度空间内检测出图像特征点,并借助 FREAK 算子生成二进制特征描述子。最后,利用 Grid-KNN 算法匹配所有特征点,即可得到参考影像和待匹配影像间的匹配结果。实验结果表明该方法匹配结果的 RMSE 值始终小于 0.1,显著提升无人机影像匹配精度与质量。在不同天气条件下,综合评分均达到 8.0 以上,去雾效果和匹配质量稳定优秀。该方法可为露天煤矿的影像处理和动态监测提供技术支撑。

**关键词**:改进 KAZE 算法;非线性尺度空间;特征点;无人机影像;去雾处理;影像匹配

**中图分类号**: TP391.41;TN237;V279+.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)07-0118-05

# UAV image matching method in open pit coal mines based on improved KAZE algorithm

He Dongdong[1], Hao Yue[1], Bai Yiming[2], Yang Zhuo[2]

(1. State Energy, Xinjiang Zhundong Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
2. CCTEG Shenyang Engineering Company, Shenyang 110015, China)

**Abstract**: Aiming at the boundary blurring and matching error caused by Gaussian decomposition of SIFT algorithm in opencast coal mine UAV image processing, this paper proposes an improved KAZE algorithm based UAV image matching method. By Retinex logarithmic calculation, the light component of the image is removed, and the UAV image of the opencast coal mine after fog removal is obtained. KAZE algorithm is improved by fusion nonlinear diffusion filtering and rapid display diffusion algorithm. The pre-processed images are analyzed, and the feature points are detected in the nonlinear scale space. The binary feature descriptors are generated by FREAK operator. Finally, the Grid-KNN algorithm is used to match all feature points, and the matching result between the reference image and the image to be matched can be obtained. The experimental results show that the RMSE value of the matching results is always less than 0.1, which significantly improves the accuracy and quality of UAV image matching. Under different weather conditions, the comprehensive scores all reached above 8.0, demonstrating stable and excellent dehazing effects and matching quality. This method can provide technical support for image processing and dynamic monitoring in open-pit coal mines.

**Keywords**: improved KAZE algorithm; nonlinear scale space; feature points; UAV image; dehazing treatment; image matching

无人机摄影测量平台以其灵活性、高效性和易操作性,在环境监测与城市规划等领域凸显优势,尤其适用于露天煤矿监测管理[1]。然而,露天煤矿环境复杂多变,无人机在飞行过程中易受到外界因素干扰[2],导致获取的影像数据存在平移、旋转和视角变化等问题,为后续的影像应用带来了巨大挑战,影像匹配作为处理核心,其重要性不言而喻。

多位学者针对影像匹配技术提出了各具特色的改进方法,刘兴华[3]通过引入自适应阈值划分图像区域,结合面向快速旋转的二进制鲁棒独立基本特征(oriented fast and rotated brief,ORB)算法与亚像素定位,实现了特征点的精确标注与匹配,但 ORB 的旋转不变性局限导致大旋转角图像匹配效果不佳。谢强等[4]则创新性地将格式塔心理学邻近原则融入 ORB 算法,构建分层描述符,有效提升了特征检测质量与匹配稳定性,然而,在序列影像拼接中累积误差的影响限制了其在大规模影像处理中的应用鲁棒性。王一等[5]采用联合双边滤波预处理结合改进 SIFT 算法,配合二进制描述子,通过 K 近邻算法实现了特征匹配,但算法性能对初始化与参数设置高度依赖,缺乏标准化参数指导,影响了匹配精度。Tang 等[6]另辟蹊径,提出了基于语义感知的影像匹配方法,依托包含全局空间注意力机制的深度学习网络,构建了特征提取、融合及配

**收稿日期**:2025-01-14;**录用日期**:2025-02-24

**作者简介**:贺东东(1990—),男,工程师,研究方向为电气自动化。

**引用本文**:贺东东, 郝跃, 白怡明, 等. 基于改进 KAZE 算法的露天煤矿无人机影像匹配方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):118-122. (He Dongdong, Hao Yue, Bai Yiming, et al. UAV image matching method in open pit coal mines based on improved KAZE algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):118-122.)

准的一体化框架,尽管该方法在自适应学习与匹配精度上展现优势,但处理大规模或高分辨率图像时,其高时间成本成为不可忽视的局限。

为了克服现有影像匹配方法的不足之处,提出将融合快速显示扩散函数算法和二进制特征描述子 FREAK 算法的改进 KAZE 算法,应用到露天煤矿无人机影像匹配过程中,形成一种新型影像匹配方法。通过提取图像特征点、生成特征描述子、特征匹配等环节,得出高质量的影像处理结果。

## 1 设计无人机影像匹配方法

### 1.1 建立无人机影像去雾处理方案

在露天煤矿无人机影像预处理阶段,引入 Retinex 去雾算法,运用色彩恒常性理论分析原始采集影像[7],将其描述为光照分量和反射分量两个部分,如公式(1)所示。

$$S(x,y)=C(x,y)\times D(x,y) \tag{1}$$

式中,$(x,y)$ 表示无人机影像中心点坐标,$S$ 表示影像像素值,$C$、$D$ 分别表示光照分量和反射分量。

为了降低无人机影像去雾处理的运算复杂度,将人眼感知光照描述为非线性数据,并在对数域内对公式(1)进行处理,Retinex 算法去雾操作流程表示为图 1。

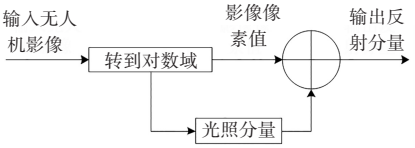



**图 1 Retinex 去雾算法基本原理**

Fig. 1 Basic principle of Retinex dehazing algorithm

在对数域内,无人机影像分量分解结果可以表示为

$$\log S(x,y)=\log(C(x,y)\times D(x,y))=\log C(x,y)+\log D(x,y) \tag{2}$$

式中,log 表示对数函数。

利用 Retinex 算法去除影像中的光照分量,即可消除外界环境对无人机影像造成的干扰,达到影像去雾处理的目的。

### 1.2 改进 KAZE 图像特征点检测

面向去雾处理后的无人机影像,应用融合非线性扩散滤波思想和快速显示扩散(fast explicit diffusion,FED)算法的改进 KAZE 算法,检测出影像在非线性尺度空间上包含的特征点[8],作为后续影像匹配分析的基础。

依托于非线性扩散滤波算法,构建非线性尺度空间时,根据特征分析要求,可以定义如公式(3)所示的非线性偏微分方程。

$$\frac{\partial Q}{\partial t}=d(a(x,y,t),\nabla Q) \tag{3}$$

$$\begin{cases} a(x,y,t)=g(|\nabla Q_\delta(x,y,t|) \\ g=\dfrac{1}{1+|\nabla Q_\delta|^2/\chi^2} \end{cases} \tag{4}$$

式中,$\partial$ 表示偏导数,$Q$ 表示无人机影像亮度,$t$ 表示尺度参数,$d$ 表示散度,$\nabla$ 表示下降梯度,$a$ 表示传导扩散函数,$g$ 表示非线性参数,$\delta$ 表示亮度图像标准差,$\chi$ 表示对比度因子。

随后,运用具有显示、半隐式优点的快速显示扩散算法求解公式(3),将非线性偏微分方程转换为显示模式。

$$\frac{Q^{o+1}-Q^o}{\varepsilon}=\boldsymbol{G}(Q^o)Q^o \tag{5}$$

式中,$\varepsilon$ 表示迭代步长,$o$ 表示图像金字塔层数,$\boldsymbol{G}$ 表示传导矩阵。

通过数次迭代计算求解,最终得出无人机影像亮度值为

$$Q^{o+1,j+1}=(\boldsymbol{I}+\varepsilon_j G(Q^o))Q^{o+1,j} \tag{6}$$

式中,$j$ 表示迭代次数,$\boldsymbol{I}$ 表示单位矩阵。

通过调整对比度因子,即可求出不同高斯尺度空间下无人机影像亮度变化,以便从非线性尺度空间内凸显影像隐性特征[9]。

应用非极大值抑制方法,针对非线性尺度空间中各个影像像素点,建立对应的 Hessian 矩阵,得到

$$\boldsymbol{H}(Q)=\varphi^2(L'L''-\hat{L}^2) \tag{7}$$

式中,$\boldsymbol{H}$ 表示 Hessian 矩阵,$\varphi$ 表示影像金字塔层尺度参数,$L'$、$L''$ 分别表示水平二阶偏导和垂直二阶偏导,$\hat{L}$ 表示交叉偏导数。

深入观察的 Hessian 矩阵行列式取值,从中找到局部极大值[10],将其标注为无人机影像特征点。运用空间尺度的泰勒展开式,计算出特征点坐标为

$$Q(\eta)=Q+\left(\frac{\partial Q}{\partial \eta}\right)^{\mathrm{T}}\eta+\frac{1}{2}\eta^{\mathrm{T}}\frac{\partial^2 Q}{\partial \eta^2}\eta \tag{8}$$

式中,$\eta$ 表示特征点坐标,T 表示转置。

### 1.3 获取二进制特征描述子

从特征点入手展开影像匹配分析之前,在改进 KAZE 算法中引入了二进制特征描述子-FREAK 算子[11],凭借其模拟人类视网膜结构的独特采样模式,准确对每个特征点进行描述。具体实施中,需要先对 KAZE 算法提取的特征点进行精细化处理,随后利用 FREAK 算子的多层同心圆采样模式,围绕每个特征点进行密集而有序的像素采样,如图 2 所示。通过比较采样点间的灰度差异,并以二进制形式记录这些差异,快速构建出每个特征点的独特描述子。

按照图 2 所示的形式,获取特征点附近所有采样点包含的图像信息,考虑采样点强度完成采样点信息的级联处理,构造得出二进制序列,如公式(9)所示。

$$F=\sum_{v=1}^{n}2^v\tilde{\omega}(P_v) \tag{9}$$

式中,$F$ 表示采样点信息级联组成的二进制序列,$n$ 表示特征向量总维数,$v$ 表示特征点编号,$\tilde{\omega}$ 表示采样信息,$P$ 表示感受域对。

其中,

$$\tilde{\omega}(P_v)=\begin{cases}1, \kappa(P_v^{1})-\kappa(P_v^{2})\geqslant 0\\ 0, \text{其他}\end{cases} \tag{10}$$

式中，$\kappa$ 表示高斯平滑处理后获取的采样点强度值。

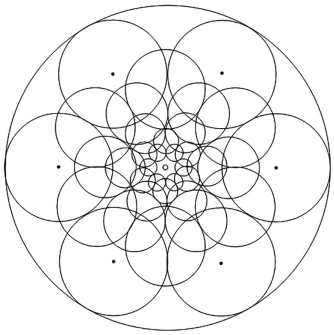


**图 2 FREAK 算法采样模式**

Fig. 2 FREAK algorithm sampling pattern

考虑到采样点组合的形式众多，在构造特征描述子时，需要通过公式(11)计算出主方向。

$$K=\frac{1}{m}\sum_{r=1}^{R}(\kappa(P_r^{1})-\kappa(P_r^{2}))\frac{P_r^{1}-P_r^{2}}{\|P_r^{1}-P_r^{2}\|} \tag{11}$$

式中，$K$ 表示主方向，$m$ 表示采样点对数量，$R$ 表示特征点对数量，$r$ 表示特征点编号。

根据主方向依次叠加 512 位特征点数据，生成具有旋转不变性的特征描述子[12-13]。

### 1.4 生成露天煤矿影像匹配结果

在露天煤矿无人机影像匹配中，将 Grid -KNN 算法引入到最后的匹配分析结果，并结合网格框架，将复杂的特征匹配过程简化为局部区域内的搜索问题，将参考图像与待配准图像均匀划分为多个网格，每个网格内包含一定数量的特征点。

从参考图像的网格中选定一特征点作为起点，运用 KNN(K 最近邻)算法在待配准图像的全局特征点集中检索。算法比较目标特征点与检索到的最近邻及次近邻特征点间的距离，并将此距离比与预设阈值进行对比。若该比值低于阈值，则确认形成有效匹配对，终止当前网格内搜索。否则，迭代选取网格内下一特征点，重复上述过程直至首次识别出符合条件的匹配对，以确保特征匹配的精确性与效率。局部区域匹配模式如图 3 所示。

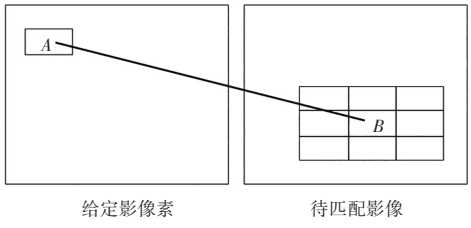



**图 3 匹配区域示意图**

Fig. 3 Schematic diagram of matching area

找到首个正确匹配点对后，即可确定目标特征点在待配准图像中的位置，以其所在网格为中心，构建一个 3×3 的邻域区域[14-15]。接着，以网格为单位，继续对参考图像中当前网格内的剩余特征点进行匹配。完成当前网格内所有特征点匹配后，将参考图像的匹配范围扩展到下一个网格。重复上述操作步骤，在每个新网格中寻找首个正确匹配点对，并建立相应的邻域进行匹配扩展。这一过程将持续进行，直至参考图像的所有网格都被遍历完毕，从而实现全局范围内的特征匹配[16]。

## 2 实验

### 2.1 实验数据

在新疆维吾尔自治区内，本实验选定了准东煤矿，红沙泉煤矿，黑山煤矿 3 个重要的露天矿场作为深入研究的区域。这 3 个露天矿场所在区域不仅地质特征丰富，而且其独特的自然环境和复杂的开采活动为无人机影像的采集与分析提供了宝贵的素材。利用无人机设备，严格按照图 4 所示的航行路线，对该矿区进行了全面的航拍。无人机穿越矿区的上空，捕捉到了从晴朗蓝天到雾霾笼罩的多种天气条件下的影像资料。特别是在雾霾较重的日子里，无人机影像中矿区的轮廓变得模糊，开采现场的细节难以辨认。因此，本文先引出几个去雾处理技术示例，便于与后续处理效果进行对比。以下是具体的去雾示例。

1）准东煤矿。在一张原本被浓厚雾霾笼罩的影像中，准东煤矿的巨大开采面几乎难以辨识。但经过去雾处理后，影像的清晰度大幅提升，矿坑的边缘、运输车辆以及周边的生态环境都清晰地呈现出来，为后续的矿区监测和生态评估提供了有力支持。

2）红沙泉煤矿。在另一张影像中，红沙泉煤矿的作业区域因雾霾而显得朦胧不清。去雾处理后，不仅矿区的整体布局变得一目了然，连远处山体的轮廓也清晰可见，这极大地增强了影像的地理空间信息价值。

3）黑山煤矿矿场与周边环境。对于黑山煤矿矿场及其周边环境的影像，去雾处理同样展现出了其强大的效果。原本被雾霾遮蔽的植被、水系以及矿区与自然的交界线在去雾后变得清晰可见，这对于评估矿区的生态影响、制定环境保护措施具有重要意义。

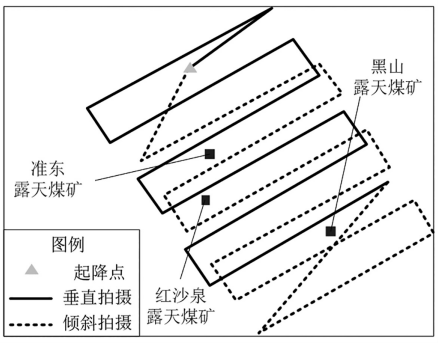



**图 4 矿区地理位置及无人机航行路线**

Fig. 4 Mining area geographic location and UAV flight route

如图 4 所示，无人机需要按照两条航线分别飞行，完成露天矿区影像的垂直拍摄和倾斜拍摄，这两次无人机影

像采集过程中,飞行参数设置情况如表 1 所示。

**表 1　无人机飞行参数**

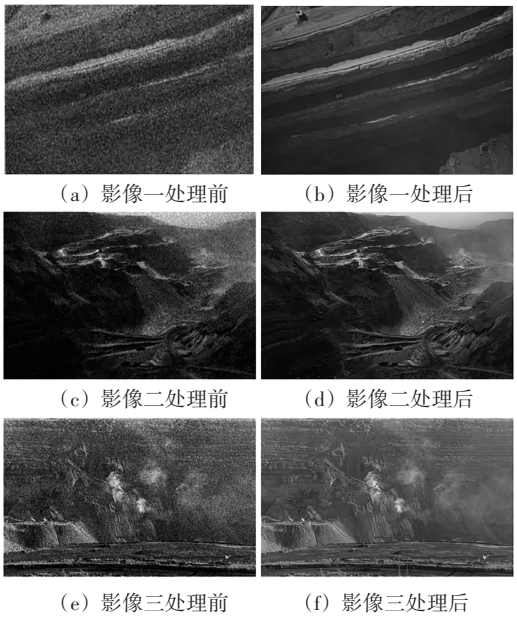
Tab. 1　UAV flight parameters

| 项目 | 参数值 | |
|---|---|---|
| | 航线 1 | 航线 2 |
| 拍摄方式 | 垂直拍摄 | 倾斜拍摄 |
| 航线长度/km | 9.4 | 5.1 |
| 飞行绝对高度/m | 720 | 700 |
| 航向重叠率/% | 90 | 90 |
| 旁向重叠率/% | 70 | 7 |
| 相片分辨率 | 6 000×4 000 | 6 000×4 000 |
| 最低点地面分辨率/(m/px) | 0.07 | 0.08 |
| 相机俯仰角/° | 90 | 35 |
| 照片数量 | 538 | 78 |

通过现场拍摄,得到共 616 张露天矿区无人机影像,组成实验数据集。作为新研究的匹配方法、基于改进 ORB 算法的匹配方法、基于分层描述符的匹配方法实施的基础。

## 2.2　特征点提取

运用基于改进 KAZE 算法的新方法,展开露天煤矿无人机影像匹配时,需要先对大量实验图像进行去雾处理,消除影像中可能干扰特征匹配的噪声信息。随机抽取其中 3 幅影像为例,其去雾处理前及去雾处理后效果如图 5 所示。



(a) 影像一处理前　(b) 影像一处理后

(c) 影像二处理前　(d) 影像二处理后

(e) 影像三处理前　(f) 影像三处理后

**图 5　露天矿区无人机影像去雾处理效果**

Fig. 5　Dehazing processing effect of open-pit mining area UAV images

从图 5 所示的对比结果可以看出,依靠 Retinex 算法去雾处理后,原始图像质量得到明显提高,细节信息更加清晰。

随后,以随机影像一为例,应用改进 KAZE 算法进一步处理无人机影像,得到图 6 所示的特征点检测结果。

如图 6 所示,在改进 KAZE 算法的辅助下,露天煤矿无人机影像中具有代表性的特征点被标注出来,为后续影像匹配提供了基础。

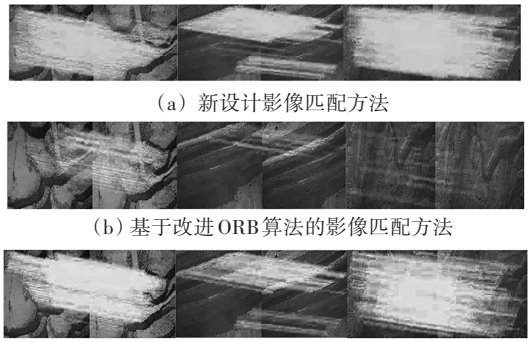


**图 6　特征点检测结果**

Fig. 6　Feature point detection results

## 2.3　影像匹配结果

针对实验数据集中的影像进行分析,选定排土场、边端帮、开采区 3 组影像,分别代表了一种露天煤矿现场典型地形。运用新研究方法和其余两种作为对照组的方法,完成无人机影像匹配处理,得到图 7 所示的匹配结果。



(a) 新设计影像匹配方法

(b) 基于改进ORB算法的影像匹配方法

(c) 基于分层描述符的影像匹配方法

**图 7　不同方法影像匹配结果**

Fig. 7　Image matching results of different methods

从图 7 所示的影像匹配结果可以看出,基于改进 ORB 算法的方法给出的匹配点较少,绝大部分影像区域没有实现匹配处理。而基于分层描述符的方法应用后,少部分道路边缘区域没有给出匹配点。相对来说,新方法给出的匹配结果明显更优,特征点分布均匀,即便在边缘区域也标注了大量匹配点。

## 2.4　匹配方法性能对比

针对 3 组匹配后的实验影像进行观察,从匹配点具体坐标信息入手,通过公式(12)计算出各方法影像匹配结果的均方根误差,得到图 8 所示的对比结果,以此来衡量不同方法的匹配精度。

$$E=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{u=1}^{N}\left((X_u-X_u^{'})^2+(Y_u-Y_u^{'})^2\right)} \tag{12}$$

式中,$E$ 表示均方根误差 RMSE,$N$ 表示匹配特征点数量,$u$ 表示特征点编号,$(X,Y)$ 表示匹配点在待匹配影像上坐标,$(X^{'},Y^{'})$ 表示匹配点在参考影像上坐标。

从图 8 可以看出,结合改进 KAZE 算法的新方法具有较为优越的露天煤矿无人机影像匹配能力,所得匹配结果的 RMSE 值式中小于 0.1。而另外两种方法面对 A 组影像,匹配结果的 RMSE 值达到了 0.38 和 0.5,面对 B 组和 C 组影像,匹配结果 RMSE 值为 0.4、0.49、0.39、0.53。将

新研究匹配方法应用到矿区无人机影像处理过程中,有利于提升影像质量,并依据影像信息完成露天煤矿监管。

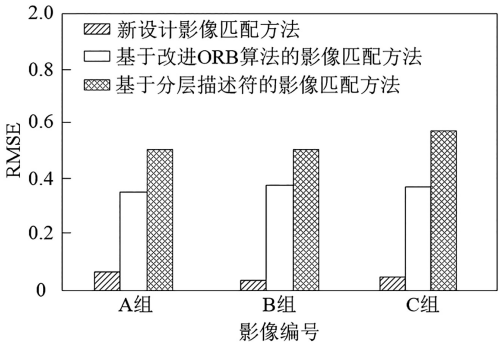



**图8 不同方法匹配结果RMSE对比**

Fig. 8 RMSE comparison of matching results of different methods

### 2.5 跨天气条件性能评估

本实验通过对比不同天气条件下影像的去雾效果,进一步验证了该方法在精准去雾处理上的卓越性能。

为了进一步验证新研究匹配方法在去雾处理上的精准程度,实验特别设计了对比环节,深入分析了在晴朗蓝天、阴天以及雾霾笼罩等不同天气条件下,新研究匹配方法去雾效果的差异与表现。这一对比实验全面评估新方法在不同天气条件下的适应性和有效性,从而为其在实际应用中的推广提供更为坚实的依据。已知综合评分在6.0~7.0被判定为及格,7.0~8.0被判定为良好,评分超过8.0均可称为优秀,具体实验评分(评分采用10分制)结果如表2所示。

**表2 气候影响评估表**

Tab. 2 Climate impact assessment table

| 评价指标 | 晴朗蓝天评分 | 阴天评分 | 雾霾笼罩评分 |
|---|---|---|---|
| 色彩还原度 | 9.0 | 8.5 | 9.3 |
| 细节保留度 | 9.5 | 8.8 | 9.0 |
| 雾气去除彻底性 | 9.8 | 8.2 | 9.5 |
| 图像处理速度/(帧·$s^{-1}$) | 0.05 | 0.06 | 0.07 |
| 视觉舒适度 | 9.2 | 8.0 | 8.8 |
| 总体效果(综合评分) | 9.5 | 8.5 | 9.1 |

由表2可知新研究匹配方法的总和评分均超过8.0,而且在晴朗蓝天的天气条件下在色彩还原度、细节保留度、视觉舒适度以及总体效果上均表现出色,其评分均处于较高水平,因此可以判定此方法去雾效果为优秀。这一卓越成就不仅验证了该方法在理想天气条件下的卓越去雾能力,也为其在复杂多变环境中的稳定性和可靠性提供了强有力的支撑。

## 3 结论

在完成基于改进KAZE算法的露天煤矿无人机影像匹配方法研究后,将其应用于复杂多变的露天煤矿环境中,准确提取影像特征点,基于此实现影像高质量匹配,为露天煤矿的监测与管理提供了基础。

## 参考文献

[1]范文华, 刘英健, 鲍海铭, 等. 基于智能感知技术的新能源电站无人机全自主巡检技术[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):61-65.
[2]刘宇, 韩智慧, 周伟, 等. 露天煤矿正射影像切片技术应用研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(增刊1):188-192.
[3]刘兴华. 变电站巡检机器人视觉导航路径快速提取方法[J]. 电子设计工程, 2024, 32(13):23-26.
[4]谢强, 赖祖龙, 孙杰, 等. 一种分层描述符的无人机影像匹配方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(9):162-170.
[5]王一, 齐皓, 王瀚铮, 等. 基于改进SIFT的无人机影像匹配方法[J]. 无线电工程, 2023, 53(10):2337-2344.
[6]Tang L, Deng Y, Ma Y, et al. SuperFusion:a versatile image registration and fusion network with semantic awareness[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2121-2137.
[7]刘洺睿, 车奔, 董洪波, 等. 露天煤矿采场无人机遥感图像小目标检测[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11):132-140.
[8]温育杜, 郭士增, 刘晟, 等. 基于尺度配准的航拍图像与卫星影像匹配方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(10):19-26.
[9]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, 103.
[10]任超锋, 蒲禹池, 张福强. 顾及地理空间信息的无人机影像匹配像对提取方法[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1):85-92.
[11]支妍力, 周宇, 程艳辉, 等. 基于无人机倾斜摄影的输电线路环水保地物多光谱影像分类研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7): 89-93, 163.
[12]盘贻峰, 李洋, 黄丽霞, 等. 一种多视角无人机影像匹配对优选方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(3):171-180.
[13]李冰, 赖祖龙, 孙杰, 等. 利用改进ORB算法的无人机影像匹配[J]. 测绘通报, 2024(1):126-130.
[14]高冬霞. 煤矿综采设备地面检修工作面. 综合自动化控制技术[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4):29-34.
[15]史运喜, 杨星晨, 雷少刚, 等. 一种免人工标靶的矿区地表水平位移提取方法[J]. 测绘科学, 2023, 48(7):123-133.
[16]Gong N, Li L, Sha J, et al. A satellite-drone image cross-view geolocalization method based on multi- scale information and dual-channel attention mechanism[J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 941.

(上接第117页)

[15]吴广义, 袁卓群, 梁艳梅. 基于深度学习的视网膜OCT图像无监督去噪方法[J]. 光学学报, 2023, 43(20):123-133.
[16]Krull A , Toma V , et al. Probabilistic Noise2Void: unsupervised content-aware denoising[J]. Frontiers in Computer Science,2020,2:5.
[17]刘凯歌, 张恒康, 付星, 等. 从随机散斑到"浑浊透镜"——基于波前整形的散射光聚焦技术(特邀)[J]. 光学学报, 2024, 44(10): 222-240.
[18]黄晓鸣, 何富运, 唐晓虎, 等. U-Net及其变体在医学图像分割中的应用研究综述[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(5):567-576.
[19]宋晓晓, 谢明璐. 基于图像识别的跌倒检测研究进展[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3):1-8.
[20]伍秀玭, 李珏炜, 高万荣. 眼底OCT图像的公共数据获取及其分析算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(10):29-41.