

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0062-05

一种基于多目视觉的输电线路定位算法

朱玟旭¹, 吴 键¹, 马 壮², 鲍启伟²

(1. 南京理工大学, 南京 210094; 2. 无锡江南电缆有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘 要:针对输电线路经常穿越山区、河流等复杂环境,再加之外界因素的多重影响,例如大风、雨雪、树木、鸟类等,致使输电线路定位难度较大问题,提出一种基于多目视觉的输电线路定位算法研究。采用无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)搭载高性能摄像机来捕获输电线路多目视觉图像——左视觉图像、上视觉图像与右视觉图像,采用尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)算法提取多目视觉图像特征点,通过欧氏距离匹配特征点,确定多目视觉图像之间的基础矩阵与本质矩阵,并计算单应性矩阵,以此为基础,校正多目视觉图像。基于三角测量原理计算输电线路三维坐标,从而完成输电线路的三维重建,实现了输电线路的精准定位。实验结果显示,设计算法应用后多目视觉图像失真消除程度最大值达到了89%,设计算法输电线路定位准确率最大值达到了99.6%,充分证实了设计算法应用性能较佳。

关键词:无人机;多目视觉;定位算法;输电线路;定位精度测试;神经网络算法

中图分类号: TP391.4; V279⁺2; TP391.9; TM755

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)10-0062-05

A transmission line location algorithm based on multi-vision

Zhu Wenxu¹, Wu Jian¹, Ma Zhuang², Bao Qiwei²

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Wuxi Jiangnan Cable Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: Transmission lines often cross mountainous areas, rivers and other complex environments, and the multiple influences of external factors, such as strong winds, rain and snow, trees and birds, make it difficult to locate transmission lines. Therefore, a research on transmission line location algorithm based on multi-vision is proposed. Unmanned aerial vehicle (UAV) is equipped with high-performance camera to capture multi-vision images of transmission lines-left vision image, upper vision image and right vision image. Scale invariant feature transform (SIFT) algorithm is used to extract feature points of multi-vision images, and Euclidean distance is used to match feature points to determine the basic matrix and essential matrix between multi-vision images, and homography matrix is calculated, based on which multi-vision images are corrected. Based on the principle of triangulation, the three-dimensional coordinates of transmission lines are calculated, so as to complete the three-dimensional reconstruction of transmission lines and realize the accurate positioning of transmission lines. The experimental results show that the maximum degree of distortion elimination of multi-vision image reaches 89% after the application of the design algorithm, and the maximum accuracy of transmission line positioning of the design algorithm reaches 99.6%, which fully proves that the application performance of the design algorithm is better.

Keywords: UAV; multi-eye vision; location algorithm; transmission line; positioning accuracy test; neural network algorithm

输电线路作为电力系统的关键组成部分,承担着将电能从发电站输送至各个用电区域的重任。它们如同电力系统的“血管”,源源不断地将电力输送到千家万户,满足工业、商业和居民生活的用电需求^[1]。尽管输电线路在电力系统中扮演着至关重要的角色,但其定位却面临着诸多困难,其一是复杂地形与气候影响。输电线路往往穿越山川河流、横跨城市乡村,地形复杂多变。同时,气候因素(例如雷电、风雨、覆冰等)也会对输电线路的定位造成干扰;其二是电磁干扰。输电线路在传输电能时会产生电磁场,会对定位设备产生干扰,影响定位精度;其三是隐蔽性

与难以接近。部分输电线路位于偏远地区或高空,难以直接接近,增加了定位的难度;其四是设备与技术限制^[2]。传统定位算法在某些特定环境下可能无法准确工作,例如城市峡谷效应、电磁屏蔽等,限制了其应用范围。由此可见,如何设计一种高效的输电线路定位算法是当前电力领域亟待解决的问题之一。

针对输电线路定位算法进行深入研究,不但可以提高输电线路运维效率,保障电力安全,还可以优化电力资源配置,促进智能电网发展。文献[3]利用IMU、GNSS和VO等多传感器信息,解决了无人机巡检中的定位不准和

收稿日期:2025-06-20;录用日期:2025-08-28

作者简介:朱玟旭(2000—),男,硕士研究生,研究方向为无人机与多目视觉。

通信作者:吴 键(1979—),男,博士,教授,研究方向为无线传感器网络及应用、智能感知与测控技术和嵌入式网络与人工智能。

引用本文:朱玟旭,吴键,马壮,等.一种基于多目视觉的输电线路定位算法[J].自动化技术与应用,2026,45(10):62-66.(Zhu Wenxu, Wu Jian, Ma Zhuang, et al. A transmission line location algorithm based on multi-vision[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10): 62-66.)

目标识别跟踪困难问题。通过联邦卡尔曼滤波算法,增强了自主定位的鲁棒性,确保了无人机在 GNSS 信号中断或视觉传感器特征点不足时的导航准确性。同时,采用变化场景最佳阈值选择算法,提高了输电线跟踪的精度。但是,设计方法在实际应用中仍面临着传感器校准、数据同步、复杂环境下的算法适应性等挑战,无法保障输电线跟踪精度;文献[4]提出了一种结合 CNN 与 FFT-ELM 的输电线路故障识别及定位方法。以故障电压时序图为输入,构建 CNN 模型;同时,利用 FFT 提取故障特征样本,构建 ELM 网络。通过特征融合层将两者融合,输出故障类型和定位结果。设计方法依赖于大量的训练数据和高质量的故障电压时序图。在实际应用中,可能受到数据获取难度、数据预处理质量、模型泛化能力等因素的限制;文献[5]利用视觉传感器获取目标图像,标定目标位姿,并采用直线段检测方法提取特征。通过改进粒子群算法的支持向量机回归模型,输出定位结果,并利用回归误差补偿模型进行补偿。设计方法容易受到光照条件、目标遮挡、传感器噪声等因素的影响,从而降低了目标定位的准确性;文献[6]提出了一种基于改进欧氏聚类分割的三维点云树障定位方法。利用无人机采集图片进行三维模型重建,通过预处理、聚类分割和拟合空间方程等步骤,计算非输电线点云与输电线点云的距离,定位树障位置。设计方法受限于无人机采集图像质量、三维模型重建精度、聚类分割参数选择等因素,致使其应用范围较窄;文献[7]利用输电线路预先安装的电压测量装置获取学习数据,通过机器学习算法训练模型,实现雷击位置的估算。对于大规模电网或复杂地形环境,设计方法需要更精细的模型训练和参数优化,从而大幅增加了设计方法的运算量,造成输电线路雷击定位效率下降。为了解决上述缺陷或者问题,提出基于多目视觉的输电线路定位算法研究,希望通过多目视觉技术的应用,提高输电线路定位的精度和效率,保障电力系统的正常运行和电力供应的连续性。

1 输电线路定位算法设计

1.1 多目视觉图像获取

为了提高输电线路定位的精度和效率,采用无人机搭载高性能摄像机来捕获输电线路多目视觉图像,具体流程如图 1 所示。依据图 1 所示流程获得输电线路多目视觉图像,设计输电线路定位算法流程,如图 2 所示。其表达式为

$$Q = \{L(x, y), A(x, y), R(x, y)\} \quad (1)$$

式中, Q 代表输电线路多目视觉图像集合, $L(x, y)$ 代表输电线路左视觉图像, $A(x, y)$ 代表输电线路上视觉图像, $R(x, y)$ 代表输电线路右视觉图像。

1.2 多目视觉图像校正

以 1.1 节获取的输电线路多目视觉图像—— $L(x, y)$ 、 $A(x, y)$ 与 $R(x, y)$ 为基础,采用 SIFT 算法对多目视觉图像特征点进行检测与提取,通过欧氏距离进行特征点匹

配,以此为基础,确定多目视觉图像之间的基础矩阵与本质矩阵,从而计算多目视觉图像之间的单应性矩阵,完成多目视觉图像的校正,为后续输电线路三维重建奠定坚实的基础,也为输电线路定位提供一定的便利。

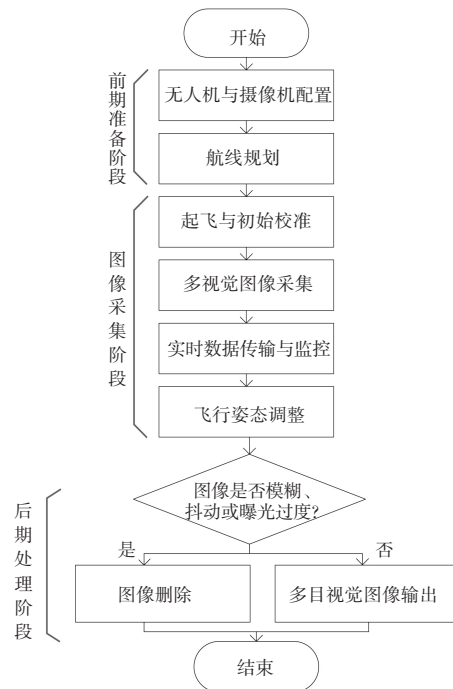


图 1 多目视觉图像获取流程

Fig. 1 Multi-view vision image acquisition process

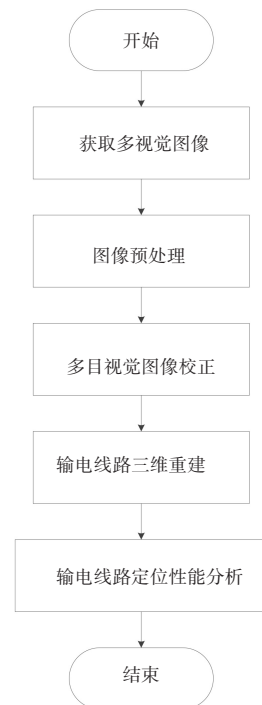


图 2 输电线路定位算法设计流程

Fig. 2 Design process of transmission line positioning algorithm

以输电线路左视觉图像 $L(x, y)$ 为例,本文阐述一种基于 SIFT 算法的图像特征点提取步骤,具体如下。

步骤 1 尺度空间极值检测。

对输入图像进行高斯模糊处理,并通过改变高斯核的标准差来构建不同尺度的图像金字塔^[8]。输电线路左视觉图像 $L(x,y)$ 对应的尺度空间图像表达式为

$$L'(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) \cdot L(x,y) \quad (2)$$

式中, $L'(x,y,\sigma)$ 代表输电线路左视觉尺度空间图像, $G(x,y,\sigma)$ 代表高斯函数, σ 代表标准差。

在每个尺度层上,通过比较当前像素与其周围像素(包括不同尺度层上的像素)的灰度值,检测尺度空间中的极值点,将其看作为候选特征点 $\{(x_{Li}, y_{Li}), i = 1, 2, \dots, m\}$, $L(x,y)$ 表示左视觉图像, m 代表候选特征点总数量^[9]。

步骤2 关键特征点确定。

由于候选特征点 (x_i, y_i) 数量较多,并存在着显著的冗余问题,若是不对其进行精简处理,势必会影响输电线路定位的精度与效率^[10]。应用余弦相似度计算任意两个候选特征点之间的相似度,将第2个候选特征点记为 $\{(x_j, y_j), i \neq j\}$,以左视觉图像为例,表达式为

$$\cos \theta = \frac{(x_{Li}, y_{Li}) \cdot (x_{Lj}, y_{Lj})}{\|(x_{Li}, y_{Li})\| \cdot \|(x_{Lj}, y_{Lj})\|} \quad (3)$$

式中, $\cos \theta$ 代表候选特征点 (x_{Li}, y_{Li}) 与 (x_{Lj}, y_{Lj}) 之间的相似度, $(x_{Li}, y_{Li}) \cdot (x_{Lj}, y_{Lj})$ 代表点积, $\|(x_{Li}, y_{Li})\|$ 与 $\|(x_{Lj}, y_{Lj})\|$ 代表模。

当 $\cos \theta$ 数值趋近于1时,认定候选特征点 (x_{Li}, y_{Li}) 与 (x_{Lj}, y_{Lj}) 相似,对其中一个候选特征点进行删除处理;当 $\cos \theta$ 数值趋近于-1时,认定候选特征点 (x_{Li}, y_{Li}) 与 (x_{Lj}, y_{Lj}) 不相似,保留两个候选特征点^[11]。依据上述规则,完成输电线路左视觉图像特征点的提取,记为 $\{(x_{Li}, y_{Li}), i = 1, 2, \dots, n\}$, n 代表特征点的总数量,并且 $n \leq m$ 。

按照上述程序对输电线路多目视觉图像的特征点进行提取,记为 $\{(x_{Li}, y_{Li}), (x_{Ai}, y_{Ai}), (x_{Ri}, y_{Ri})\}$,通过欧氏距离匹配两个视觉图像的特征点^[12],以左视觉图像与上视觉图像为例,表达式为

$$d_{L,A} = \sqrt{(x_{Li} - x_{Ai})^2 + (y_{Li} - y_{Ai})^2} \quad (4)$$

式中, $d_{L,A}$ 代表左视觉图像特征点 (x_{Li}, y_{Li}) 与上视觉图像特征点 (x_{Ai}, y_{Ai}) 之间的欧氏距离。

若是 $d_{L,A}$ 小于或者等于阈值 $\hat{d}$ (需要根据图像实际情况进行具体的设置),认定 (x_{Li}, y_{Li}) 与 (x_{Ai}, y_{Ai}) 匹配;若是 $d_{L,A}$ 大于阈值 $\hat{d}$,认定 (x_{Li}, y_{Li}) 与 (x_{Ai}, y_{Ai}) 不匹配。依据上述规则,完成多目视觉图像特征点的匹配。以匹配的特征点对为基础,确定左视觉图像与上视觉图像之间的基础矩阵,表达式为

$$(x_{Ai}, y_{Ai})^T F (x_{Li}, y_{Li}) = 0 \quad (5)$$

式中, T 表示转置。将匹配特征点代入式(5)中,构成方程组形式,对其进行求解,即可获得左视觉图像与上视觉图像之间的基础矩阵 F ,联合摄像机坐标系信息,确定左视觉图像与上视觉图像之间的本质矩阵^[13],表达式为

$$E = K^T F K \quad (6)$$

式中, E 代表左视觉图像与上视觉图像之间的本质矩阵, K 代表摄像机内参数矩阵。

以确定的基础矩阵与本质矩阵为依据,计算左视觉图像与上视觉图像之间的单应性矩阵,表达式为

$$\zeta = \frac{F \cdot E}{\zeta_0} \quad (7)$$

式中, ζ 代表单应性矩阵, ζ_0 代表矩阵元素标准化参量。

应用单应性矩阵 ζ 即可完成左视觉图像的校正,其表达式为

$$\hat{L}(x,y) = L(x,y) \cdot \zeta \pm \varepsilon_L \quad (8)$$

式中, $\hat{L}(x,y)$ 代表校正后左视觉图像; ε_L 代表误差项。

按照上述原理对上视觉图像、右视觉图像进行校正,获得校正后多目视觉图像为 $\{\hat{L}(x,y), \hat{A}(x,y), \hat{R}(x,y)\}$,为后续研究提供更精准的图像信息支撑。

1.3 输电线路三维重建

以校正后的输电线路多目视觉图像为基础,通过三角测量原理计算输电线路三维坐标,从而完成输电线路的三维重建,实现了输电线路的精准定位。

加载1.2节左视觉图像与右视觉图像匹配特征点,基于三角测量原理计算三维坐标^[14-15],表达式为

$$z \cdot (x,y) = K_L^{-1} \cdot (x_{Li}, y_{Li}) \times [R \cdot K_R^{-1} \cdot (x_{Ri}, y_{Ri}) + T] \quad (9)$$

式中, z 代表深度值, (x,y) 代表三维点的齐次坐标, K_L 与 K_R 代表左视觉图像与右视觉图像相机的内参数矩阵, R 与 T 代表旋转矩阵和平移向量。

将计算得到的三维坐标进行整合 (x,y,z) ,以此为基础,通过三维软件重建输电线路,如图3所示。

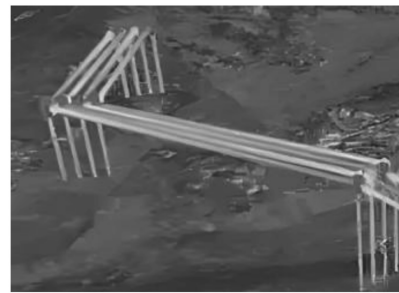


图3 输电线路三维重建示例图

Fig. 3 3D Reconstruction example diagram of power transmission lines

综上所述,在多目视觉技术的应用下,实现了输电线路的精准定位,为输电线路应用与管理提供更加有力的帮助^[16-17]。

2 实验与结果分析

选取基于 IMU-GNSS-VO 的输电线路定位算法作为对比算法1,基于 CNN 与 FFTELM 的输电线路定位算法作为对比算法2,基于机器学习的输电线路定位算法作为对比算法3,联合设计算法共同进行对比实验,通过实验数据处理与计算,分析设计算法的应用性能。

2.1 实验设备选取与配置

设计算法引入了多目视觉技术,其需要无人机搭载摄像机实现。因此,在实验进行之前,对实验设备——无人机与摄像机进行选取与配置。

1) 无人机型号与参数配置情况如下。

型号:mini SE。

图传:Wi-Fi。

续航:30 min。

最大起飞海拔:3 000 m。

最大速度:46.8 km/h。

抗风:四级风。

续航里程:10 km。

最大码率:40 MB/s。

2) 摄像机型号与参数配置情况如下所示。

型号:HC-V9-R9300。

分辨率:1 000 TVL。

最低照度:0.02 lx。

信噪比值:>50 dB。

电子快门:1/50 s。

白平衡模式:自动调节。

镜头:标配4 mm,F1.2。

防护等级:IP66。

有效距离:0~50 m。

工作温度:-10~50 ℃。

2.2 实验数据处理

依据2.1选择的实验设备获取输电线路多目视觉图像,将其简记为 $I(x,y)$ 。由于环境因素、无人机振动因素的影响,致使原始图像中存在着大量的噪声。因此,在实验进行之前,对原始输电线路多目视觉图像 $I(x,y)$ 进行去噪处理,为后续实验顺利进行提供一定的便利。

对图像 $I(x,y)$ 应用均值滤波,以减少图像中的大部分均匀噪声。均值滤波器的核 H_{mean} 可以是一个简单的 3×3 或 5×5 的平均矩阵,去噪公式为

$$\hat{I}(x,y)=I(x,y)*H_{mean} \tag{10}$$

式中, $\hat{I}(x,y)$ 代表均匀噪声去除后的输电线路多目视觉图像,*代表卷积操作。

需要注意的是,此环节只对大部分均匀噪声进行消除,对于输电线路多目视觉图像只是进行了初步处理,后续还需要利用设计算法、对比算法1、对比算法2与对比算法3进行校正处理,才能够获取精准的输电线路定位结果。

2.3 图像校正效果分析

应用设计算法、对比算法1、对比算法2与对比算法3对多目视觉图像进行校正处理,通过失真消除程度(评估指标)来显示图像校正效果。失真消除程度是指多目视觉图像几何失真(例如旋转失真、透视失真、缩放失真)和光度失真(例如对比度失真、亮度失真、颜色失真)的去除比例,能够直观地显示应用算法的图像校正性能。

通过实验获得多目视觉图像失真消除程度,如图4所示。

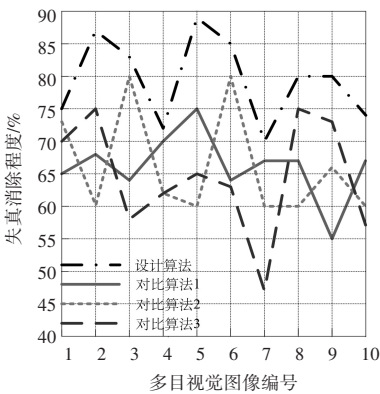


图4 多目视觉图像失真消除程度示意

Fig. 4 Schematic of the degree of image distortion removal in multi-view vision

在不同实验对象背景下,设计算法应用后多目视觉图像失真消除程度普遍大于对比算法1、对比算法2与对比算法3,其最大值达到了89%,说明设计算法图像校正效果更好。

2.4 输电线路定位性能分析

应用设计算法、对比算法1、对比算法2与对比算法3对指定输电线路进行定位,定位结果如表1所示。

表1 输电线路定位结果

Tab. 1 Transmission line location results

输电线路	应用算法	首端定位	末端定位
首端(118,32,450) 末端(120,40,500)	设计算法	(118,32,450)	(120,40,500)
	对比算法1	(118,30,450)	(120,40,500)
	对比算法2	(118,32,450)	(118,40,500)
	对比算法3	(118,32,440)	(120,40,500)
首端(89,18,600) 末端(101,20,515)	设计算法	(89,18,600)	(101,20,515)
	对比算法1	(89,23,600)	(101,20,515)
	对比算法2	(89,18,600)	(101,20,520)
	对比算法3	(89,18,600)	(101,28,515)
首端(135,55,485) 末端(124,63,590)	设计算法	(135,55,485)	(124,63,590)
	对比算法1	(120,55,485)	(124,63,590)
	对比算法2	(135,55,485)	(131,63,590)
	对比算法3	(135,55,550)	(124,63,590)
首端(144,46,680) 末端(131,40,525)	设计算法	(144,46,680)	(131,40,525)
	对比算法1	(144,46,650)	(131,40,525)
	对比算法2	(144,46,680)	(125,40,525)
	对比算法3	(122,46,680)	(131,40,525)

在不同指定输电线路背景下,应用设计算法获得的输电线路定位结果(首端与末端三维坐标)与实际数值一致,而应用对比算法1、对比算法2与对比算法3获得的输电线路定位结果(首端与末端三维坐标)与实际数值均存在一定的偏差。

由于上述实验对象数量较少,无法客观显示设计算法

的输电线路定位精度,故在不同实验对象数量背景下进行输电线路定位实验,计算输电线路定位准确率,如表 2 所示。

表 2 输电线路定位准确率
Tab. 2 Transmission line positioning accuracy

实验对象数量	应用算法	准确定位数量	准确率/%
100	设计算法	98	98
	对比算法 1	89	89
	对比算法 2	87	87
	对比算法 3	79	79
200	设计算法	195	97.5
	对比算法 1	176	88
	对比算法 2	154	77
	对比算法 3	168	84
300	设计算法	298	99.33
	对比算法 1	246	82
	对比算法 2	255	85
	对比算法 3	278	92.67
400	设计算法	397	99.25
	对比算法 1	366	91.5
	对比算法 2	345	86.25
	对比算法 3	351	87.75
500	设计算法	498	99.6
	对比算法 1	459	91.8
	对比算法 2	468	93.6
	对比算法 3	477	95.4

在不同实验对象数量背景下,设计算法输电线路定位准确率均大于对比算法 1、对比算法 2 与对比算法 3,其最大值达到了 99.6%,充分证实了设计算法输电线路定位精度更高。

3 结论

输电线路作为电力传输的主要通道,其稳定性和安全性直接关系到电力系统的可靠运行。在电力系统中,发电站产生的电能需要通过输电线路输送到各个用电区域,满足工业、商业和居民生活的用电需求。如果输电线路出现

故障,将直接影响电力的正常供应,可能导致大面积停电,给社会生产和居民生活带来严重影响。因此,对输电线路进行准确定位,可以及时发现并处理故障,确保电力系统的稳定运行。为了满足电力系统的运行需求,提出基于多目视觉的输电线路定位算法研究,设计算法有效提高了图像校正性能与输电线路定位精度,为输电线路安全运行提供更有效的方法支撑。

参考文献

[1] 刘传洋,吴一全,刘景景. 基于视觉的输电线路金具锈蚀缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报,2024,45(3):286-305.

[2] 李利荣,陈鹏,张云良,等. 基于改进 CenterNet 的输电线路电力器件及异常目标检测[J]. 高电压技术,2023,49(11):4757-4765.

[3] 朱长荣,吕文超,单超,等. 基于 IMU-GNSS-VO 的输电线无人机巡检定位和目标跟踪自适应方法[J]. 电力建设,2023,44(8):61-70.

[4] 裴东锋,刘勇,闫柯柯,等. 一种基于 CNN 与 FFTELM 的输电线路故障识别与定位方法[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(1):164-170.

[5] 沈微微,姜晓燕,张兵,等. 机器人抓取视觉传感目标精确定位方法[J]. 传感技术学报,2023,36(5):763-768.

[6] 施保华,朱正基,刘伟. 基于输电线路树障定位的改进欧氏聚类分割算法研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2023,48(5):1124-1133.

[7] 厉仄平,伍冲卿,熊来红,等. 基于机器学习和雷电感应电压的输电线路雷击定位方法[J]. 高压电器,2022,58(12):109-116.

[8] 董涛,杨宝华. 基于多数据集深度学习的视觉传感图像目标增强识别[J]. 传感技术学报,2024,37(1):64-70.

[9] 陈广华,葛梦莹,黄白瑶,等. 基于双目视觉的电力塔倾斜检测方法[J]. 北京交通大学学报,2022,46(2):128-137.

[10] 郭迎,赵祥模,梁睿琳,等. 双目视觉下的自动驾驶车辆多类型障碍物感知[J]. 哈尔滨工程大学学报,2023,44(8):1406-1411.

[11] 严波,孙飞,马俊杰,等. 基于数字孪生的输电线路智能运检系统设计[J]. 自动化技术与应用,2024,43(5):177-181.

[12] 马振兴,李真娣,杜帅,等. 基于北斗定位技术的输电线路智能巡检系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(6):120-123,165.

[13] 耿劭锋,戚银城,史博强,等. 基于 FCIS 模型的输电线路部件同时检测与分割方法[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(2):124-132.

[14] 姚磊,迟兴江,张雷,等. 基于小型移动机器人的高压架空输电线路融冰技术[J]. 电测与仪表,2024,61(12):34-41.

[15] 金波,陈铀,赵青尧,等. 基于改进卷积神经网络的输电线路异常检测研究[J]. 高电压技术,2023,49(增刊1):68-71.

[16] 孙文成,李健,彭宇辉,等. 基于样本不均衡和特征优选多源融合的输电线路故障类型辨识[J]. 电测与仪表,2024,61(12):79-89.

[17] 张烨,李博涛,尚景浩,等. 基于多尺度卷积注意力机制的输电线路防振锤缺陷检测[J]. 电工技术学报,2024,39(11):3522-3537.