

基于无人机图像的输电线断股与异物缺陷检测方法

王万国^{1,2}, 张晶晶^{1,2}, 韩军^{3*}, 刘 浪^{1,2}, 朱铭武³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院 国家电网公司电力机器人技术实验室, 济南 250002;

2. 山东鲁能智能技术有限公司, 济南 250101; 3. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

(* 通信作者电子邮箱 2254285987@qq.com)

摘 要:为提高无人机(UAV)巡检输电线路的效率,提出一种基于线结构感知的输电线断股与异物缺陷的检测方法。由于无人机巡检的图像受背景纹理及光线影响较大,采用能检测线宽度的水平与垂直方向的梯度算子提取巡检图像上的线对象,进而研究感知定律中的共线性、近似性、连续性的计算,将断续线段连接成长的线段,通过长线段的平行性计算,识别出输电线路结构中显著的平行导线组。为识别导线上安装的防振锤与间隔棒连接部件,提出一种基于局部轮廓特征的形状部件识别方法。在识别出这些连接部件的基础上,对导线进行分段分析,计算分段导线的宽度变化、灰度相似度来检测导线上的断股与异物缺陷。通过对无人机巡检采集的输电线路图像的测试,验证了这种方法在复杂的背景条件下能有效地检测导线上的断股与附着异物缺陷。

关键词:导线断股;导线附着异物;感知平行性;局部轮廓特征;缺陷检测

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A

Broken strand and foreign body fault detection method for power transmission line based on unmanned aerial vehicle image

WANG Wanguo^{1,2}, ZHANG Jingjing^{1,2}, HAN Jun^{3*}, LIU Liang^{1,2}, ZHU Mingwu³

(1. Electric Power Robotics Laboratory of State Grid Corporation of China, Shandong Electric Power Research Institute, Jinan Shandong 250002, China;

2. Shandong Luneng Intelligence Technology Company Limited, Jinan Shandong 250101, China;

3. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of power transmission line inspection by Unmanned Aerial Vehicle (UAV), a new method was proposed for detecting broken transmission lines and defects of foreign body based on the perception of line structure. The transmission line image acquired by UAV was easily influenced by the background texture and light, the gradient operators of horizontal and vertical direction which can be used to detect the line width were used to extract line objects in the inspection image. The study on calculation of gestalt perception of similarity, continuity and colinearity connected the intermittent wires into continuous wires. Then the parallel wire groups were further determined through the calculation of parallel relationship between wires. In order to reduce the detection error rate, spacers and stockbridge dampers of wires were recognized based on a local contour feature. Finally, the width change and gray similarity of segmented conductor wire were calculated to detect the broken part of wire and foreign object defect. The experimental results show that the proposed method can detect broken wire strand and foreign object defect efficiently under complicated backgrounds from the transmission line of UAV images.

Key words: broken conductor strand; wire attached foreign body; perception of parallelism; local contour feature; defect detection

0 引言

为了有效提高对输电线路运行维护的效率,当前国家电网正在开展无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)对高压输电线路巡检。由于无人机巡检采集了大量的输电线路图像,有必要研究智能的分析技术来自动检测输电线路上的缺陷。输电线路的断股与附着异物是对输电线路危害较大的两种缺陷,应及早发现、及早排除。

无人机是在输电线路通道的一侧、从上向下对输电线路进行拍摄,受光线及地面各种背景纹理影响较大,从输电线路组成结构上看:导线具有显著的线结构特征,输电线路通常是由4条下垂弧度的近似平行导线组成,在4条导线上安装有间隔棒(防止其相互碰撞)和防振垂(防止其舞动)。导线的断股表现为两种方式:毛刺、多股导线向下散开断股。导线上的毛刺破坏了导线的平滑性与一致性;断股使得一股向下散开的导线与电力线方向不一致,在紧邻电力线下方出现与电

收稿日期:2015-03-12;修回日期:2015-05-08。 基金项目:2014年国家电网发展项目(169)。

作者简介:王万国(1984-),男,山东聊城人,中级工程师,硕士,主要研究方向:基于数字图像的变电站和输电线路设备识别、目标跟踪、图像去雾; 张晶晶(1984-),男,浙江金华人,中级工程师,硕士,主要研究方向:图像处理、人工智能、无人机巡检; 韩军(1965-),男,河南三门峡人,高级工程师,博士,主要研究方向:图像处理、视频修复; 刘浪(1984-),男,山东济南人,工程师,硕士,主要研究方向:无人机巡检、计算机软件; 朱铭武(1988-),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理。

力线方向不一致的线性特征对象,该线特征对象宽度小于电力线的宽度,长度有限,不超过图像中电力线长度的二分之一。导线上的异物表现为:不同形状、颜色的物体(如塑料袋、风筝等)依附在导线上。导线上异物出现会使得电力线宽度突然增大。

现有的对输电线路导线的识别方法考虑降低背景对导线目标的影响,如:文献[1]对巡检图像进行全变分模型去噪,利用模拟退火算法进行图像分割,并用改进的 Freeman 链码提取导线目标;文献[2]采用 Radon 变换、线段聚类、卡尔曼滤波器实现对电力线自动检测。但这两种方法计算量较大,没有考虑到导线结构对提取导线的影响。对导线缺陷诊断方法通过测量导线宽度变化来检测断股及异物附着^[3],但这种方法没有考虑到导线上安装的部件会造成对缺陷诊断的误判。文献[4]研究导线轮廓的变化来诊断导线断股缺陷并统计导线亮度变化来诊断导线电弧损伤,文献[5]采用小波基与神经网络的方法对导线断股缺陷进行诊断。文献[4-5]这两种方法适合近距离拍摄的导线图像,没有考虑到巡检图像背景噪声的干扰。

基于上述对输电线路导线识别与缺陷诊断的分析,一方面无人机巡检图像背景纹理会出现较多类似线特征的区域,易造成误识别导线;另一方面是没有建立识别输电线路导线结构的约束机制。为提高对导线上缺陷检测的可靠性,文本研究了一种对输电线路导线结构感知的分析方法,通过导线的平行特征来识别导线并识别出导线上安装的连接部件,进而可靠地检测导线上断股与附着异物缺陷。

1 输电线路导线的识别方法

本文提出一种基于输电线路结构感知的导线断股与异物缺陷的检测方法,具体流程如图1所示。

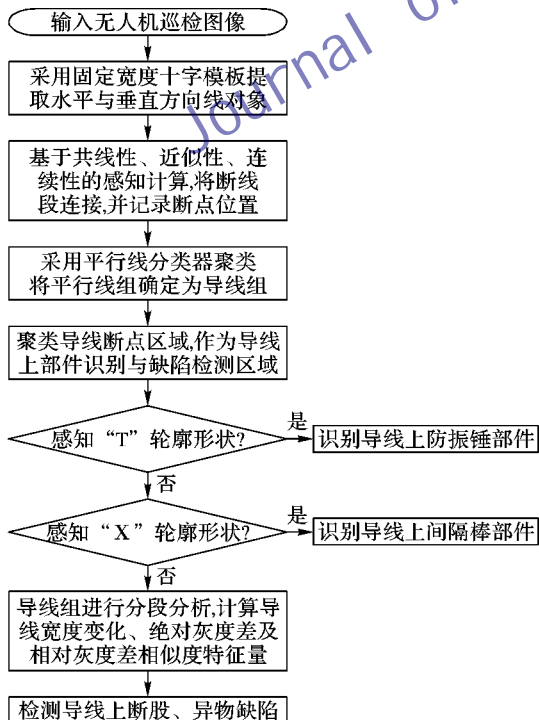


图1 导线断股与异物缺陷检测方法

由于复杂的背景纹理干扰,从巡检图像上提取到的导线是断续、不平滑的线段,为此研究了基于 Gestalt 感知理论中

线段之间近似性、连续性、共线性的量化计算^[6]方法,将断续的导线连接成长的导线,分析显著的长线段之间的平行性,进而识别出平行的导线组。由于导线上安装有间隔棒与防振锤形状部件,在检测导线上断股与附着异物缺陷时,会造成误检测,为了提高对导线上断股与附着异物缺陷检测的可靠性,进一步研究了一种基于局部轮廓特征的形状对象的识别方法,用于确定间隔棒与防振锤形状部件在导线上的位置。在识别出平行导线及导线安装的间隔棒与防振锤位置的基础上,对导线进行分段特征量分析,主要研究导线宽度变化、灰度相似度特征量来检测导线断股与附着异物的缺陷。

首先采用对导线宽度敏感的梯度算子,即采用可变宽度的十字梯度模板^[3]来提取输电线路的导线,将模板分解成水平和垂直方向:垂直方向模板读入垂直方向对应的图像亮度值,用于检测水平方向的线特征对象;水平方向模板读入水平方向对应的亮度值,用于检测垂直方向的线特征对象。十字模板可以检测所有斜率的线段。大小为 $size$ 的模板能检测到的线段的最大宽度为 $(size - 1)/2$ 。将获取的所有线段用 Blob 连通区域管理,便于对线段作进一步的分析。

1.1 识别平行导线

输电线路导线具有显著的长的平行线特征,从 Gestalt 感知理论着手,提取输电线路显著的线结构特征。Gestalt 感知理论在对轮廓分析中起到重要作用^[7-8],在图像识别方法中,可能用到多个不同的 Gestalt 感知定律,每个感知定律的量化计算方法不同及与其他感知定律的关系的不同,识别结果不同。本文主要考虑 Gestalt 感知理论中近似性、连续性、共线性、平行性的量化计算,对两相邻线段同时进行近似性、连续性、共线性约束,将断续线段合并为长的线段,进而再分析长线段之间的平行性。考虑到野外巡检图像中提取线段的不规则性,采用将提取的线段划分为小线段,由线段两端小线段计算出的方向角度及中心点位置来进行 Gestalt 感知定律的量化计算,适合野外提取的对象轮廓分析。具体量化计算方法如下:

如图2所示,线段之间的近似性描述为两线段之间的距离小于较短线段的长度。如线段1的长度为 L_1 , 线段2的长度为 L_2 , 线段1与线段2之间的距离为 L , 如满足条件(1), 则符合近似性。

$$L \leq 2 \times \min(L_1, L_2) \quad (1)$$

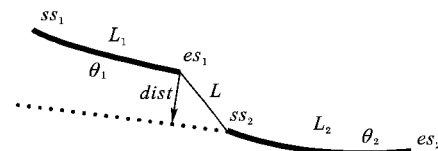


图2 Gestalt 感知定律计算描述

线段之间的连续性描述为两线段端点之间角度的变化小于一阈值,如线段1的方向角度为 θ_1 , 线段2的方向角度为 θ_2 , 如满足条件(2), 则符合连续性。

$$\text{abs}(\theta_1 - \theta_2) \leq T_\theta \quad (2)$$

考虑到近似直线线段之间的连续性,阈值 T_θ 取值为 4° 。线段之间的共线性描述为两线段是否存在并列线段的关系。采用线段端点到另一线段之间的垂直距离来描述共线性。其计算公式如式(3):

$$\text{dist} = \frac{\text{abs}(ss_2 \times L_1_endx - L_2_endy + sl_2)}{\sqrt{ss_2^2 + 1}} \quad (3)$$

其中: $dist$ 是一条线段的端点到另一条线段垂直距离; ss_2, sl_2 是线段 2 开始端点的斜率和截距; L_1_endx, L_2_endy 是线段 L_1 结束端点坐标位置。考虑斜率与截距计算的误差, 采用线段端点计算线段之间共线性, 如满足条件(4)作为共线性判决。

$$dist \leq \max(lw_1, lw_2) \quad (4)$$

其中: lw_1, lw_2 为线段 L_1 与线段 L_2 的宽度。线段的宽度 lw_1, lw_2 在提取线段时获得。

在提取线段的二值图上, 搜索两两线段, 将符合近似性公式(1)、连续性公式(2)、共线性公式(4)的线段连接, 最后将合并后的线段依据长度排列, 保留较长线段, 进一步分析显著的长线段之间的平行性。如图 3 所示, 设计了一个三级嵌套的线段之间平行特征分类器: 首先采用距离特征分类器, 依据线段之间的距离分类线段组; 对每一距离特征线段组使用角度特征分类器, 获得线段的角度分类线段组; 再对每一角度特征线段组使用距离特征分类器, 输出符合一定距离与角度关系的线段组, 作为平行线段的输出。

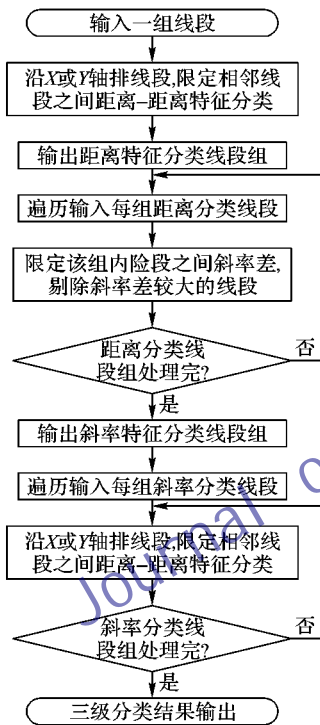


图3 设计的三级平行线段分类器

1.2 聚类导线断点的区域

在采用对导线宽度敏感的梯度算法提取导线轮廓时, 受导线上安装的连接部件(防振锤、间隔棒)、背景纹理干扰以及导线的断股或附着异物的影响造成了提取的导线断续。考虑导线结构上下的连接关系, 将导线上的断点位置聚类, 作进一步分析来识别出导线上安装的防振锤、间隔棒形状部件。在将断续的线段连接为长的线段时, 记录下断点的坐标位置。当识别出长的平行导线组后, 再检索出长的平行导线上断点位置, 基于平行导线之间最大宽度, 聚类出断点区域。在导线上小区域内识别连接的防振锤、间隔棒形状部件。

1.3 导线上连接部件的识别

导线上防振锤、间隔棒形状部件受拍摄角度影响, 存在与导线相连和遮挡情况, 通过边缘提取获取不到其完整的形状轮廓, 因此研究一种基于局部轮廓特征的形状对象识别方法。文献[9]提出了一种 k 个相连的近似轮廓直线段(kAS)所形

成的尺度不变的局部形状特征用于对象类的检测方法, 但没有考虑到对象轮廓线段间角度关系, 在对 kAS 检测时需要一定量的样本图像训练, 而且在进行 kAS 搜索和匹配时计算量较大。

本文通过对识别对象的先验知识的分析, 以两相邻线段(2AS)或三相邻线段(3AS)作为识别形状部件的局部轮廓特征, 通过线段之间所成的角度关系和相对尺度大小定义2AS的语义模型, 事先将形状对象的整体模板轮廓进行分解, 统计形状对象所有可能的2AS或3AS的局部轮廓特征, 基于所定义的语义模型, 实现形状对象局部轮廓特征的检测, 最后将所检测的局部轮廓特征聚类实现形状部件的识别。

对2AS的语义模型描述如图4所示, 对两条相邻的近似直线段, 以两条线段的交点为起始点, 计算每条线段的向量, 即图4中向量 $BA = r_1(x_1, y_1)$ 和 $BC = r_2(x_2, y_2)$, 求出两向量所成的角 α , 对线段的排序选择长度最长的线段为第一条线段, 并将此长度作为线段尺度大小的归一化因子。因此对2AS语义模型的定义如式(5)所示:

$$(r_1/L, r_2/L, \alpha, 1, L_2/L_1) \quad (5)$$

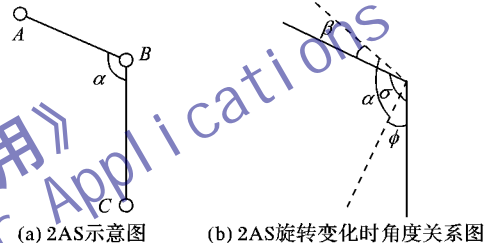


图4 2AS线段关系图

在进行两个2AS局部轮廓特征(记为 a 和 b) 间的匹配时, 从下面三个方面进行比较。

1) a 和 b 的相邻线段之间夹角大小的差值, 应满足条件(6)。

$$\text{abs}(\alpha^a - \alpha^b) \leq \theta_{thr} \quad (6)$$

2) a 和 b 线段长度大小的比较应满足条件(7)。

$$L_{thr1} \leq \left(\frac{L_2^a}{L_1^a} \times \frac{L_1^b}{L_2^b} \right) \leq L_{thr2} \quad (7)$$

3) 对应线段向量所成的夹角(即图4(b)中 α 和 φ 的关系)应该满足式(8)。

$$\text{abs} \left(\arccos \left(\frac{r_1^a \cdot r_1^b}{|r_1^a| \cdot |r_1^b|} \right) - \arccos \left(\frac{r_2^a \cdot r_2^b}{|r_2^a| \cdot |r_2^b|} \right) \right) \leq \theta_{thr} \quad (8)$$

式(6)描述的是局部轮廓线段之间空间结构的关系; 式(7)描述的是轮廓线段之间的尺度大小的关系; 式(8)是描述轮廓线段位置关系的变化。因此通过相邻线段之间的空间结构、尺度大小、位置变化的比较可以实现2AS线段的检测。

在识别特定的形状对象时, 采用本文描述的局部轮廓特征识别方法不需要对识别的形状对象进行大量的训练, 仅需要对识别的形状对象进行先验局部轮廓几何特征进行度量分析, 式(6)~(8)中的阈值依据先验的形状特征获取, 而阈值的变化范围依据对形状对象拍摄的角度范围确定。在检测出2AS或3AS局部轮廓特征后, 将所检测到的局部轮廓特征进行聚类和编码, 因为同一对象的局部轮廓在距离上有一定的约束关系。通过计算2AS或3AS的重心点之间的距离来判断断2AS或3AS相邻关系实现聚类, 由检测出的2AS或3AS

特征组聚类的结果来识别是否存在形状对象。

图5和图6是识别导线上可能存在的间隔棒和防振锤形状部件轮廓的可能分解编码。事先对间隔棒和防振锤这两种形状部件可能出现的2AS或3AS局部轮廓进行分解,建立这些形状部件的局部轮廓特征的编码。图5(b)是对防振锤样本轮廓分解得到的2AS和3AS样本进行编码命名,图5(c)是识别防振锤的局部轮廓特征所有可能组合;通过建立的局部轮廓组合对聚类区域内的2AS和3AS遍历,进而实现图5(a)中防振锤的识别。对于间隔棒形状部件的识别,图6(b)是对间隔棒样本轮廓分解得到的2AS和3AS进行编码标号;图6(c)是建立识别间隔棒防振锤的局部轮廓所有可能组合;通过对间隔棒局部轮廓的组合进行判决能够识别图6(a)中所有的间隔棒。

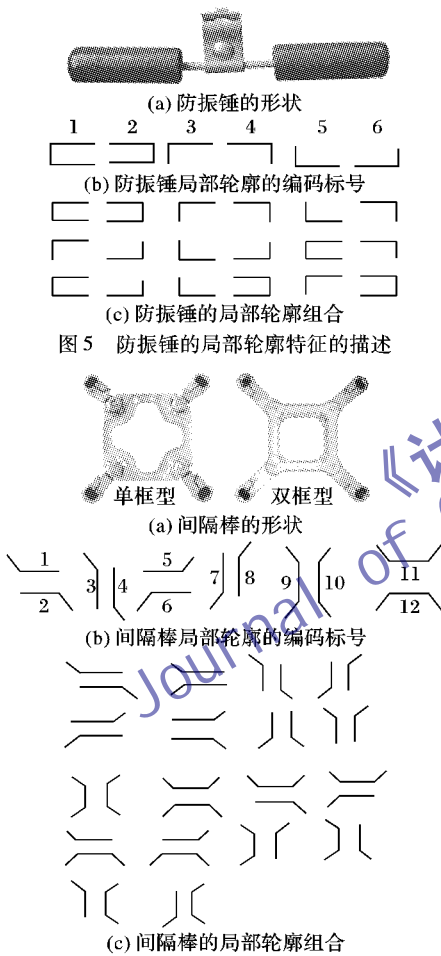


图5 防振锤的局部轮廓特征的描述

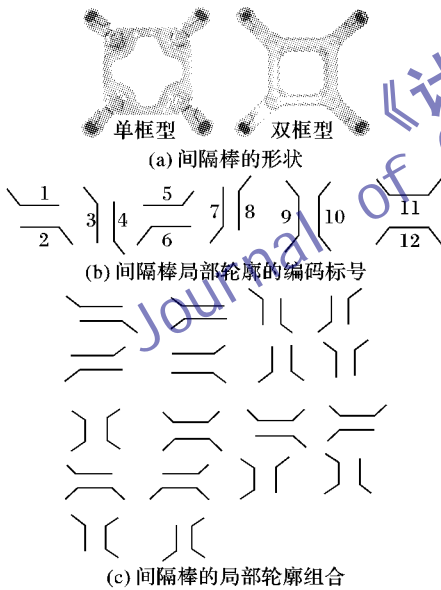


图6 间隔棒的局部轮廓特征的描述

2 导线上断股与异物缺陷的检测方法

在识别出输电线路平行导线同时排除导线上安装的形状部件条件下,将平行导线分段来检测导线可能存在的断股或附着异物缺陷。输电线路上的导线是由金属的材质构成,表面平整光滑,如导线存在断股或异物,会破坏其表面的平滑性与一致性,因此可通过分析导线表面灰度图像的光滑性与一致性来检测断股或异物缺陷。

其具体过程如下:

1) 将识别出的导线组划分为固定长度的小线段,当平行导线方向角度在 $-60^\circ \sim 60^\circ$,沿着水平方向划分线段;当平行导线方向角度小于 -60° 或大于 60° 沿着垂直方向划分线段。

2) 分析每一分段中线段的宽度变化,采用抽样方法,计算抽样点之间的宽度变化,进而计算出宽度变化的长度,尽量排除背景纹理的影响,导线宽度突变说明可能存在断股或附着异物缺陷。

3) 计算每一分段中线段的灰度均值,如平行导线组划分为 M 段,将分段内像素灰度均值表示为: G_1, G_2, \dots, G_M , 如下分别计算绝对灰度差距离 D_a 和 相邻分段灰度差距离 D_r , 其中 G_v 是导线平行组内像素灰度均值。

$$\begin{cases} D_a(G_i, G_v) = \text{abs}(G_i - G_v) \\ D_r(G_i, G_{i-1}) = \text{abs}(G_i - G_{i-1}) \end{cases} \quad (9)$$

按式(10)计算计算每条平行导线内各分段绝对灰度差距离比例 R_a 和 相邻分段灰度差距离比例 R_r :

$$\begin{cases} (R_a = D_a/G_v) > Thr \\ (R_r = D_r/G_v) > Thr \end{cases} \quad (10)$$

如一分段的 R_a 值较高说明该分段内灰度值相对导线平均灰度值变化较大,而 R_r 值较高说明该分段内灰度值与相邻段灰度值差的变化较大, R_a 和 R_r 值较小说明该分段灰度值与其他分段灰度值变化较小;设定阈值 Thr 用于描述导线上灰度值突变的分段,取值范围为 $0 \sim 1$ 。如分段 R_a 和 R_r 值大于阈值 Thr , 则该分段存在灰度值突变的分段,进而判决导线上可能存在断股或异物附着缺陷。

3 实验验证与结果分析

以无人机巡检采集的实际巡检图像为准,测试了本文方法的有效性。

图7是巡检采集的有缺陷的巡检图像,其中:图(a)是存在异物的巡检图像;图(b)是存在断股的巡检图像(放大)。图像是分辨率为 5182×3456 像素的彩色图像,采用17像素宽的十字模板提取不同方向的线段。

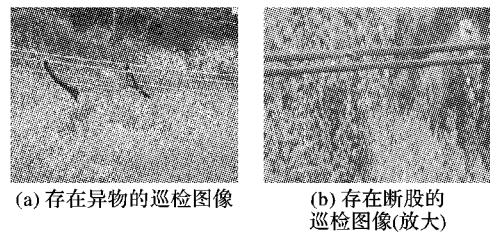


图7 巡检采集的有缺陷的图像

图8是采用本文提出的感知导线结构聚类出平行线组,其中:图(a)是针对图7(a)识别出的平行线组;图8(b)是针对图7(b)识别出的平行线组。

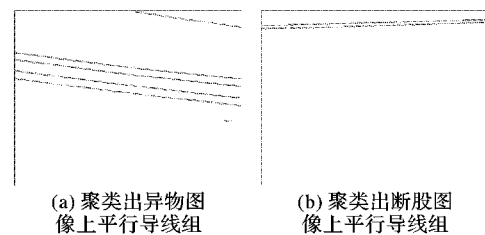


图8 识别出的平行线组

图9是将识别的导线分段,采用绝对灰度差距离比例 R_a 和 相邻分段灰度差距离比例 R_r 检测分段导线上存在的突变区域的结果。对图8(a)平行线组划分为32段,如图10所示曲线是计算每分段的绝对灰度差值与相邻灰度差值分布,计算每条平行导线内各分段绝对灰度差距离比例 R_a 和 相邻分段灰度差

距离比例 R_r 均大于阈值 0.2 的分段,在图 9(a)标注异物的灰度相似度突变区域,绝对灰度差距离在第 7、8、19 段存在突变区域,相对灰度差距离在第 7、8、9、19、20 存在突变区域,融合绝对灰度差距离和相邻分段灰度差距离,判断在第 7、8、19 段可能存在缺陷;同理,对图 8(b)平行线组划分为 31 段,绝对灰度差距离和相邻分段灰度差距离均是在第 25 段存在突变区域,判断在第 25 段可能存在缺陷。采用分段的绝对灰度差值与相邻灰度差值对抑制背景纹理噪声有一定的作用。

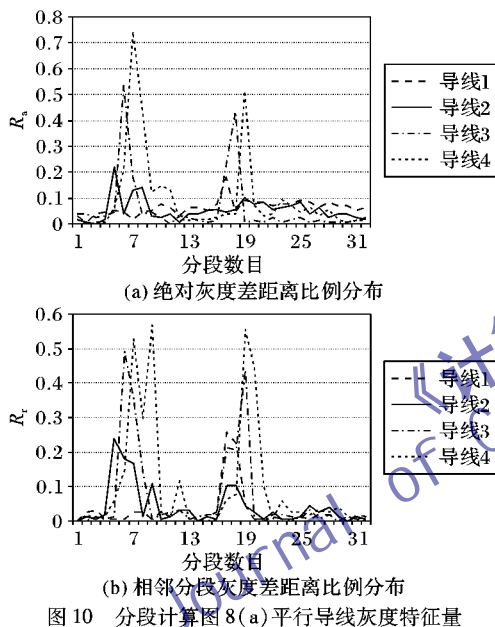
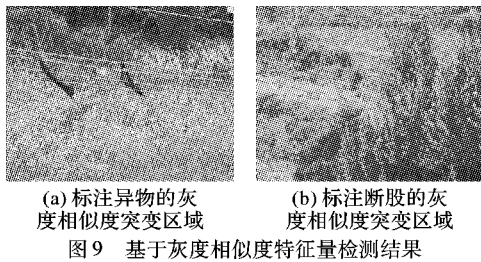
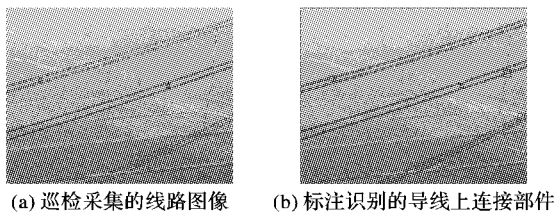


图 11 是识别导线上的连接部件,其中:图(a)是巡检采集的线路图像,图(b)是标注识别的导线上的连接部件。



从图 11(a)识别出的三组平行导线上标注的断点区域进行形状部件分析,对间隔棒结构轮廓边缘线段所成的角大约为 135° ,在测试中,式(6)和(8) θ_{thr} 的值设定为 25° ,式(7)的 L_{thr1} 和 L_{thr2} 的值分别为 0.45 和 2.5。能检测出符合图 6(b)定义的局部轮廓编码标号 9 和 10,确定在这两组平行导线上存在间隔棒部件。进一步采用分段的绝对灰度差距离比例和相邻分段灰度差距离比例检测到三处可能存在断股和异物的区域,其中两处可疑缺陷区域与识别出的间隔棒形状部件区域重叠,可以排除此处的缺陷区域。另外一处可疑缺陷区域通过分析垂直方向的线段,发现有上下线段贯通这个可

疑的缺陷区域,与导线在断股时,一股导线可能向下散落特征不符,可疑排除此处的可疑缺陷区域。

本文研究的断股与附着异物缺陷检测方法能有效排除导线上安装的连接部件的影响,提出的灰度相似度检测方法能有效抑制背景与光线的影响,提高导线上缺陷检测的可靠性。

4 结语

本文研究了一种基于线结构感知的输电线断股与异物缺陷的检测方法。考虑到无人机巡检图像受背景纹理与光线影响较大,研究了一种适合野外线状对象的 Gestalt 感知定律的近似性、连续性、共线性的量化计算,将断续的线段连接成长的线段,进而感知近似平行的导线量化计算,聚类出平行导线组;由于提取导线的断点区域可能包含着导线上安装的间隔棒、防振锤形状部件,在断点聚类的区域内,研究了一种基于局部轮廓特征的形状对象识别方法,排除安装的部件对导线上缺陷检测的影响;为检测导线上断股与异物缺陷,对识别出的平行导线进行分段分析,计算导线上绝对灰度差距离比例、相邻分段灰度差距离比例,基于检测出突变区域来分析导线上是否存在断股或附着异物缺陷。通过无人机采集的输电线路图像验证了该方法能有效提高对导线缺陷检测的可靠性,降低误检率。下一步拟打算收集大量巡检缺陷图像进行验证,使该方法能有效应用于无人机巡检中。

参考文献

- [1] SUN F, YANG Z, LI Y, et al. Methods of transmission line target recognition [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(3): 349-356. (孙凤杰,杨镇溧,李媛媛,等.输电导线图像目标识别方法[J].中国图象图形学报,2012,17(3):349-356.)
- [2] YAN G, LI C, ZHOU G, et al. Automatic extraction of power lines from aerial images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(3): 387-391.
- [3] WANG Y, HAN J, CHEN F, et al. Automatic detection method of defects of power line in visual image [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(12): 180-184. (王亚萍,韩军,陈昉明,等.可见光图像中的高压线缺陷自动诊断方法[J].计算机工程与应用,2011,47(12):180-184.)
- [4] ISHINO R, TSUTSUMI F. Detection system of damaged cables using video obtained from an aerial inspection of transmission lines [C]// Proceedings of the 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Piscataway: IEEE, 2004, 2: 1857-1862.
- [5] WU G, XIAO X, SHEN R. Damaged detection and fault diagnosis for high-voltage transmission line [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10): 1204-1208. (吴功平,肖晓晖,申瑞刚.高压输电导线的损伤检测与故障诊断[J].仪器仪表学报,2006,27(10):1204-1208.)
- [6] SHAO X, YE L, LIU C, et al. Survey of research work on contour grouping [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(6): 909-918. (邵晓芳,叶灵伟,刘朝军,等.轮廓组织研究进展[J].中国图象图形学报,2011,16(6):909-918)
- [7] IQBAL Q, AGGARWAL J K. Retrieval by classification of images containing large manmade objects using perceptual grouping [J]. Pattern Recognition, 2002, 35(7): 1463-1479.
- [8] ELDER J H, GOLDBERG R M. Ecological statistics of Gestalt laws for the perceptual organization of contours [J]. Journal of Vision, 2002, 2(4): 324-353.
- [9] FERRARI V, FEVRIER L, JURIE F, et al. Groups of adjacent contour segments for object detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(1): 36-51.