

基于机器视觉和激光测距的输电线故障定位

金立军¹, 王 恒¹, 王文华², 闫书佳³

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. 国家电网浙江省电力公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000; 3. 上海工程技术大学, 上海 201800)

摘要: 结合定位技术和激光测距技术,提出了一种基于机器视觉的电力巡线故障定位新方法.通过无人机搭载可见光相机进行巡线拍摄,将航拍图像实时传回地面站进行处理.采用数学形态学的图像处理方法和模式识别方法进行故障检测与识别.通过惯性测量系统进行初步定位,得到无人机的经纬度坐标.利用无人机机载激光测距模块,测量故障点到无人机的距离来修正坐标.最后,经过空间大地坐标系和空间直角坐标系的变换,以及两个空间直角坐标系的基准转换,计算出了故障点的准确位置,并且很大程度地提高了定位的准确性,其空间直角坐标测量精度可达 0.11 m.

关键词: 机器视觉; 激光测距; 输电线路; 图像处理; 故障定位

中图分类号: TM81

文献标志码: A

longitude and latitude coordinates of unmanned aerial vehicle by using the inertial measurement system. An airborne laser ranging module is used to correct the coordinates by measuring the distance from the fault point to the unmanned aerial vehicle. Finally, accurate position coordinates of fault points are calculated after coordinate transformation between the space geodetic and space rectangular coordinate system as well as datum transformation between two rectangular coordinate systems. The positioning accuracy has been greatly improved and the space rectangular coordinate measurement accuracy can be as high as 0.11 m.

Key words: machine vision; laser ranging; transmission line; image processing; fault location

Transmission Line Fault Location Based on Machine Vision and Laser Ranging

JIN Lijun¹, WANG Heng¹, WANG Wenhua², YAN Shujia³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jiaxing Power Supply Company, Zhejiang Electric Power Company, State Grid, Jiaxing 314000, China; 3. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201800, China)

Abstract: Combined with positioning technology and laser ranging technology, a novel method for transmission lines fault location is proposed by machine vision. The unmanned aerial vehicle carries a visible light camera for shooting work of transmission line. The aerial images are transmitted back to the ground station in real time for further processing. The image processing and pattern recognition methods are adopted to detect and recognize faults on transmission lines, where the mathematical morphology algorithms are applied in image processing. The initial positioning is used to obtain the

无人机航拍巡线时,当发现绝缘子掉片、间隔棒断裂、导线悬挂异物等外绝缘缺陷或故障,需要对故障点进行准确定位,便于检修人员迅速找到故障点.传统电力故障定位方法常用电流、电压等故障信息,在线路端点处测量故障距离,如阻抗法和行波法.阻抗法主要基于均匀线的故障回路阻抗与测量点到故障点的距离成正比这一原理,来进行故障测距^[1-2].阻抗法假设导线电阻均匀,实际中测量误差较大,适合于结构简单的线路.行波法利用故障行波到达线路两端的时间差来计算故障距离^[3-4].行波法需要在线路测量端用专门的设备捕捉暂态行波信号,识别故障行波准确度不高.此外,传统的电力故障定位方法^[5-6]适用于电压、电流出现突变的状态,无法识别和定位非电参数所致的故障.

由于电力巡线环境的特殊性,输电线周围强电磁干扰会影响无人机对外部 GPS(全球定位系统)信号的接收,因此首先要实现无人机自身的准确定位,

收稿日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(51577135); 中央高校基本科研业务费专项资金(22120170065)

第一作者: 金立军(1964—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为电力设备故障诊断及高电压技术.

E-mail: jinlj@tongji.edu.cn

通信作者: 王 恒(1994—),男,硕士生,主要研究方向为无人机巡线及电力设备故障诊断. E-mail: 819046342@qq.com

不能超过规定的安全距离,应保证飞行的安全性。此外,高质量图像的拍摄也需无人机稳定悬停来减少抖动^[7],并针对不同拍摄设备制定合理的拍摄距离。对于可见光相机,数米的拍摄距离变化对图像清晰度影响不明显;而红外和紫外相机则对拍摄距离很敏感,数米的拍摄距离误差会导致成像模糊,难以进行故障识别。虽然目前市场上存在很多把 GPS 与激光测距仪合二为一的产品,如手持 GPS 蓝牙连接激光测距仪,但受限于手持,对于复杂地貌(如山丘、沟壑)不易操作,且无人机机载产品尚处于研发阶段。因此,本文提出了一种替代外部 GPS 信号进行无人机定位的方案,增加了飞行安全性并有助于拍摄清晰图像,提高了故障识别的准确性。

基于机器视觉和激光测距的输电线故障定位方法,可借助无人机搭载可见光相机进行航拍,利用图像处理技术识别故障,再结合定位技术和激光测距技术对故障点进行精准定位。该方法可识别非电参数所致故障,在故障早期进行识别和定位,并及时告知维修人员故障所在的准确位置,以便对潜在威胁进行排除,避免故障扩大。同时,该方法适用于复杂地形下的故障定位,理论上对于距离较近的多个故障点也有很好的区分定位效果。本文以输电线间隔棒断裂故障为例,进行故障识别和定位。

1 故障定位

1.1 故障定位流程

无人机自身带有 GPS 定位功能,结合地面站监控软件,可粗略测量和读出无人机所处的经纬度坐标和高程坐标,但定位精度不高,经纬度有效值只达到小数点后 4 位,换算为空间距离约为 10 m。而相邻两个杆塔之间的输电线路,一般会有多个间隔棒,其间距只有几 m,如 500 kV 输电线路的四分裂导线两个间隔棒之间距离为 5.5 m。只依靠 GPS 定位范围太大,无法区分相邻多个间隔棒中的故障点位置。此外,巡线时无人机与线路相距数米拍摄,这就导致无人机机身坐标并非故障实际所在位置。因此需要结合机载激光测距模块,先准确测量出无人机机身位置,再对无人机机身坐标进行修正,从而得到故障点坐标。在修正坐标前,需先把经纬度坐标转换为空间直角坐标,这就涉及到坐标基准转换。最后,通过坐标反变换便可以得到高精度的经纬度坐标和高度坐标。故障定位流程如图 1 所示。图中, x 、 y 、 z 表示直角坐标; B 、 L 、 H 表示经纬度坐标。

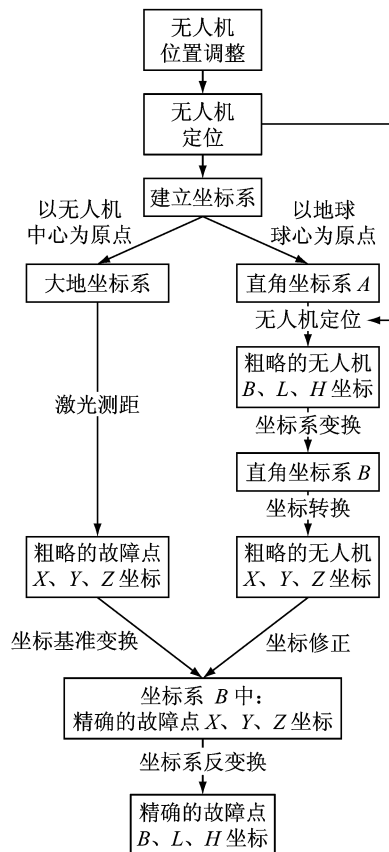


图 1 巡线故障定位流程

Fig.1 Flowchart of fault location of transmission line

1.2 无人机定位

考虑到输电线周围的强电磁干扰可能造成无人机自带的 GPS 信号不稳,导致飞行安全隐患和悬停拍摄时抖动降低图像质量,因此需要一套备用或替代方案来实现无人机机身准确定位。传统的 GPS 定位依赖于外部卫星信号,很容易受到干扰产生偏差甚至错误。本文一方面结合电力部门提供的杆塔地理坐标和激光测距进行机身定位,另一方面通过无人机 IMU(惯性测量单元)获取陀螺仪和加速度计的相关数据并进行解算,仅依靠内部信号来实现定位。此外,实验采用的六旋翼无人机,相比于无人直升机,也可以提高飞行和拍摄的稳定性。无人机机身定位方案如图 2 所示。

激光测距测量无人机机身到已知坐标的杆塔的距离;陀螺仪测量相对于惯性坐标系 3 个正交方向的角度变化;加速度计测量 3 个方向的加速度,通过对时间进行两次积分得到空间位置偏移量。

1.3 激光测距

通过测距来提高定位的精度,常用的机载测距方式有红外测距、超声波测距和激光测距,它们的优缺点如表 1 所示。考虑到无人机飞行会受输电线周

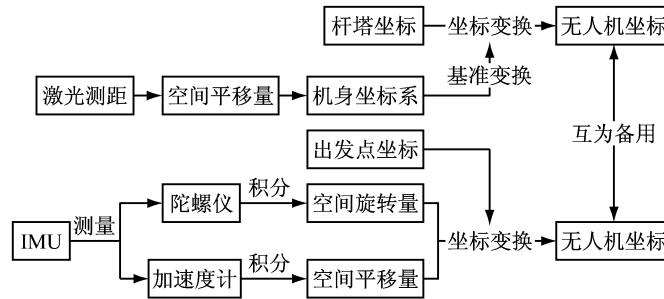


图 2 无人机定位方案

Fig.2 Positioning scheme of unmanned aerial vehicle

围电磁干扰,需与线路保持较远的安全距离^[8].同时为了提高定位的精度,尽可能采用精度高的测距方式.无人机机载激光测距模块距离地面一定高度沿线飞行,遮挡物较少,且发射激光到间隔棒不会影响到人身安全,所以激光测距为最佳方式.

表 1 常见测距方式比较

Tab.1 Comparison of common ranging methods

测距方式	优点	缺点
红外测距	成本低、反应速度快	测量距离近、精度低、方向性差
超声测距	方向性好、穿透力强	精度低、成本高、反应速度慢
激光测距	精度高、反应速度快、测量距离远	易受遮挡、成本高、不安全

激光测距原理是无人机发射出一束激光,经被测量物体反射后再被无人机测距模块接收,测距模块同时记录激光往返的时间.光速和往返时间乘积的一半,就是测距模块和被测量物体之间的距离.本实验中无人机安装了 Leddar One 传感器模块,来探测距离,测量范围为 0~40 m,精度为 0.05 m.

1.4 坐标转换

无人机采用 wgs84 世界大地坐标系进行地理坐标测量,可以得到经纬度坐标和高程.由于经纬度坐标有效位数有限,精度不高,因此需要提高 GPS 测量精度.提高精度常见的方式是采用差分 GPS 技术^[9],包括位置差分、伪距差分和载波相位差分,但需要搭建基准站以供校准,同时要求无人机距离基准站不能太远.因此,需要增加设备投入,并且对于巡线的范围也有一定限制,最终虽然可以将定位精度提高到 m 至 cm 级,但仍然只是求出了无人机的位置,而没有对故障点进行准确定位.

将空间大地坐标转换为空间直角坐标,以便于测距后的坐标修正.坐标系变换是指在同一地球椭球下,空间点的不同坐标表示形式间进行变换.图 3 为大地坐标系与空间直角坐标系的相互转换.

在相同的基准下,将大地坐标系转换为空间直

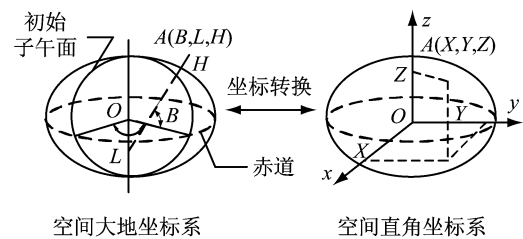


图 3 坐标系转换

Fig.3 Coordinate system transformation

角坐标系,公式为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+H)\cos B \cos L \\ (N+H)\cos B \sin L \\ [N(1-e^2)+H]\sin B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: B 为纬度; L 为经度; H 为高度; $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$ 为地球椭球的离心率; a 和 b 分别为地球椭球的长、短半轴; $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$.

通过控制无人机的飞行和激光测距进行直角坐标修正后,将空间直角坐标反变换为大地坐标,可以提高经纬度坐标的精度.转换公式为

$$\begin{bmatrix} L \\ B \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ \arctan\left(\frac{Z(N+H)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)[N(1-e^2)+H]}}\right) \\ \frac{Z}{\sin B} - N(1-e^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在激光测距过程中,为了获取直角坐标修正量,需要以无人机机身所在位置建立新的空间直角坐标系,因此需要进行两个直角坐标系之间的基准转换,基准转换模型如图 4 所示.七参数布尔莎模型可以解决任意角度下的坐标系转换问题.空间变换所需要的 7 个转换参数是:由于原点不重合产生的 3 个平移参数 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ;由于坐标轴不平行产生的 3 个旋转参数 ω_X 、 ω_Y 、 ω_Z ;由于两坐标系间的尺度不一

致产生的 1 个尺度参数 m .

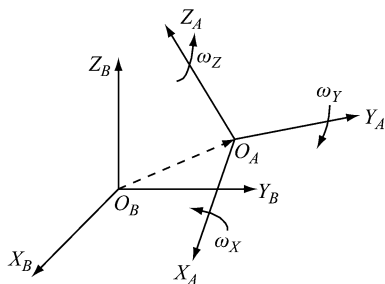


图 4 坐标基准转换

Fig. 4 Transformation of coordinate datum

设故障点在以无人机为原点和以地球球心为原点的直角坐标系中坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 和 (X_B, Y_B, Z_B) , 则坐标基准转换满足如下关系式:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+m)R(\omega) \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R(\omega) = R(\omega_Z)R(\omega_Y)R(\omega_X)$, 并且有

$$R(\omega_Z) = \begin{bmatrix} \cos \omega_Z & \sin \omega_Z & 0 \\ -\sin \omega_Z & \cos \omega_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R(\omega_Y) = \begin{bmatrix} \cos \omega_Y & 0 & -\sin \omega_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_Y & 0 & \cos \omega_Y \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R(\omega_X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_X & \sin \omega_X \\ 0 & -\sin \omega_X & \cos \omega_X \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 基于图像处理的故障识别

2.1 故障识别流程

间隔棒通常具有规则的、对称的几何结构, 如正三角形、正四边形、正六边形等. 一旦发生断裂故障, 这种规则的对称结构将被打破, 出现与正常间隔棒具有明显区别的结构. 本文以四分裂间隔棒为例, 进行识别与断裂诊断^[10]. 图 5 为间隔棒断裂故障识别流程. 首先通过六旋翼无人机机载相机拍摄获取含有间隔棒的输电线路图像, 再通过图像预处理进行

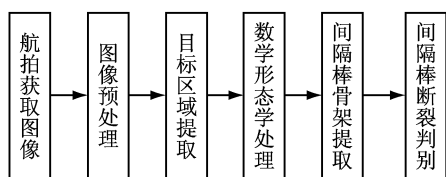


图 5 间隔棒断裂故障识别流程

Fig. 5 Flowchart of fault recognition of spacer rupture

图像增强和滤波, 然后裁剪出含间隔棒的图像区域, 采用腐蚀膨胀形态学处理方法^[11-12]去除电力线, 最后提取出间隔棒骨架并根据骨架的形状和连通性判别是否为断裂故障.

2.2 间隔棒断裂故障识别

2.2.1 识别原理

(1) 图像预处理

图像获取和传输过程会产生噪声, 为了减弱噪声影响, 需对图像进行滤波处理. 中值滤波将每个像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度值的中值. 中值滤波法对消除椒盐噪声非常有效, 在滤除噪声后能基本保留图像的边缘信息. 本文采用图 6 所示的中值滤波器对图像进行平滑滤波, 经实验发现, 窗口大小为 5×5 滤波效果最好, 窗口过大, 图像模糊失真; 窗口过小, 不能完全滤除噪点. 为了减少滤波的计算时间, 并尽可能地保留输电线路的边缘信息, 仅利用中值滤波器中的一部分像素进行计算, 如图 6 中阴影部分所示.

W(-2,-2)	W(-2,-1)	W(-2,0)	W(-2,1)	W(-2,2)
W(-1,-2)	W(-1,-1)	W(-1,0)	W(-1,1)	W(-1,2)
W(0,-2)	W(0,-1)	W(0,0)	W(0,1)	W(0,2)
W(1,-2)	W(1,-1)	W(1,0)	W(1,1)	W(1,2)
W(2,-2)	W(2,-1)	W(2,0)	W(2,1)	W(2,2)

图 6 基于稀疏模板的 5×5 中值滤波器

Fig. 6 5×5 median filter based on sparse template

上述基于稀疏模板的二维中值滤波器可表示为

$$f_m(x, y) = \text{median}_{k, g \in \{0, \pm 1, \pm 2\}, |k| - |g|} \{d(x, y) \cup d(x+k, y+g)\} \quad (7)$$

式中: $d(x, y)$ 为原图像; $f_m(x, y)$ 为滤波后图像.

滤波后还需要进行阈值分割, 进一步去掉背景. 天津法按照图像的灰度特性, 将图像分成背景和目标两部分, 最终得到两者的分割阈值. 背景和目标间的类间方差越大, 构成图像的两部分的差别也越大, 越容易成功分割. 最后将阈值带入二值化处理过程得到黑白两色图像, 从而除掉黑色背景.

设灰度图像拥有 L 个灰度级 $[1, 2, \dots, i, \dots, L]$, 若阈值 T 将图像的像素分为两类: 背景 $B_a = \{1, 2, \dots, T\}$ 和目标 $O_i = \{T+1, \dots, L\}$. 两类出现的概率分布为 ω_B, ω_O , 灰度均值为 μ_B, μ_O , 整幅图像灰度均值为 μ .

概率分布和灰度均值的计算公式如式(8), 图像

大小为 $M \times N$, 灰度级 i 的所有像素的个数为 n_i , 出现的概率为 p_i .

$$\omega_B = \sum_{i=1}^T p_i = \frac{\sum_{i=1}^T n_i}{M \times N}, \omega_O = \sum_{i=T+1}^L p_i = \frac{\sum_{i=T+1}^L n_i}{M \times N}$$

$$\mu_B = \sum_{i=1}^T i \frac{p_i}{\omega_B}, \mu_O = \sum_{i=T+1}^L i \frac{p_i}{\omega_O}, \mu = \sum_{i=1}^L i p_i \quad (8)$$

阈值为 T 时可求得背景与目标的类间方差 σ^2

$$\sigma^2 = \omega_B(\mu - \mu_B)^2 + \omega_O(\mu - \mu_O)^2 \quad (9)$$

通过比较不同 T 值下的方差, 如图 7 所示, 当方差取最大值时, 得到最佳阈值约为 3.57.

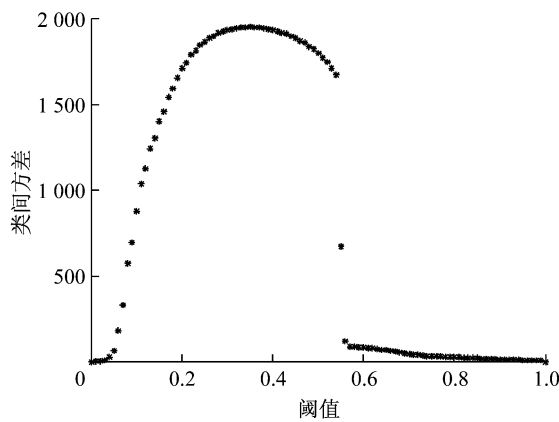


图 7 方差随阈值变化曲线

Fig.7 Inter-class variance change along with threshold

部分计算过程中的参数取值如表 2 所示.

表 2 阈值计算的中间参数

Tab.2 Intermediate parameters of threshold calculation

T	ω_B	ω_O	μ_B	μ_O	σ^2
0.34	0.253 4	0.746 6	379	1 394	1 948.0
0.35	0.257 1	0.742 9	386	1 397	1 948.7
0.36	0.259 3	0.740 7	391	1 398	1 948.1
0.37	0.262 9	0.737 1	398	1 400	1 945.7

(2) 数学形态学处理

数学形态学以形态为基础对图像进行分析和处理. 首先, 生成具有一定形态的结构元素(如圆盘、矩形、菱形等), 然后, 通过一定的运算使结构元素与图像中的物体相互作用, 从而达到对图像进行分析和识别的目的. 使用该方法可简化图像数据, 除去不相干的结构, 并且保持图像原本的形状特征.

令 $b(x, y)$ 为结构元素, 则灰度形态学中的膨胀与腐蚀分别定义如下:

$$(g \oplus b)(s, t) = \max\{g(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_g; (x, y) \in D_b\} \quad (10)$$

$$(g \otimes b)(s, t) = \min\{g(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_g; (x, y) \in D_b\} \quad (11)$$

式中: D_g 和 D_b 分别为 $g(x, y)$ 和 $b(x, y)$ 的定义域; 平移参数 $(s-x), (t-y)$ 或 $(s+x), (t+y)$ 须在 $g(x, y)$ 定义域内; x 和 y 须在 $b(x, y)$ 定义域内.

开运算是一个先腐蚀后膨胀的过程, 它具有消除细小物体, 在纤细处分离物体和平滑较大物体边界的作用. 闭运算是一个先膨胀后腐蚀的过程, 它具有填充物体内部细小空洞, 连接邻近物体和平滑边界的作用. 用结构元素 $b(x, y)$ 对图像 $g(x, y)$ 进行开运算和闭运算, 可分别表示为 $g \circ b$ 和 $g \cdot b$, 其定义如下:

$$g \circ b = (g \otimes b) \oplus b \quad (12)$$

$$g \cdot b = (g \oplus b) \otimes b \quad (13)$$

(3) 骨架提取与细化

图像骨架提取是指提取目标在图像上的中心像素轮廓, 以目标中心为准对目标进行细化, 细化后的目标为单层像素宽度. 从目标外围往目标中心, 利用以待检测像素为中心的特定大小的像素窗口的特征, 对目标不断腐蚀细化, 直至腐蚀到不能再腐蚀(单层像素宽度), 从而得到图像的骨架.

假设像素 p 的 3×3 邻域结构如图 8 所示, 则细化算法步骤为: 对图像从左向右、从上向下迭代每个像素, 作为 1 个迭代周期. 在每个周期中, 对于每一个像素 p , 如果它同时满足以下 6 个条件, 则对其进行标记. 在当前迭代周期结束时, 把所有标记的像素点的值设为背景值. 如果某次迭代周期中不存在标记点, 则算法结束. 假设背景值为 0, 前景值为 1, 这 6 个条件为: p 为 1, 即 p 不是背景; x_1, x_3, x_5, x_7 不全部为 1; $x_1 \sim x_8$ 中, 至少有 2 个为 1; p 的 8 连通联结数为 1; 假设 x_3 已经标记删除, 那么当 x_3 为 0 时, p 的 8 连通联结数为 1; 假设 x_5 已经标记删除, 那么当 x_5 为 0 时, p 的 8 连通联结数为 1.

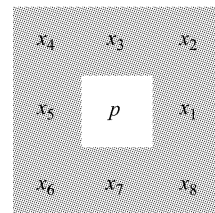


图 8 8-邻域标记搜索示意图

Fig.8 Schematic of 8- neighborhood markup search

(4) 骨架连通性判别

采用 8-邻域标记法搜索二值图像中的连通邻域并统计邻域内的像素个数, 判别骨架是否断裂. 若二值图像中有且仅有 1 个连通邻域, 且连通域像素面积所占整幅二值图像面积比例满足一定范围(本实

验正常间隔棒骨架像素面积约为剪裁放大后整幅图像的 2%~4%), 则判断骨架完整, 否则为断裂故障。针对图 8 所示间隔棒, 搜索结果如表 3。

表 3 连通域检测结果

Tab.3 Detection results of connected domain

连通域编号	像素个数	面积占比/%
1	573	1.14
2	104	0.21

2.2.2 识别结果

图 9b 是在晴天拍摄的经剪裁放大后的断裂间隔棒图像, 图像大小为 224×224 像素。首先用 5×5 窗口对间隔棒原图进行中值滤波, 并通过阈值分割将原始图像转换为二值图像, 如图 9c, 这里通过自适应的大津法得到二值化阈值为 0.356 9。

然后对二值图像进行数学形态学处理来提取间隔棒骨架: 先进行开运算填补细小孔洞, 如图 9d 所示, 经过实验发现, 对于 224×224 像素的图片, 结构元素宜采用半径为 6 像素的正方形。再采用闭运算去除相对较细的导线, 结构元素宜采用半径为 9 pixel 的圆盘, 去除输电线后效果如图 9e 所示。

最后通过图像细化算法提取出间隔棒的骨架图

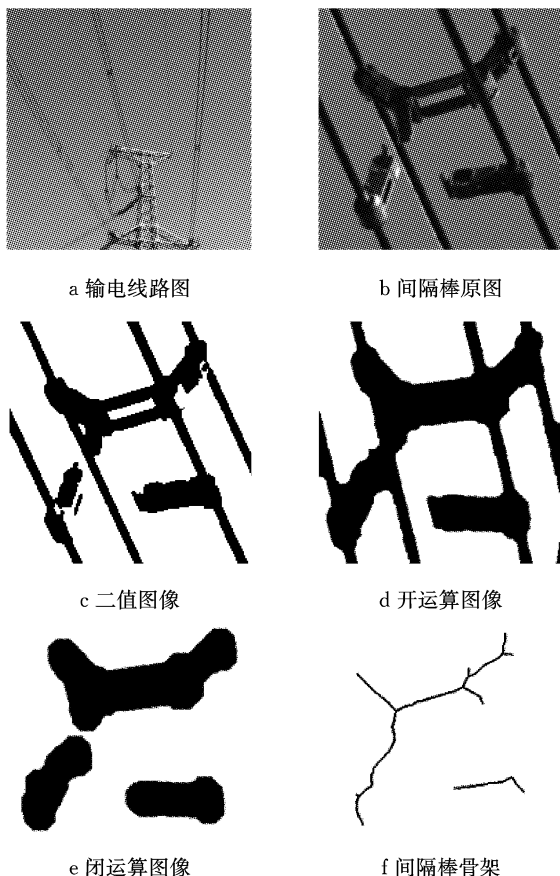


图 9 断裂间隔棒图像处理

Fig.9 Image processing of broken spacer bar

像, 如图 9f 所示, 并根据 8-邻域标记法进行连通域搜索, 检测出骨架整体轮廓超过 1 个连通区域, 且检测出的 2 个连通区域面积占比小于正常值。因此判别为断裂故障。

本文将 150 幅图像随机分为 5 组, 对本文提出的故障识别方法的准确性进行了验证, 结果如表 4 所示。实验结果表明, 该判别方法准确率较高且不会造成漏判, 能有效检测识别出间隔棒断裂故障。

表 4 故障识别结果

Tab.4 Results of fault identification

实验批次	样本		诊断结果			准确率/%
	总数	断裂	断裂	漏判	误判	
1	30	4	4	0	0	100
2	30	6	6	0	0	100
3	30	5	6	0	1	96.67
4	30	5	5	0	0	100
5	30	3	4	0	1	96.67

3 故障定位结果和误差分析

3.1 故障定位实验

3.1.1 实验过程

实验选在晴天, 地点为顾家村, 附近飞行干扰物较少。该地经纬度坐标为 $(121.21165^\circ, 31.29607^\circ)$, 无人机巡视对象为农田上方的线路, 使用软件为 Mission Planner (飞行任务规划)、UPMOST PVR (图像传输)、MATLAB 与 Visual Studio (图像处理与故障诊断), 具体信息如图 10 所示。

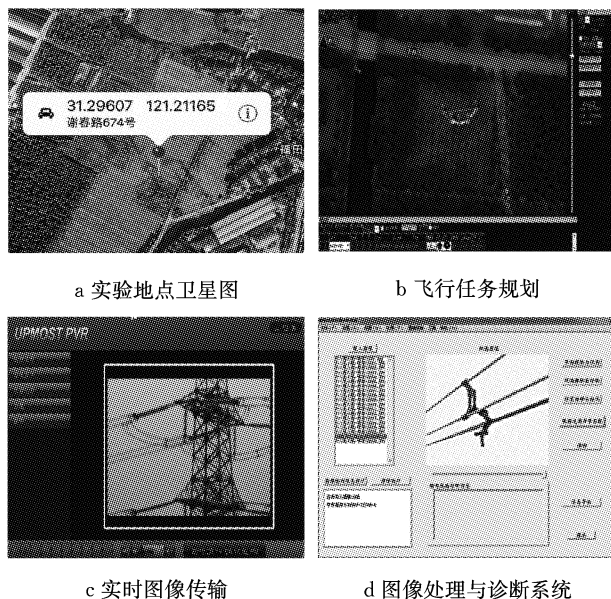


图 10 实验地点和系统

Fig.10 Experimental site and systems

实验中采用组装式六旋翼无人机搭载 SONY

A6000 可见光相机进行拍摄,最大载荷 2.5 kg,最大通信距离为 3 km,两轴云台,横滚、俯仰方向可控精度为 0.1° 。旋翼无人机要比无人直升机飞行平稳,拍摄视频时抖动较小,在 3 级风条件下偏航距不大于 ± 1 m,航高偏差不大于 ± 1 m。通过地面站航线规划与航点任务设计功能,近似地将相邻 2 个杆塔之间的线路,分为多段折线,折线数目越多,飞行路线就更加接近线路弧线。本实验将 1 个区间内线路近似为 4 段折线,通过编程事先将路线写入飞控中,可保证无人机自动沿线巡视,且线路不会超出拍摄视野。图 11 为巡线飞行线路图。

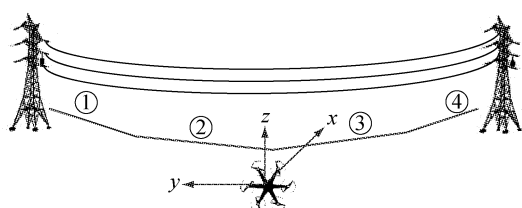


图 11 巡线飞行线路图

Fig.11 Diagram of flight route of patrol line

在地面站航线规划软件平台上,以无人机中心处为新的直角坐标系原点,从原点正对着故障点的连线方向为 $+x$ 轴,地面向上方向为 $+z$ 方向,按照右手螺旋法则建立坐标系,根据输入到地面软件的航线命令,控制无人机,使其自动沿 y 轴飞行。

无人机以 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度按预先设置好的轨迹,在输电线路斜下方,以接近塔高一半的高度,沿线缓慢飞行和拍摄。当检测到输电线路存在非线性物体时,自动切换为悬停模式,悬停约 2 s,根据物体在图像中的成像情况,自动缓慢调节无人机,使待识别物体全部进入画面。通过调用系统程序里的图像库进行匹配,识别出输电线路上的设备和器件类型。若无故障,则切换为飞行模式,继续巡线。

当检测到输电线上非线性物体时,自动启用事先写入的故障测距程序,使无人机自动调整轴向位置。沿 y 轴飞行方向上,为了让待识别目标点正对着相机,以飞行航线方向为参考轴,自动微调无人机飞行直到相机的云台水平转角接近 0° ;再进一步对无人机沿 z 轴的高度进行调整,使得目标点位于图像中心,此时云台的俯仰角接近 0° 。

当调整目标物体位于图像中心后,启用激光测距命令,由于悬停时存在晃动,需要测量 5 次取平均值,作为最终的距离值。测距传感模块的精度为 0.05 m,5 次测量的数值分别为 6.40、6.45、6.55、6.50、6.45 m。此时,先结合电力部门提供的杆塔

GPS 坐标和激光测距,得到无人机机身的坐标;再根据激光测距和坐标转换,得到待识别点坐标。

3.1.2 实验结果

通过机载激光测距,测出待识别目标点到无人机的距离 $d=6.47 \text{ m}$,则目标点在以无人机为原点的空间直角坐标系 A 中的坐标为 $(d,0,0)$ 。

根据无人机 GPS 测量得到所在地的经度为 $L=121.2117^\circ \text{ E}$,纬度为 $B=31.2960^\circ \text{ N}$,高度为 $Z=18.46 \text{ m}$ 。通过坐标系转换,可得到无人机所处的以地球球心为原点的直角坐标系 B 下的坐标: $(X,Y,Z)=(-2\,826\,806.554 \text{ m}, 4\,665\,462.063 \text{ m}, 3\,293\,989.935 \text{ m})$,从而可以进一步计算坐标基准转换所需的 7 个参数。两坐标系距离单位均为 m,所以有:

(1) 尺度参数 $m=1$;

(2) 平移参数

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (X, Y, Z) = (-2\,826\,806.554 \text{ m}, 4\,665\,462.063 \text{ m}, 3\,293\,989.935 \text{ m})$$

(3) 旋转参数

$$\omega_z = \arccos \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} = 58.875^\circ$$

当 ω_z 保持不变时, $\omega_x = \omega_y = 12.376^\circ$ 。

因此可以将目标点在空间直角坐标系 A 下的坐标 $(X_A, Y_A, Z_A) = (d, 0, 0) = (6.47 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$,经过坐标基准变换,将原坐标转换为空间直角坐标系 B 下的坐标: $(X_B, Y_B, Z_B) = (-2\,826\,813.103 \text{ m}, 4\,665\,451.253 \text{ m}, 3\,329\,399.271 \text{ m})$ 。

将空间直角坐标反变换到空间大地坐标,得到精度更高的经纬度坐标:

$$\begin{cases} L' = 121.21164619^\circ \text{ E} \\ B' = 31.29607154^\circ \text{ N} \end{cases}$$

为了验证该方法的有效性,实验选取了 4 个测点,分别用无人机 GPS、激光测距改进后的 GPS 和手机专业测量软件进行测量,并将手机 APP 测量结果作为标准参考值。手机 APP 测量精度可到小数点后五位,通过人工手持走到待识别目标位置正下方进行验证。测量结果如表 5 所示。

由于地球纬度随空间距离是均匀变化的,在经线上,纬度每差 1° ,实地距离约为 111.3 km。因此,将手机测量结果作为参考值,可算出本文方法和直接 GPS 定位的距离误差,如图 12 所示。

对比误差曲线可以看出,结合激光测距的 GPS 定位方法对于故障的定位误差换算为空间距离约为 0.1~0.2 m,远远小于单独使用 GPS 定位所带来

表 4 不同方式下经纬度测量结果

Tab.4 Measurement results of latitude and longitude in different ways (°)

测点 编号	经纬 度	方法		
		GPS	GPS+激光测距	手机 APP
测点 1	N	31.296 0	31.296 071 54	31.296 07
	E	121.211 7	121.211 646 19	121.211 65
测点 2	N	31.296 5	31.296 531 25	31.296 53
	E	121.211 6	121.211 568 73	121.211 57
测点 3	N	31.296 8	31.296 780 95	31.296 78
	E	121.211 5	121.211 480 27	121.211 48
测点 4	N	31.296 4	31.296 351 07	31.296 35
	E	121.211 3	121.211 339 42	121.211 34

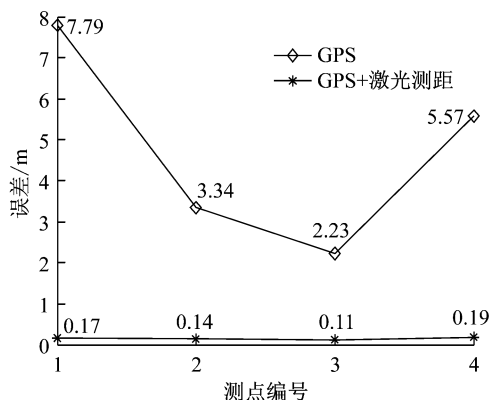


图 12 两种方法测量误差曲线

Fig.12 Curves of measuring error of the two methods

的误差. 对于区分输电线上相邻 2 个间隔棒的位置, 该方法的精度可以满足要求并较准确地定位.

3.2 误差分析

误差主要来源于仪器、系统方法和外界干扰. 具体分析如下:

(1) 激光测距误差: 无人机机载激光测距模块精度为 ± 0.05 m, 仪器精度不高会造成一定的误差.

(2) 高度微调误差: 在微调飞行高度来确定故障点高度坐标时, 相机中心与机身坐标中心不重合, 导致高度测量系统误差.

(3) 外界干扰误差: 无人机悬停过程中受风力影响发生抖动, 影响激光测距读数; 卫星运行轨道、卫星时钟存在误差; 大气对流层、电离层对信号的影响; 输电线路周围电磁场对信号的干扰等.

对于激光测距误差, 可通过采用更高精度的测距模块来减小; 对于高度微调误差, 则需要完善图像识别算法来减小; 对于减小外界干扰误差, 则可以通过选择晴朗无风的天气巡线来部分实现.

4 结论

本文针对输电线路上的间隔棒断裂, 提出了一

种基于机器视觉和激光测距的电力巡线故障定位方法, 通过无人机搭载成像设备对输电线路巡检进行实验验证, 先利用无人机内部惯性测量单元和电力部门提供的杆塔坐标数据, 实现对无人机的定位. 当发现疑似故障物时, 通过稳定地悬停拍摄来获取高质量图像, 并对航拍图像进行处理来识别故障. 采用基于数学形态学处理和骨架细化后连通性判别的图像处理方法进行故障识别, 准确率可达 96%. 检测出故障后, 结合激光测距和坐标变换对故障点进行准确定位, 定位距离可精确到 0.1~0.2 m. 经过无人机飞行调整和坐标变换后, 对故障点的经纬度坐标进行了修正, 提高了测量值的有效位数.

从实验结果来看, 该方法提高了故障定位的准确性, 维修人员收到无人机传回的故障经纬度信息, 可依靠随身携带的手机和定位软件找到故障点, 有利于减少巡线工作量、加快故障修复速度、保障电力系统的安全运行. 同时, 对于准确定位技术的研究, 也为后续通过红外和紫外成像设备拍摄获取高质量图像, 并进行故障识别奠定了基础.

参考文献:

- [1] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 133.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. System Protection and Control, 2012, 40(5): 133.
- [2] 王宾, 董新洲, 薄志谦. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 25.
WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian. An impedance fault location algorithm for UHV long transmission lines with single-line-to-ground faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 25.
- [3] 覃剑, 葛维春, 邱金辉. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92.
- [4] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260.
ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260.
- [5] 马杰, 李磊, 李乃永, 等. 基于故障信息的高阻接地故障辨识与定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 74.
MA Jie, LI Lei, LI Naiyong, et al. Identification and location of high-resistance grounding fault based on fault records[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 74.

- [6] 王守鹏,赵冬梅,商立群,等.基于线路分段参数的非全程同塔双回线故障定位算法[J].电工技术学报,2017,32(20):261.
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei, SHANG Liqun, *et al.* Fault location algorithm for incomplete double-circuit transmission lines based on line segment parameters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20):261.
- [7] 唐泽亮,吴永明.无人机电力巡检中定位绝缘子方法[J].机电工程技术,2017,46(8):172.
TANG Zeliang, WU Yongming. A method for positioning insulators in power inspection of UAV [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(8):172.
- [8] 王黎明,于德明,陈方东,等.巡线直升机对500 kV交流输电线路电场影响的仿真[J].高电压技术,2013,39(1):201.
WANG Liming, YU Deming, CHEN Fangdong, *et al.* Simulation of effect on 500 kV AC transmission line electric field of patrol helicopters [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 201.
- [9] 胡志坚,李洪江,文习山,等.基于差分GPS的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J].电力自动化设备,2012,32(3):120.
HU Zhijian, LI Hongjiang, WEN Xishan, *et al.* Online monitoring of transmission conductor wave and wind gallop based on differential GPS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 120.
- [10] 金立军,胡娟,闫书佳,等.基于图像的高压输电线间隔棒故障诊断方法[J].高电压技术,2013,39(5):1040.
JIN Lijun, HU Juan, YAN Shujia, *et al.* Method of spacer fault diagnose on transmission line based on image processing [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1040.
- [11] 杨信廷,孙文娟,李明,等.基于K均值聚类和开闭交替滤波的黄瓜叶片水滴荧光图像分割[J].农业工程学报,2016,32(17):136.
YANG Xinting, SUN Wenjuan, LI Ming, *et al.* Water droplets fluorescence image segmentation of cucumber leaves based on K-means clustering with opening and closing alternately filtering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 136.
- [12] 邓仕超,黄寅.二值图像膨胀腐蚀的快速算法[J].计算机工程与应用,2017,53(5):207.
DENG Shichao, HUANG Yin. Fast algorithm of dilation and erosion for binary image [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(5): 207.

(上接第1682页)

- [15] NASSAR K. Application of data-mining to state transportation agencies projects databases[J]. ITcon, 2007, 12: 139.
- [16] KODURU H, XIAO F, AMIRKHANIAN S, *et al.* Using fuzzy logic and expert system approaches in evaluating flexible pavement distress: case study[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(2): 149.
- [17] DAI X, XING L, ZHANG B. Research on intelligence decision-making analysis and optimization design development of pavement management system [C] // ICAIC 2011: Applied Informatics and Communication. Berlin: Springer, 2011: 682-690.
- [18] Sarasua W A, JIA X. Framework for integrating GIS-T with KBES: a pavement management system example [J]. Transportation Research Record, 1995: 153.
- [19] SOIBELMAN L, KIM H. Data preparation process for construction knowledge generation through knowledge discovery in databases [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(1):39.
- [20] 唐龙.民用机场水泥道面维修计划辅助决策模型[D].上海:同济大学,2016.
TANG Long. An Assistant decision-making model for civil airfield concrete pavement maintenance [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [21] 邹伟.数据挖掘技术综述[J].信息通信,2016,12(8):164.
ZOU Yi. Overview of data mining technology [J]. Information & Communications, 2016, 12(8): 164.
- [22] 王光宏,蒋平.数据挖掘综述[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(2):246.
WANG Guanghong, JIANG Ping. Survey of data mining [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(2): 246.
- [23] 邵峰晶.数据挖掘原理与算法[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
SHAO Fengjing. Data mining principles and algorithms [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015.
- [24] 中国民用航空局.民用机场道面评价管理技术规范:MH/T5024—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.
CAAC. Technical specifications of aerodrome pavement evaluation and management: MH/T5024—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.