



复杂地物背景下的电力线识别算法

骆顾平, 陈静, 苏成悦, 刘信宏, 徐胜, 王泰圣

引用本文:

骆顾平, 陈静, 苏成悦, 等. 复杂地物背景下的电力线识别算法[J]. 应用科技, 2021, 48(5): 23–28,34.

LUO Guping, CHEN Jing, SU Chengyue, et al. A power line recognition algorithm under the background of complex ground objects[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 23–28,34.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202103008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种多信息级联聚类输电线检测方法

A cascade clustering transmission line detection method based on multi-information
应用科技. 2020, 47(5): 86–93 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202002010>

一种改进SSD的输电线路电力部件识别方法

An improved SSD method for power component identification of transmission lines
应用科技. 2020, 47(4): 75–81 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201912012>

一种复杂环境下的电力线检测方法

A power line detection method in a complex background
应用科技. 2019, 46(5): 51–56 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201901009>

基于LSD与统计分析的航拍图像电力线提取方法

Segmenting power lines on the aerial photos based on line segment detector and statistical analysis
应用科技. 2019, 46(2): 30–34 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201811001>

基于改进SIFT算法的目标识别

Target recognition technology based on improved SIFT algorithm
应用科技. 2018, 45(5): 76–81 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201803010>

基于模糊增强的安全带佩戴识别方法

A method of recognizing seat-belt wearing based on fuzzy enhancement
应用科技. 2015(1): 22–27 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1009-671X.201312001>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11991/ykj.202103008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210825.1911.021.html>

复杂地物背景下的电力线识别算法

骆顾平, 陈静, 苏成悦, 刘信宏, 徐胜, 王泰圣

广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006

摘 要: 为了从复杂无人机航拍图像中快速有效地检测与提取出电力线, 基于电力线特征, 提出一种复杂地物背景下的电力线识别算法。采用改进的 Ratio 算子并结合基于轮廓特征的背景去噪算法完成电力线的边缘检测, 利用基于 Hough 变换的直线动态编组拟合与筛选算法进行边缘提取, 最终识别出完整的电力线。实验结果表明, 所提算法可有效排除噪声干扰, 在多种航拍场景下的识别准确率达 96.37% 以上, 识别精度与时效性比常见的同类算法均有明显的提升, 具有较好的电力巡检应用价值。

关键词: 电力线识别; 复杂地物; 边缘检测与提取; Ratio 算子; 轮廓特征; Hough 变换; 动态编组拟合; 直线筛选

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)05-0023-07

A power line recognition algorithm under the background of complex ground objects

LUO Guping, CHEN Jing, SU Chengyue, LIU Xinhong, XU Sheng, WANG Taisheng

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: In order to detect and extract power lines from complex unmanned aerial vehicle (UAV) aerial images quickly and effectively, in this paper, based on the characteristics of power lines, a power line recognition algorithm in background of complex ground objects is proposed. Firstly, the edge of the power line is detected by an improved Ratio operator combined with a background-denoising algorithm based on contour features, then an algorithm of line dynamic grouping-fitting and screening based on Hough transform is used for edge extraction, and finally the power lines are completely identified. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively eliminate noise interference, and that its recognition accuracy is more than 96.37% in a variety of aerial scenes. Its recognition rate and timeliness are significantly improved in comparison with the common similar algorithms, which makes it has higher application value for the power line inspection.

Keywords: power line recognition; complex ground objects; edge detection and extraction; Ratio operator; contour features; Hough transform; dynamic grouping-fitting; lines screening

在复杂地物背景下的无人机电力线路巡检技术已成为一项亟待研究的问题。从无人机航拍图像中精确检测并有效提取电力线是后续线路故障检测识别的关键性技术^[1-2]。国内外学者针对电力线识别进行了大量的研究, 提出了多种电力线检测与提取算法, 常见的如传统边缘检测算子结合 Hough 变换提取算法^[3]、K-means 直线聚类分析^[4-5]、基于方向的可控滤波^[6-7]、局部直线段检测 (line segment detector, LSD) 算法等^[8-9]。文献 [10]

利用传统 Canny 算子边缘检测, Hough 变换提取直线, 算法模型简单但抗噪性能差, 误检率较高。文献 [11] 调用改进线特征检测阈值的 Ratio 算子获取边缘并滤除背景噪声, 结合改进 Hough 变换和最小二乘法提取直线, 该方法参数选取复杂且无法有效排除类直线物噪声干扰。文献 [12] 利用卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN) 对二值边缘图进行分类, 采用 Hough 变换拟合电力线, 但未能实现人工智能算法对电力线的定位。目前在深度学习框架下对电力线的识别因算法模型较为复杂尚未成功应用, 电力线识别算法主要为边缘检测和边缘提取 2 个步骤^[13]。

针对目前边缘检测算法抗噪性差和边缘提取算法误检率高等问题, 本文提出了复杂地物背景

收稿日期: 2021-03-05. 网络出版日期: 2021-08-26.

基金项目: 广东省科技计划项目 (2017A020208063); 广州市科技计划项目 (201804010384).

作者简介: 骆顾平, 男, 硕士研究生。
苏成悦, 男, 教授, 博士。

通信作者: 苏成悦, E-mail: scy.gdut@163.com.

下的电力线识别算法,该算法通过改进 Ratio 算子进行边缘检测同时基于轮廓特征过滤背景噪声,利用 Hough 变换提取直线,最终通过直线编组拟合筛选算法实现电力线的识别与定位。

1 电力线识别算法

1.1 电力线的特征分析

如图 1 所示,多条电力线的亮度均匀连续且灰度相似,俯看电力线比地面背景亮,金属裸线更亮;电力线接近平行直线且贯穿整张图像,其宽度可预估为 1~5 个像素;地面背景是复杂性的,地物如道路车道线、河流、房屋脊线以及其他人工背景中的类直线物对电力线的提取造成严重的干扰,电力线不易被识别。本文基于电力线特征,设计了一种复杂地物背景下的电力线识别算法,算法总体流程如图 2 所示。



图1 原始电力线航拍图

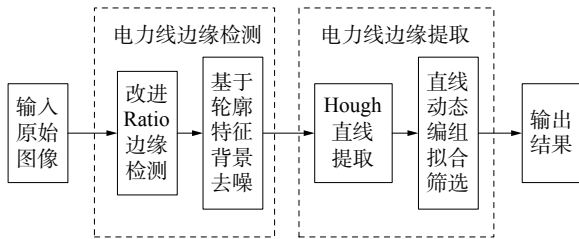


图2 电力线识别算法总体流程

1.2 电力线的边缘检测

1.2.1 改进的 Ratio 边缘检测算子

Ratio 算子是一种利用中间区域和两边邻域灰度平均值的比值关系进行边缘检测的常用方法^[14],可以有效抑制背景的非线状噪声,基于该模型提出的改进 Ratio 算子原理如下。

以电力线方向设定垂直方向 d 的 Ratio 边缘检测算子,算子模板如图 3 所示。

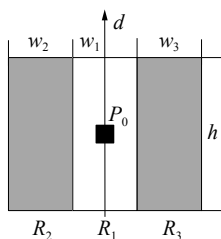


图3 改进的 Ratio 算子模板

以图 1 中某像素点 P_0 为模板中心,构建中间区域 R_1 、左邻域 R_2 和右邻域 R_3 。定义区域 R_i ($i=1,2,3$) 的水平宽度为 w_i ,垂直长度为 h , R_i 包含像素数为 $n_i = w_i \times h$ 。设计算子模板参数为

$$\begin{cases} w_2 = w_3 = w_1/2 + 2 \\ h = w_1/2 + 3 \end{cases}$$

式中依据预估电线像素宽度 W_0 ,取 $w_1 = W_0$ 。 W_0 由成像原理得到:

$$W_0 = \frac{Wf}{H} \times \frac{M}{m} \quad (1)$$

式中: W 为电力线实际外径值, f 为相机焦距,无人机与电力线高度差为 H ,相机传感器感光面尺寸为 $m \times n$,图像分辨率为 $M \times N$ 。根据同一场景中输电线规格的一致性,则面向不同场景需要计算不同的 W_0 值,同一场景的所有图像只需要确定唯一的 W_0 值。

分别统计区域 R_i 内灰度平均值 m_i :

$$m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{p \in R_i} V(p)$$

式中: p 为区域 R_i 内的像素点, p 的灰度值为 $V(p)$ 。基于电力线在背景中更亮的特征,定义改进的 Ratio 算子线形边缘检测特征值为

$$U = \min\left(\frac{m_1}{m_2}, \frac{m_1}{m_3}\right) \quad (2)$$

设定阈值 U_{th} ,当 $U > U_{th}$ 时,则确定 P_0 为目标边缘点。经过大量实验设定阈值 U_{th} 为 1.05,改进的 Ratio 边缘检测算法流程如图 4 所示,其中 (i,j) 为 P_0 的坐标索引,得到二值化的边缘响应图像 $F'(x,y)$ 如图 5 所示。

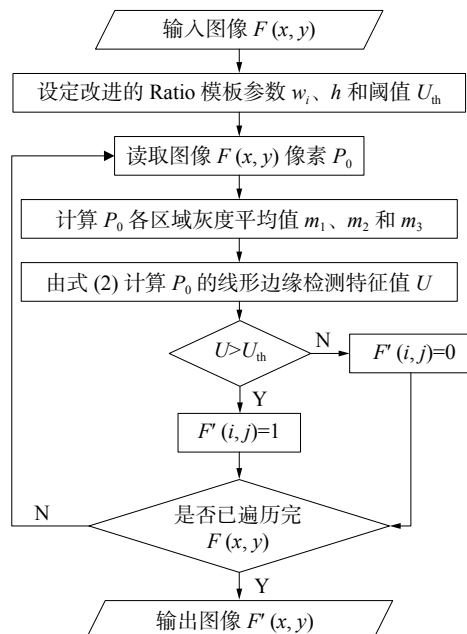


图4 改进 Ratio 边缘检测算法流程

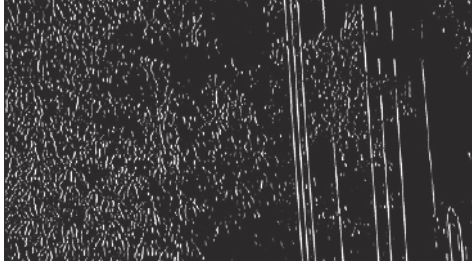


图5 改进 Ratio 边缘检测结果

1.2.2 基于轮廓特征的背景去噪算法

图5中电力线边缘与背景噪声没有相连且是方向一致的大面积连通域;除了线状噪声形成较大面积区域,其他噪声是分散的小面积连通域。故提出基于轮廓特征的背景去噪算法,分别采用轮廓面积 S 和轮廓方向 D 来描述连通域的轮廓特征。轮廓面积定义为连通域内的像素数总和,搜索连通域内欧氏距离最大的两点 P_a 和 P_b ,定义 $\overrightarrow{P_a P_b}$ 为轮廓方向。算法具体步骤为:

1) 遍历边缘响应图 $F'(x,y)$ 置1的全部像素点,保存连通域集合 $Q_\Omega = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}, Q_n\}$ 。

2) 读取 Q_Ω 中 Q 并计算其轮廓面积 S 和方向 D ,分别保存到轮廓面积集合 S_Ω 和方向集合 D_Ω 中。

3) 重复步骤2)直至遍历完 Q_Ω 所有元素,定义一个轮廓特征为 $X = (Q, S, D)$,得到轮廓特征集合 X_Ω 。

4) 提取集合 S_Ω 中最大值 S_{\max} 。遍历 X_Ω 中元素 X ,保存满足 $S > (S_{\max}/3)$ 条件的 X 且定义为标准轮廓特征 $X' = (Q', S', D')$,得到标准轮廓特征集合 X'_Ω 。

5) 提取 X'_Ω 中元素 X ,定义 P_a 到线段 $P'_a P'_b$ 的距离为 r , D 和 D' 的夹角为 α ,定义去噪准则如下所示

$$\begin{cases} \alpha < 3^\circ, & \alpha = \begin{cases} \alpha, & \alpha \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \alpha, & \text{其他} \end{cases} \\ r < 2W_0 \end{cases}$$

遍历 X'_Ω 中元素 X' ,依次求取 α 和 r ,直至满足去噪准则时保留 $F'(x,y)$ 中的连通域 Q ,否则剔除 Q 。

6) 重复步骤5)直至提取完 X_Ω 中所有元素,最后依据 $F'(x,y)$ 中保留的连通域得到去噪处理后的边缘图像 $B(x,y)$,如图6所示,背景噪声基本被滤除,同时保留了电力线上的小面积断裂边缘段。电力线边缘检测结果较为完整,但存在断裂现象且结果中包含了道路车道线等非电力线干扰边缘段。

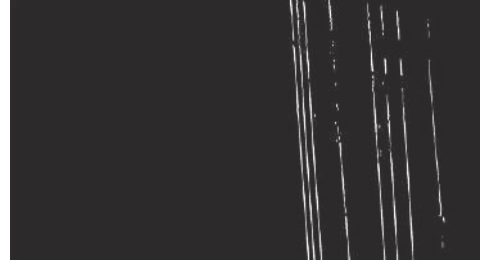


图6 基于轮廓特征的背景去噪算法处理结果

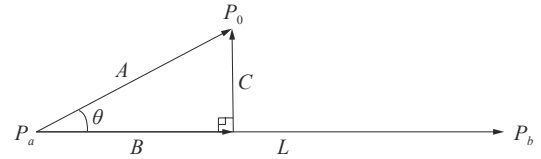
1.3 电力线的边缘提取

1.3.1 Hough 变换提取直线

Hough 变换 (Hough transform, HT) 是图像处理技术中提取线形特征的常用方法,这是基于点-线的对偶性变换,使用表决方式的参数估计技术将图像空间中的检测问题转换到参数空间中进行。依据公式 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 把每一条直线表示为一对参数 (θ, ρ) ,通过在参数空间里进行累加统计并寻找累加器峰值的方法来提取直线^[15]。

1.3.2 直线动态编组拟合与筛选算法

由 HT 获取的直线仍存在断裂与重叠问题,利用直线动态编组拟合与筛选算法完成最终电力线的边缘提取,图7为线段 L 和点 P_0 参数表示图。

图7 线段 L 和点 P_0 参数表示

如图7所示,定义直线段 $L = \overrightarrow{P_a P_b}$, P_a 和 P_b 为 L 的两个端点,定义两条直线夹角 θ 为

$$\theta = \begin{cases} \theta, & \theta \leq 90^\circ \\ 180^\circ - \theta, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

当满足 $\theta < \theta_{th}$ 条件时,则认为该两条直线互相平行。取线段 L' 某端点为 P_0 ,则两条平行线段 L 和 L' 的侧向间隔为

$$G_{\text{diff}} = |C| = \left| A - \frac{(A \cdot L)}{|L|^2} L \right|$$

当 $G_{\text{diff}} < G_{th}$ 时,则认为线段 L 和 L' 来自同一条边缘段并把二者编入同一个直线组,定义组内线段 L 和 L' 的同向间隔 H_{diff} 为

$$H_{\text{diff}} = \begin{cases} \min\{|\overrightarrow{P_a P_0}|, P_0 \in L'\}, & k \leq 0 \\ \min\{|\overrightarrow{P_b P_0}|, P_0 \in L'\}, & k \geq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中 $k = |B||L|^{-1}$ 。当 $H_{\text{diff}} < H_{th}$ 时,拟合 L 和 L' 为线段 L_{mid} 。 L_{mid} 的拟合过程原理如图8所示,定义线段 L 两个端点为 a 和 b 、线段 L' 两个端点为 c 和 d ,其中 a' 和 b' 分别为 a 和 b 到 L' 的垂点, c' 和 d' 分

别为 c 和 d 到 L 的垂点, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别为 aa' 、 bb' 、 cc' 、 dd' 的中点, 则在 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ 中搜索欧氏距离最大的两点并连接该两点得到拟合线段 L_{mid} 。

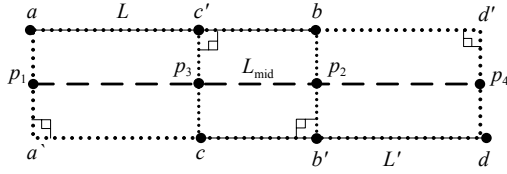


图8 拟合线段 L_{mid} 参数

由拟合连接原理得到直线候选池, 直线数量为 n , 并将其分为多组直线且每组内的直线互相平行, 以组内最长线段方向 D 代表该组的直线方向, 计算公式为

$$Z = \frac{n_D}{n} \sum_{l \in l_\Omega(D)} d(l)$$

式中: $l_\Omega(D)$ 是方向为 D 的直线组; n_D 是 $l_\Omega(D)$ 内的直线段数量; $d(l)$ 为线段 l 的长度。统计所有直线组得到集合 $\{Z_1, Z_2, Z_3, \dots\}$, 则提取该集合最大值对应的方向 D_0 作为电力线的主方向^[16]。从边缘图 $B(x, y)$ 提取与线段 L 重叠的边缘段并计算其在原图 $F(x, y)$ 所处区域的灰度均值为 V ($V \in [0, 255]$), 统计灰度相似的边缘段占比与边缘段区域面积累加的乘积进行排序, 提取最大值对应的灰度均值 V_0 为电力线的标准灰度值。为了过滤直线干扰, 给出直线筛选准则如式 (4) 所示, 其中由式 (3) 计算直线段与 D_0 对应直线的夹角为 θ_0 , 则满足式 (4) 的线段保留, 否则被剔除。

$$\begin{cases} \theta_0 < \theta_{\text{th}} \\ V \in (V_0 - 5, V_0 + 5) \end{cases} \quad (4)$$

由上述直线编组拟合和筛选原理, 设计算法流程如图 9 所示。

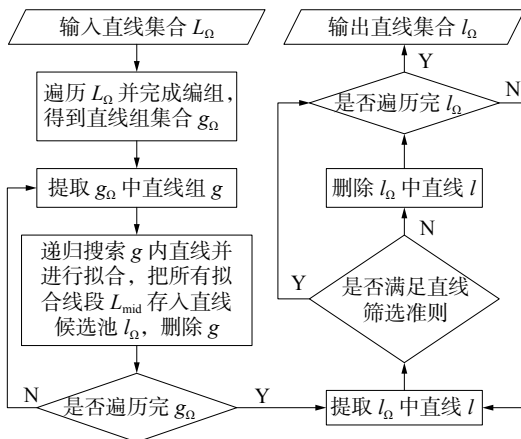


图9 直线动态编组拟合与筛选算法流程

算法的具体步骤如下, 其中 $\theta_{\text{th}} = 3^\circ$; $G_{\text{th}} = 2W_0$; $H_{\text{th}} = 0.25 \times \text{rows}$, rows 为图像总行数。

1) 由 HT 获取直线段集合 $L_\Omega = \{L_1, L_2, \dots, L_{N-1}, L_N\}$ 。

2) 从 L_Ω 中选取最长线段 L_{max} , 遍历 L_Ω 并把与 L_{max} 满足 $\theta < \theta_{\text{th}}$ 且 $G_{\text{diff}} < G_{\text{th}}$ 条件的所有直线段编入直线组 g , 同时删除 L_Ω 中已被编组的直线段, 把 g 存入直线组集合 g_Ω 。

3) 重复步骤 2) 直至 $L_\Omega = \phi$ 。

4) 提取 g_Ω 中元素 g , 在 g 内选取起始线段 L 并搜索其 H_{diff} 值最小的子线段, 当该子线段和 L 满足 $H_{\text{diff}} < H_{\text{th}}$ 时, 拟合二者为线段 L_{mid} 。搜索与 L_{mid} 的 H_{diff} 值最小的其他子线段, 直至所有符合条件的子线段被拟合且同时动态更新合并后的 L_{mid} 参数, 继续选取组内未被拟合的子线段, 直至该组所有子线段拟合完毕。把所有线段 L_{mid} 存入候选池 l_Ω , 删除 g 。

5) 重复步骤 4) 直至 $g_\Omega = \phi$ 。

6) 依据 l_Ω 统计电力线的主方向 D_0 和标准灰度值 V_0 。遍历 l_Ω , 满足筛选准则式 (4) 的直线保留, 否则被剔除。电力线边缘提取结果如图 10 所示, 可见算法有效提取电力线边缘, 解决由 HT 提取直线的断裂与重叠问题, 同时排除了图中的道路车道线等干扰直线。

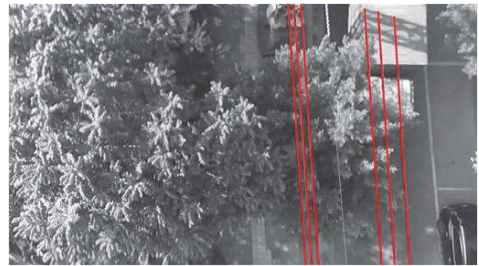


图10 电力线边缘提取在原图中的标记

2 实验结果与分析

实验平台为台式计算机, 处理器为 Inter (R) Core (TM) i7-8700 CPU@3.2 GHz, 内存为 16 GB, 图像分辨率为 1920×1080 。采用平均准确率 (R_p) 和召回率 (R_r) 作为算法的精度评价指标, 利用平均处理时间 (T_c) 评价算法的时效性。其中, $R_p = N_p / N_e$; $R_r = N_p / N_g$; N_p 为正确提取的电力线像素个数; N_e 为提取结果中的所有像素个数; N_g 为原图中的电力线像素个数。

2.1 参数分析

电力线识别算法待确定的参数为改进的 Ratio 模板中间区域宽度 w_1 。为了验证 $w_1 = W_0$ 时电力线边缘检测效果最好, 设计两组实验, 每组实验针对同一张航拍图像并预估其电力线宽度 W_0 , W_0 值可通过式 (1) 计算得到。设置不同 w_1 参数得到边缘检测结果在原图中的标记如图 11 所

示。图 11 中, w_1 取值过大或过小时电力线边缘都出现了更多断裂的情况, 同时产生更多的背景噪声, 如图 11(b)、11(d)、11(g)、11(h) 所示。 $w_1 = W_0$

时检测到电力线的完整性最高且边缘宽度最接近电力线实际宽度, 如图 11(c)、11(f) 所示。故设定 $w_1 = W_0$ 为本文边缘检测算法的模板参数。

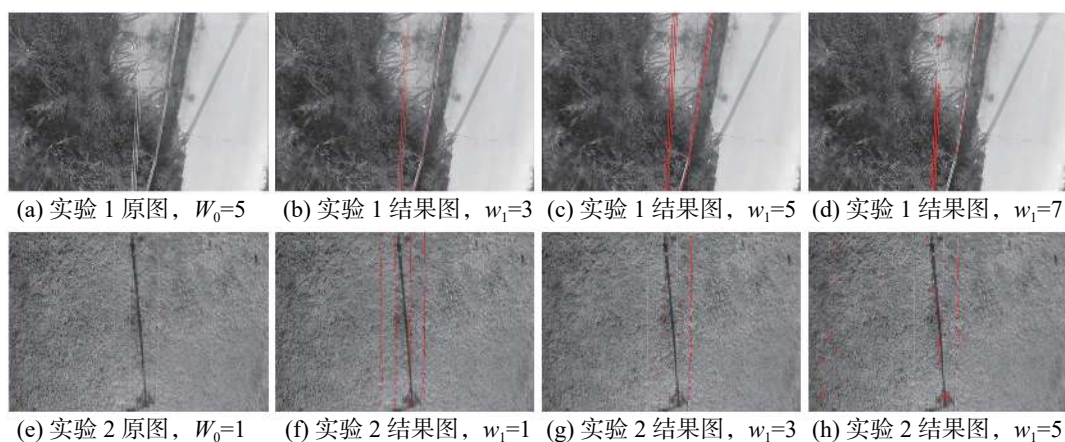


图 11 不同 w_1 参数的边缘检测结果

2.2 对比实验分析

为了验证本文所提算法的可行性, 分别运用本算法、文献 [10-11] 算法对不同场景的复杂地物航拍图进行识别和对比分析, 实验场景如

图 12 所示, 各种算法对比的边缘检测结果和边缘提取结果分别如图 13、14 所示。统计算法的性能指标值如表 1 所示。

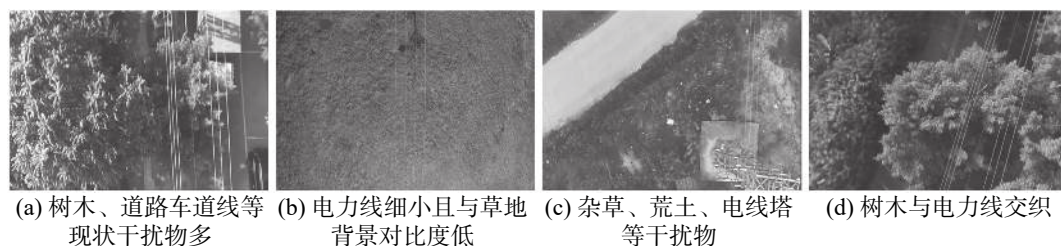


图 12 实验场景原始图

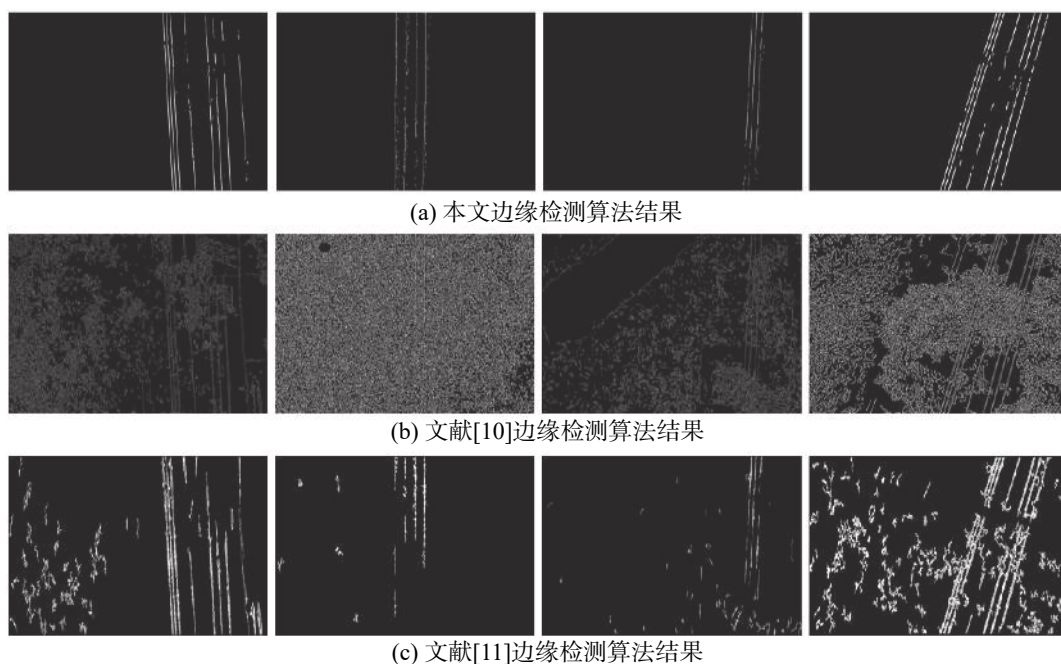


图 13 3 种算法的电力线边缘检测结果

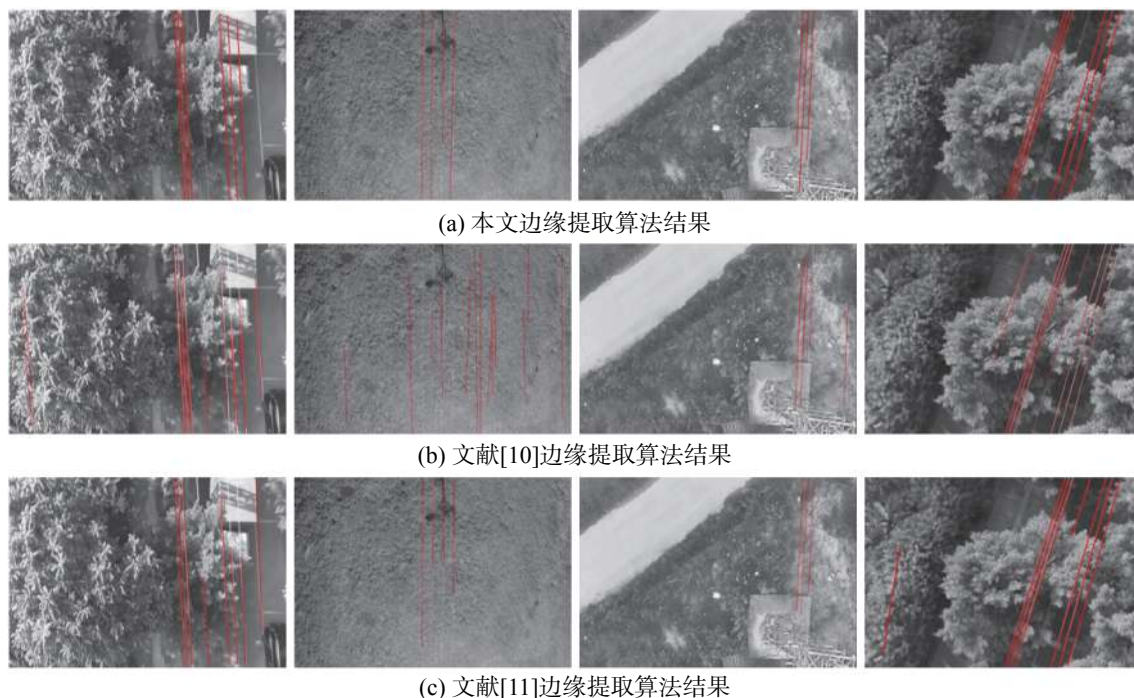


图 14 3 种算法的电力线边缘提取结果在原图中的标记

表 1 3 种算法的性能指标值

算法	$R_p/\%$	$R_f/\%$	t/ms
本文算法	96.37	95.10	42
文献[10]算法	57.98	72.83	81
文献[11]算法	88.83	82.96	65

在图 13 边缘检测结果中,文献 [10] 算法产生大量无效的边缘像素点且对电力线边缘干扰严重;文献 [11] 算法通过设定去噪阈值 N_b 可过滤大部分背景噪声,但检测的电力线边缘较为粗糙且断裂多,选取 N_b 过大容易错误滤除部分电力线边缘段, N_b 过小则保留更多背景噪声;本算法对电力线边缘的检测较为完整,并且无需设定去噪阈值,基本滤除了干扰噪声,抗噪性更强。

电力线提取结果如图 14 所示,文献 [10] 和 [11] 算法均不能有效排除车道线等类直线干扰物且电力线拟合提取的完整度较低,文献 [10] 方法错误识别更多的无效直线;本算法可以较完整提取出 4 种场景下的电力线边缘且充分排除了地面的线状干扰物,识别的精度更高。从表 1 可以看出,与其他 2 种算法相比,本算法在识别准确率和召回率上均有明显的优势且处理速度更快,其中准确率分别提高 38.39% 和 7.54%,召回率分别提高 22.27% 和 12.14%。由以上比较分析可知,本文所提算法在多种复杂地物背景下的电力线检测与提取效果明显优于其他 2 种常见同类算法,电力线的最终识别更加完整与准确。

3 结 论

1) 本文提出了一种复杂地物背景下的电力线识别算法,改进了 Ratio 算子模板参数关系和边缘检测特征值且参数选取简单,提高了电力线边缘检测的完整度。

2) 利用基于轮廓特征的背景去噪算法可以在保留电力线上小面积断裂边缘的同时滤除绝大部分背景噪声,算法无需设定去噪阈值,自适应性强。

3) 直线动态编组拟合与筛选算法不仅有效解决直线的断裂重叠问题,而且排除了地面线状物干扰,提升了电力线最终提取的准确精度。相对于其他常见的同类算法,本算法表现出更高的识别精度与处理效率,其中识别准确率达 96.37% 以上,同时具备较强的抗干扰性以及稳健性,可在不同复杂地物中快速有效识别出电力线,对无人机智能巡检具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] ARAAR O, AOUF N, VALLEJO DIETZ J L. Power pylon detection and monocular depth estimation from inspection UAVs[J]. *Industrial robot: an international journal*, 2015, 42(3): 200–213.
- [2] 赵浩杰, 谭骏祥, 雷杰, 等. 基于几何特征的无人机激光雷达电力线提取[J]. *测绘通报*, 2020(S1): 145–150.
- [3] 操昊鹏, 曾卫明, 石玉虎, 等. 基于 Hough 变换和总体最小二乘法的电力线检测[J]. *计算机技术与发展*, 2018, 28(10): 164–167.

微计算机信息, 2010, 26(6-1): 44–45, 60.

- [12] 张昆, 陶建锋, 贺思三. 基于 UKF 和优化组合策略的改进粒子滤波算法 [J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(8): 1483–1488.
- [13] 刘淑波, 张园, 初俊博, 等. 模糊遗传粒子滤波算法研究

[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(2): 18–20, 53.

- [14] 赵丰, 汤磊, 张武, 等. 一种高实时性粒子滤波重采样算法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(18): 5789–5793.
- [15] 李璿瑶, 王海斌, 徐鹏, 等. 联合方位-径向速度的粒子滤波目标运动分析 [J]. 声学学报, 2019, 44(4): 523–533.

本文引用格式:

金巧园, 张国超, 代中华. 基于改进遗传粒子滤波的纯方位机动目标跟踪 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 29–34.

JIN Qiaoyuan, ZHANG Guochao, DAI Zhonghua. Bearing-only maneuvering based on improved genetic particle filter algorithm[J]. Applied science and technology, 2021, 48(5): 29–34.

(上接第 28 页)

- [4] 林祥国, 宁晓刚, 夏少波. 特征空间聚类的电力线激光雷达点云分割方法 [J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 60–63, 82.
- [5] 张秋雁, 杨忠, 陈聪, 等. 一种复杂环境下的电力线检测方法 [J]. 应用科技, 2019, 46(5): 51–56.
- [6] 时圣革, 王森, 董力文. 一种基于方向可调滤波的航拍图像电力线检测算法 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(6): 45–48.
- [7] 吕晓丽, 姜航, 李文辉. 基于无人机主动导航的电力线检测与定位 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 210–214.
- [8] VON GIOI R G, JAKUBOWICZ J, MOREL J M, et al. LSD: a fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2010, 32(4): 722–732.
- [9] 林火焮, 陈杰, 薛骅淳, 等. 基于 LSD 与统计分析的航拍图像电力线提取方法 [J]. 应用科技, 2019, 46(2): 30–34.
- [10] 李彩林, 冯朝晖, 邓晓景, 等. 复杂地物背景下的电力线提取方法 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(22): 198–202.
- [11] 赵乐, 王先培, 代荡荡, 等. 复杂背景下电力线自动提取

算法 [J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 218–227.

- [12] PAN Chaofeng, CAO Xianbin, WU Dapeng. Power line detection via background noise removal[C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). Washington, USA: IEEE, 2016.
- [13] 赵乐, 王先培, 姚鸿泰, 等. 基于可见光航拍图像的电力线提取算法综述 [J/OL]. 电网技术. [2021–03–04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20200628.1816.021.html>.
- [14] TUPIN F, MAITRE H, MANGIN J F, et al. Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1998, 36(2): 434–453.
- [15] XU Zezhong, SHIN B S, KLETTE R. Accurate and robust line segment extraction using minimum entropy with Hough transform[J]. IEEE transactions on image processing, 2015, 24(3): 813–822.
- [16] 郭芸, 王宜怀, 刘纯平, 等. 基于主曲线的遥感图像河岸线提取 [J]. 通信学报, 2016, 37(11): 80–89.

本文引用格式:

骆顾平, 陈静, 苏成悦, 等. 复杂地物背景下的电力线识别算法 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 23–28, 34.

LUO Guping, CHEN Jing, SU Chengyue, et al. A power line recognition algorithm under the background of complex ground objects[J]. Applied science and technology, 2021, 48(5): 23–28, 34.