[架空线路]

基于无人机倾斜摄影的架空电力输电线路巡检方法

文/王好阳
国网黑龙江省送变电工程有限公司

以架空电力输电线路为主要研究对象，从线路巡检工作的角度入手，在明确架空电力输电线路巡检中无人机的应用价值基础上，进一步围绕无人机倾斜摄影技术，探讨能够提升架空电力输电线路巡检效果的有效方法，旨在为推动架空电力输电线路巡检工作的开展提供借鉴的思路和经验。

架空电力输电线路是现阶段输电线路的主要类型，以往针对输电线路的巡检工作，主要由人工作业完成。在面对一些复杂地形地势环境下的架空输电线路时，会增加电力巡检的实际难度，一定程度上影响巡检人员的安全。新时期，将无人机等先进的摄影测量设备与电力巡检工作结合起来，代替人工巡检的方式，减轻作业难度，同时也有利于提升巡检工作的质量和效率。

架空电力输电线路巡检中无人机的应用

1. 影像获取

无人机在架空电路输电线路巡检中的应用，以获取电力导线与通道的原始图形数据为主要目的。保证原始影像图像数据的准确性要求，应加强对于无人机影像获取总体流程的规范。在无人机影像获取过程中，首先需要设定好无人机的航向和旁向重叠度。以确保影像数据的高空间分辨率为前提，尽可能避免较大投影差对影像质量的影响，要求以70%～80%为航向和旁向重叠度的标准，确保影像数据的空间分辨率在2～5 cm之间[1]。在无人机变高飞行航高的设计方面，要求在明确架空线路基础信息的前提下，让两个相邻铁塔顶高和无人机距离铁塔顶高度相加，获得的高度值构成一条飞行斜线，作为无人机变高飞行的主要依据。

以此为基础来设计选择无人机航线敷设的方法，应能够参考架空线路的整体走向，对无人机的飞行航线进行具体的规划。在无人机巡检拍摄作业中，应能够依据相邻两个电力杆塔的中心线和两侧悬挂的边线距离，在中心线两侧各附设一条航线，用以实现无人机一次往返作业的航空摄影拍摄任务。

2. 三维模型构建

考虑在无人机拍摄的输电线影像中，电力线的呈现效果往往较为简单，以传统的系数和特征点方法来对电力线进行提取分析，往往很难将不同的电力线分离出来，也难以获得更准确的电力导向三维坐标。考虑以构建三维模型的方式，将无人机拍摄到的架空电力输电线路原始影像、对应的POS、测区像控点坐标等信息，导入到用于无人机摄影测量处理的系统软件当中，直线对空中三角的测量和处理，以此来提高恢复照片位置和姿态的精度效果。在此基础上来构建电力线路及通道的三维场景，完整表达加工电力输电线路周边的地形环境和植被轮廓[2]。以保障三维模型中相关信息的完整性为目的，还要求能够在构建三维模型时，以空中三角的测量结果作为进行立体测量的辅助，应用立体测图的方法对电力线悬挂点的坐标进行测量分析，进而

结合曲线方程，恢复摄影图像中属于边缘位置的电力导线。

这一过程中涉及的曲线方程为

$$y`=x`\tan\beta-\frac{\gamma x`(l-x`)}{2\sigma_0\cos\beta} \tag{1}$$

式中，$x`$是以某一电力杆塔为坐标原点下的横轴坐标；$y`$是纵轴坐标；l是两杆塔档距；β是高差角；γ是电线比载；σ_0是电线各点的水平应力。

为保证三维模型重建的准确性和可靠性，在初步构建三维模型和应用场景后，应能够结合交通电力输电线路的现场情况，选择合适的影像匹配算法，实现综合影像的匹配。

3. 障碍物定位与识别

障碍物定位与识别是无人机在架空电力输电线路巡检中应用的基本功能，是能够保障无人机航行安全的重要依据。障碍物的定位与识别主要为无人机的避障运动服务。在无人机获取检测范围内的原始图像后，将图像数据输入到无人机的匹配检测训练模型中，实现对障碍物及其位置的检测分析，训练模型输出的障碍物边界框坐标，能够实现对障碍物的定位[3]。

在基础的定位功能前提下，为满足避障运动的要求，应能够对无人机规定航向和前进路径上与无人机距离较近的障碍物进行识别判断。主要发挥智能算法的作用，以事先确定的障碍物边界框高度为依据，要求无人机能够在以恒定速度前进的过程中，依据检测到的障碍物位置情况来触发停止作业的指令。在无人机对周边环境进行检测时，应在算法程序的设定中，以障碍物正在接近无人机、障碍物在一个安全边界内阻碍无人机飞行路线两种行为，作为识别障碍物的关键条件。无人机摄像头与障碍物之间的安全距离应能够结合《架空输电线路运行规程》中导线安全距离的规定标准进行规划，见表1。

表1　导线安全距离

电压等级/kV	最大弧垂时垂直距离/m	最大风偏时净空距离/m
66～110	4.0	3.5
220	4.5	4.0
330	5.5	5.0
500	7.0	7.0
750	8.5	8.5

在结合无人机图像中的空间高度数据前提下，设定一个无人机航行的参数高度比值，依据以下公式对障碍物在距离相机一定位置时，分析不同飞行高度的高度比。即

$$h_{\text{ratio}}=\frac{[Z+\tan(\frac{\text{VFOV}}{2})]\cdot f}{h_{\text{img}}} \tag{2}$$

式中，h_{ratio}为参数高度比；Z为障碍物距离相机不同位置处的飞行高度，m；VFOV代表垂直视场的高度，m；h_{img}为无人机获取图像的像素高度；f为相机标定得到的相机焦距。

将相应的数值带入到式（2）中，要求能够结合识别条件来对障碍物在图像中的高度范围进行确定，从而识别无人机航行过程中的障碍物。

4. 预期航向评估

无人机的飞行航线应能够与架空电力输电线路的走向一致，才能够为线路巡检工作的开展提供更为科学可靠的依据。在受到复杂地形地势环境条件影响的情况下，当无人机航行时检测到障碍物，需要让其转向预期的横向角，在避免障碍物对无人机航行情况产生影响的同时，以一个更平滑的路径来发挥其在电路巡检中的作用[4]。无人机的航行路线偏离了原本的方向，需要能够通过预期横向评估的方法，计算无人机到障碍物后的转向航向角度，确保其在巡检工作中的作用效果。

主要依据以下公式来对无人机的转向角度进行科学计算

$$\psi^*=\frac{x^*-\frac{1}{2}\omega_{\text{img}}}{\frac{1}{2}\omega_{\text{img}}}\times\frac{\text{HFOV}}{2} \tag{3}$$

式中，ψ^*为无人机转向角度；x^*为无人机检测范围内的最大障碍物区域；ω_{img}为图像宽度；HFOV为相机水平视场的角度。

基于无人机倾斜摄影的架空电力输电线路巡检优化的分析

结合架空电力输电线路巡检中无人机的应用情况，考虑以无人机倾斜摄影技术的方式，进一步发挥无人机在电力巡检中的作用，提升线路巡检效果，从以下几方面入手，实现对无人机获取图像的优化处理。

1. 图像边缘检测算法应用

图像边缘检测是能够实现对图像锐化处理，凸显图像上灰度跳变不明显区域的有效方法，从而便于巡检人员对输电线路的运行情况进行检查和计算。在架空电力输电线路中应用无人机倾斜摄影技术，能够以摄影机主光轴明显偏离铅垂线或水平方向并按一定倾斜角进行的摄影图像，获取更真实的监测区域情况。相较于一般的无人机巡检，倾斜摄影不仅能够满足图像获取的要求，也能够直接在倾斜摄影装置中实现对图像数据的快速分析和处理。这一过程中，智能算法的应用，是能够满足无人机倾斜摄影数据处理与分析要求的主要依据。

在无人机倾斜摄影中应用图像边缘检测算法，以ED-Canny优化的图像边缘检测算法为例。基于该算法对图像边缘进行检测，如图1所示，要求在利用无人机获取输电线路航拍图像后，以设计混合滤波器的方式来对获取图像进行去噪处理，进而依据算子获取图像的梯度幅值和方向，进而借助算法程序自动获取图像的一阶梯度差。在由算法程序判断图像像素点是否为锚点后，对像素点为锚点的情况，在进一步确定其为水平锚点的基础上，将图像中水平方向相邻梯度幅值的最大锚点连接起来，进而依据智能路由算法将图像中的所有锚点连接起来，进而完成对输电线路图像边缘的检测。

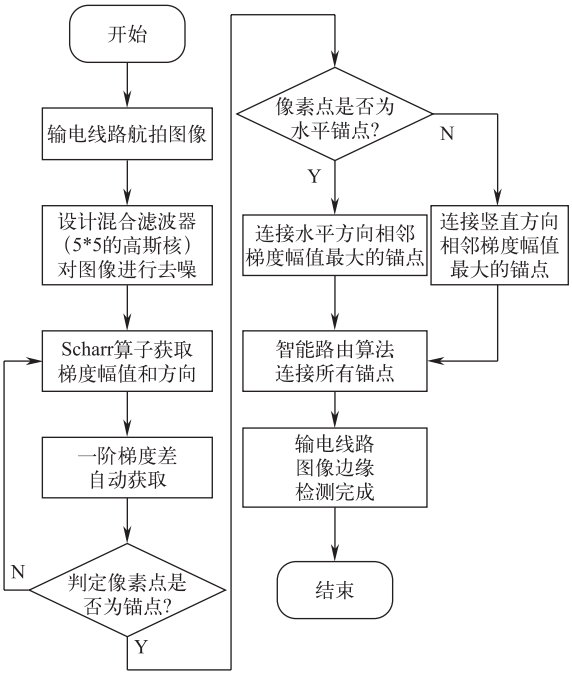


图1　ED—Canny优化的图像边缘检测算法应用程序

以保障算法应用效果为主要目的，考虑无人机航拍获得的图像中往往含有较多的椒盐噪声和高斯噪声，在选择图像处理技术手段时，应能够兼顾保留图像细节信息和达到良好噪声取出效果的要求。基于此，在设计混合滤波器时，可以尝试将中值滤波器和高斯滤波器结合起来，利用5 × 5的高斯卷积核来达到图像去噪的目的。可以借助峰值信噪比指标，对不同规格大小的高斯卷积核滤波效果进行像素误差分析。峰值信噪比的数值越大，则证明无人机获取的图像细节信息越丰富，图像具有更明显的平滑效果。

2. 图像异常检测算法应用

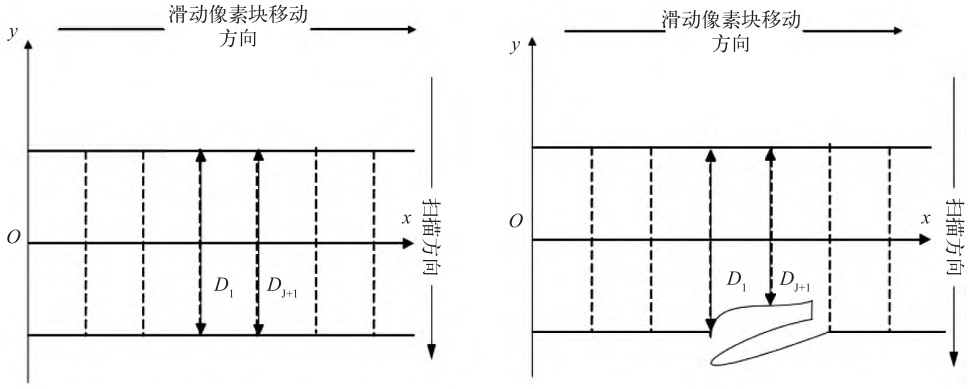
在图像异常检测算法的应用方面，重点针对无人机倾斜摄影获取的电力线路图像中可能存在的导线断股、大目标异物及小目标异物三类最为常见的异常状况，明确这些异常情况在图像中的表现特征，实现异常信息与电力线路信息的有效分离，从而减轻这些异常情况对图像分析和电力线路巡检工作造成的影响。

结合当前架空电力输电线路巡检工作的开展情况，应用图像异常检测算法，应遵循以下思路：需要在获取无人机倾斜摄影得到的图像后，对图像进行倾斜校正，以二值化处理的方式，提取图像导线中心轴，进而以此为依据，在图像中建立直角坐标系。从坐标系中标记异常的矩形区域范围后，应用算法，计算沿导线的像素块旋转梯度方向，进而判断旋转梯度方向的变化情况是否超过规定阈值。对超过阈值的情况可以直接标记异常的起始点位置，然后让旋转梯度方向恢复原始方向，进而标记异常的结束点位置。

依据输出的计算结果，判断当导线宽度小于正常导线线径且列扫描灰度跳边次数超过两次时，输出导线断股的坐标，则可以证实该异常位置发生导线断股情况；当区域内目标形心偏离中心轴时，输出大目标异物的坐标，则可以判断该异常位置发生了大目标异物的情况；当子图与虚假异物模板成功匹配时，输出小目标异物坐标，则可以证实该位置发生了小目标异物的情况。对以上三方面条件均未满足的情况，则可以输出虚假异物坐标，算法结束。

考虑不同异常情况对无人机倾斜摄影获取图像

的影响不同，在实际应用图像异常检测算法时，应能够对每一个具体的异常情况应用相应的检测算法。以导线断股检测算法为例，首先需要总结导线断股这一异常情况下的图像特征。导线断股位置的无人机图像会呈现出导线直径变细、灰度变暗、出现长度有限的细小分支、像素点梯度幅值发生变化等特点。依据以上特点来进行检测算法设计，可通过对导线运行状态的扫描分析，以导线直径变化量和临界阈值大小的对比结果，作为判断导线是否发生断股异常的依据，如图2所示。



（a）正常导线边缘扫描示意图　　（b）导线断股边缘扫描示意图

图2　导线运行状态的扫描对比情况

由此可以明确，在对图像像素块内输电导线二值图像进行逐列扫描的过程中，提取相邻像素黑白跳变次数作为特征量，在架设二值图像只有一条导线的情况下，若图像灰度跳变次数超过2次，则可以判断该位置存在导线断股的情况。

结束语

综上所述，将无人机倾斜摄影技术应用到架空电力输电线路的巡检工作当中，有利于提升线路巡检工作的质量效果。在明确无人机倾斜摄影技术基本应用要求和流程后，尝试将先进的智能算法引入到线路巡检工作中，重点针对无人机倾斜摄影获得的边缘和异常图像进行分析处理，能够有效提高无人机获取输电线路运行情况图像的清晰度，从而便于对输电线路的运行情况进行分析。**EA**

（收稿日期：2024-03-18）

参考文献

[1] 杨俊武，何天璞，等．无人机在架空输电线路巡检中的自动补光系统应用研究[J]．山西电力，2023(5)：16-20．

[2] 韩征．输电线路无人机巡检技术研究[J]．光源与照明，2023，(10)：180-182．

[3] 孙可可，张超，李晨，等．无人机在架空输电线路中的研究综述[J]．智能建筑与智慧城市，2023(10)：25-27．

[4] 成爽朝，王旭立．架空输电线路无人机运维巡检技术研究[J]．模具制造，2023，23(10)：229-231．