DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0145-05.

变电站远程智能巡检图像目标快速识别算法

卢铭翔，惠小东，金 鑫，张家兴，陈煜敏
(南方电网数字电网集团有限公司,广东 广州 510700)

摘 要: 设计变电站远程智能巡检图像目标快速识别算法,通过高效的目标识别性能,提升变电站巡检水平。利用无人机搭载相机,采集变电站远程智能巡检图像,通过小波变换方法滤波处理所采集的智能巡检图像。利用自适应阈值分割方法,分割已滤波处理的变电站远程智能巡检图像,将智能巡检图像划分为前景图像与背景图像。以智能巡检图像的前景图像为基础,构建高斯差分金字塔,提取图像的SIFT特征。依据所提取智能巡检图像的SIFT特征构建样本集,作为特征加权支持向量机的输入,利用特征加权支持向量机输出目标快速识别结果。实验结果表明,该算法可以快速识别变电站远程智能巡检图像中的目标,目标识别时间低于500 ms。

关键词: 远程智能巡检;目标识别算法;SIFT特征;特征加权
中图分类号:TP391.413 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0145-05

Fast Target Recognition Algorithm For Substation Remote Intelligent Patrol Image

LU Ming-xiang, HUI Xiao-dong, JIN Xin, ZHANG Jia-xing, CHEN Yu-min
(China Southern Power Grid Digital Grid Group Co., Ltd., Guangzhou 510700 China)

Abstract: This paper designs substation remote intelligent inspection image target fast recognition algorithm, through efficient target recognition performance, improves substation inspection level. The remote intelligent inspection image of substation is collected by the UAV equipped with a camera, and the collected intelligent inspection image is filtered by wavelet transform method. The adaptive threshold segmentation method is used to segment the filtered remote intelligent inspection image of substation, and the intelligent inspection image is divided into foreground image and background image. Based on the foreground image of the intelligent inspection image, the Gaussian difference pyramid is constructed and the SIFT features of the image are extracted. The sample set is constructed according to the SIFT features of the extracted intelligent inspection images, which is used as the input of the feature-weighted support vector machine, and the fast target recognition results are output by the feature-weighted support vector machine. The experimental results show that the algorithm can quickly identify the target in the substation remote intelligent inspection image, and the target recognition time is less than 500 ms.

Keywords: remote intelligence inspection; object recognition algorithm; SIFT feature; feature weighting

0 引言

变电站采用人工巡检方式时,巡检人员工作量大且专业技能水平高低不同,容易出现巡检效率较低以及巡检结果不够准确的问题[1-3]。采用智能巡检方式对变电站设备以及线路进行巡检,利用无人机或巡检机器人替代部分巡检人员,提升变电站巡检的工作效率[4-5]。变电站内电力部件的运行可靠性极为重要,变电站的远程巡检,有助于变电站管理人员快速发现变电站内电力设备故障。选取无人机作为变电站远程智能巡检的相机搭载设备,利用无人机具有的不受地形限制的优势[6],提升变电站远程智能巡检效率。利用无人机搭载相机,采集变电站内设备运行状态,通过对变电站远程智能巡检图像的高效处理[7-8],快速识别变电站远程智能巡检图像目标,将所识别目标作为判别变电站内设备运行安全性的重要依据。

变电站远程智能巡检方式虽然能够改善人工巡检的弊端,但仍有进步空间。蒋珊等人以深度学习算法为基础[9],构建金字塔结构网络,并结合Faster R-CNN算法,从无人机所采集的巡检图像中识别绝缘子。该方法虽然可以对绝缘子进行识别,但由于算法过于复杂,不适用于电力系统的实际应用中,有待改进;张俊等人提出利用无人机采集输电线路图像[10],通过RGB阈值对该图像中杆塔进行粗提取以及背景清除,再采用直线检测算法与Hough变换算法自动识别目标杆塔。该方法虽然可以准确识别出杆塔图像,但仅可以识别杆塔目标,局限性较

*基金项目:广东省科技攻关项目(202000450021);南方电网数字电网集团有限公司(JY-00-01-ZC-21-005-TQ)
收稿日期:2023-10-20

强，无法检测电力系统的其它电力设备与线路。

针对以上研究存在的问题，设计变电站远程智能巡检图像目标快速识别算法，利用无人机搭载相机，采集变电站远程智能巡检图像，利用支持向量机快速识别图像中的目标，适用于变电站故障诊断以及设备监测等应用中。

1 巡检图像目标快速识别算法

1.1 局部自适应阈值的变电站远程智能巡检图像分割

利用无人机搭载相机，采集变电站远程智能巡检图像。利用小波变换方法对所采集的变电站远程智能巡检图像进行滤波处理。利用自适应阈值分割方法，对完成滤波处理的变电站远程智能巡检图像实施分割处理。阈值分割是图像分割方法中的重要方法，变电站远程智能巡检图像的背景较为复杂，图像中可能包含多个目标。多目标的灰度级存在差异[11]，采用设置固定阈值方法，较难实现变电站远程智能巡检图像的精准分割。选取局部自适应阈值分割方法，对变电站远程智能巡检图像进行分割处理。设变电站远程智能巡检图像为f，$f(\mathrm{x},\mathrm{y})$表示x行y列的像素点灰度值。对变电站远程智能巡检图像中不同像素点的邻域块，进行高斯加权处理获取阈值。利用所获取的阈值构造变电站远程智能巡检图像的阈值平面$Z(\mathrm{x},y)$。针对像素点灰度值$f(\mathrm{x},y)$阈值化处理后的灰度值$g(x,y)$表达式如下：

$$g(x,y)=\begin{cases}a & f(x,y)\le Z(x,y)\\ b & f(x,y)>Z(x,y)\end{cases} \tag{1}$$

式中，a与b分别表示图像的前景部分以及背景部分。

选取局部自适应阈值分割算法中的Sauvola方法，分割变电站远程智能巡检图像。该方法计算固定大小的窗口内，像素点的加权均值$n(\mathrm{x},y)$以及标准差$e(\mathrm{x},y)$，获取相应阈值。E表示变电站远程智能巡检图像中心像素点标准差$e(x,y)$的最大值，用η表示自适应调节参数，变电站远程智能巡检图像中心像素点的阈值计算公式如下：

$$Z(x,y)=n(x,y)\left[1+\eta\left(\frac{e(x,y)-1}{E}\right)\right] \tag{2}$$

依据式(2)，将变电站远程智能巡检图像分割为前景图像与背景图像。式(2)中，自适应调节参数的取值极为重要。η取值过高时，该分割方法的自适应程度较低；η取值过低时，该方法具有较高的自适应程度，容易出现噪声干扰[12]。变电站远程智能巡检图像部分区域像素点的标准差$e(\mathrm{x},y)$越高时，与E值越接近，此时$Z(\mathrm{x},y)\approx n(\mathrm{x},y)$。通过以上过程可以看出，通过变电站远程智能巡检图像的分割，有效消除变电站远程智能巡检图像的背景阴影。

1.2 提取变电站远程智能巡检图像的SIFT特征

从完成分割的变电站远程智能巡检图像的前景图像中，提取图像的SIFT特征。SIFT特征在光线变化时，仍然可以保持尺度缩放不变性，适用于变电站远程智能巡检图像中。选取SIFT特征作为变电站远程智能巡检图像目标识别中，所提取的特征。SIFT特征提取过程中，尺度变换的高斯核函数的计算公式如下：

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{3}$$

式中，σ表示尺度空间因子。尺度空间存在差异时，利用σ的取值，确定不同尺度空间[13]。σ值较小时，表示变电站远程智能巡检图像具有较小的平滑程度，此时图像细节清晰度高，图像的尺度空间小；σ值较大时，变电站远程智能巡检图像的平滑程度较高，图像的尺度空间越大。

$I(\mathrm{x},y)$与$\mathrm{I}(x,y,\sigma)$分别表示变电站远程智能巡检图像以及高斯核函数卷积后的图像。提取变电站远程智能巡检图像SIFT特征的过程如下：

(1) 建立高斯金字塔

对变电站远程智能巡检图像下采样处理，依据下采样结果的图像尺寸，从小到大排列图像构建金字塔。对下采样获取的图像[14]，通过不同的σ取值，进行高斯模糊操作。高斯金字塔组数的计算公式如下：

$$o=\log_2\{\phi\min(M,N)\} \tag{4}$$

式中，M与N分别表示原始变电站远程智能巡检图像长度与宽度，o与ϕ分别表示高斯金字塔组数以及调节参数。

构建高斯金字塔时，将原始变电站远程智能巡检图像扩大至原尺寸的2倍，所获取图像作为0组图像的尺寸。通过调节尺度空间因子，高斯模糊处理图像，获取0组的不同层次图像。高斯金字塔中的各层次尺度因子取值表达式如下：

$$\sigma_s=2^{\frac{s}{S}}\sigma_0 \tag{5}$$

式中，s与S分别表示高斯金字塔当前组的层数以及总层数，σ_0与σ_s分别表示初始尺度以及0组中的层的尺度空间因子。

(2) 特征提取

利用所构建的高斯金字塔，寻找SIFT特征提取的空间极值点。高斯金字塔是通过连续空间采样获取的，因此搜寻的极值点并非最精准极值点。在高斯金字塔空间的极值点位置，利用泰勒展开方式拟合连续区间，确定最终极值点位置以及尺度，去掉局部的具有不对称曲率的点即低对比特征点。去除变电站远程智能巡检图像中的低对比特征点，获取有效特征点的过程如下：

x与$\triangle x$分别表示利用高斯金字塔获取的变电站远程智能巡检图像的候选特征点及其偏移量，$B(\mathrm{x})$表示特征

点的对比度，泰勒展开$B(x)$的表达式如下：

$$B(x)=\frac{\partial B^T}{\partial x}\Delta x+\frac{1}{2}\Delta x^T\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}\Delta x \tag{6}$$

式中，x表示$B(x)$的极值点。

候选特征点的偏移量计算公式如下：

$$\Delta x=-\frac{\partial^2 B^{-1}}{\partial x^2}\frac{\partial B(x)}{\partial^2 x} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)中，可得表达式如下：

$$B(\hat{x})=B+\frac{2\partial B^T\hat{x}}{\partial x} \tag{8}$$

设变电站远程智能巡检图像特征提取的对比度阈值为U。当$|B(\hat{x})|\geqslant U$时，保留该特征点，否则将该特征点删除。通过以上过程完成变电站远程智能巡检图像特征提取。

1.3 特征加权支持向量机的目标识别算法

支持向量机是目标识别领域的重要方法，该方法可以在有限样本基础上，利用高效的学习能力提升分类精度，泛化能力较强。利用所提取的变电站远程智能巡检图像特征，构建带类别标记的图像特征训练样本集$\{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_l,y_l)\}$，$x_i\in R^n$，$y_i\in(-1,1)$，利用超平面$(w,x)+b=0$将该样本集划分为两类，其中$w$与$b$分别表示权向量以及偏置。利用支持向量机识别变电站远程智能巡检图像目标，搜寻分类间隔最大的最优分类超平面，构建图像目标识别的二次规划问题目标函数为：

$$\begin{cases}\min\limits_{w,b}\varphi(w)=\dfrac{1}{2}(w,x)\\ s.t.\,y_i\left((w,x)+b\right)\geq 1\end{cases} \tag{9}$$

通过求解式(9)的优化问题，获取变电站远程智能巡检图像目标识别最优分类超平面的判别函数表达式如下：

$$f(x)=\operatorname{sgn}\sum\alpha_i^* y_i(x_i,x)+b^* \tag{10}$$

式中，α_i表示拉格朗日乘子。

引入松弛变量ξ_i，将式(9)的优化问题转化为：

$$\begin{cases}\min\limits_{w,b}\varphi(w)=\dfrac{1}{2}(w,w)\xi_i+C\\ s.t.\,y_i\left((w,x)+b\right)\geq 1-\xi_i\end{cases} \tag{11}$$

式中，C表示惩罚因子。

核函数的选取对支持向量机的计算性能存在明显影响，支持向量机的核函数表达式如下：

$$K(x_i,x_j)=\varphi(x_i)\varphi(x_j) \tag{12}$$

利用式(12)的满足Mercer定理的函数，作为支持向量机的内积。

引入特征权重算法，优化支持向量机中的核函数计算。用Q表示存在于输入空间的n阶线性变换矩阵。利用特征加权方法处理核函数，将核函数$K(x_i,x_j)$转化如下：

$$K_Q(x_i,x_j)=K\left(x_i^T Q,x_j^T Q\right) \tag{13}$$

线性变换矩阵中对角线上的元素Q_{ii}，即特征样本i的权重。

选取Sigmoid核函数作为变电站远程智能巡检图像目标识别的核函数，对核函数实施特征加权处理的表达式如下：

$$K_Q(x_i,x_j)=\tanh\left(x_i^T QQ^T x_j+b+C\right) \tag{14}$$

利用特征加权处理核函数后的支持向量机，快速识别变电站远程巡检图像目标过程如下：

(1) 利用变电站远程智能巡检图像的带类别标记特征样本，构建数据集$X=(x_i,d)$，其中x_i与d分别表示变电站远程智能巡检图像特征向量以及类别标号；

(2) 利用信息增益算法，计算数据集内各特征样本的加权系数，利用加权系数计算结果，构造线性变换矩阵Q；

(3) 选取加权后的Sigmoid核函数，作为支持向量机的核函数。利用交叉验证方法，确定支持向量机的最佳参数，构建分类器；

(4) 利用所构建的支持向量机分类器，输出变电站远程智能巡检图像目标快速识别结果。

2 实验结果与分析

为了验证所设计图像目标快速识别算法，快速识别变电站远程智能巡检图像目标有效性，选取某电力企业的220 kV变电站内设备作为研究对象。选取型号为禅思H20N的大疆自动化电力巡检相机，作为采集变电站远程智能巡检图像的相机。利用无人机搭载该相机，采集变电站内设备运行图像，所采集图像利用无线通信网络传送至变电站的远程智能巡检中心。远程智能巡检中心，利用本文设计的目标快速识别算法，识别图像中的目标，为变电站设备的实时监测提供依据。



图1 变电站油浸变压器图像

利用相机采集的该变电站的500 kVA油浸变压器的原始图像如图1所示。通过图1实验结果可以看出，本文算法可以利用无人机搭载的自动化电力巡检相机，采集变电站内的油浸变压器设备图像。将利用相机采集的变电站内设备图像，作为变电站远程智能巡检图像目标快速识别的基础。

采用本文算法对所采集的变电站油浸变压器图像进行去噪处理，完成去噪处理后的图像如图2所示。通过图

2实验结果可以看出，采用本文算法可以对无人机搭载相机采集的变电站内的设备图像，进行有效的去噪处理。经过去噪处理后的变电站油浸变压器图像，清晰度明显提升，图像边缘清晰，有利于后续变电站内设备图像分割。去噪处理为变电站远程智能巡检的图像目标识别，提供有效的基础。



图2 去噪处理后图像

采用本文算法，对完成去噪后的变电站远程智能巡检图像，进行分割处理，通过图像分割，分离变电站远程智能巡检图像中的前景与背景。变电站远程智能巡检图像分割结果如图3所示。通过图3实验结果可以看出，采用本文算法可以实现变电站远程智能巡检图像的有效分割，图像分割结果中，变电站内设备的边界清晰。实验结果验证本文算法具有良好的图像分割性能。本文算法可以有效分离变电站远程智能巡检图像的前景与背景，提升变电站远程智能巡检图像的目标识别精度。

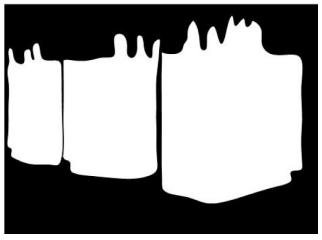


图3 图像分割结果

采用本文算法，识别变电站远程智能巡检图像中的目标，识别结果如图4所示。通过图4实验结果可以看出，采用本文算法可以有效识别变电站远程智能巡检图像中的目标。本文算法对于图像中部分隐藏的目标，仍然可以精准识别。本文算法具有较高的目标识别精度，可以作为变电站内设备故障诊断以及设备运行状态实时监测的重要依据。



图4 目标识别结果

利用无人机搭载相机采集变电站内设备图像。统计采用本文算法识别变电站远程智能巡检图像目标的识别结果，统计结果如表1所示。通过表1实验结果可以看出，采用本文算法可以精准识别变电站远程智能巡检图像中的目标。图像中包含多目标时，本文算法仍然可以精准识别。本文算法选取支持向量机作为目标识别方法，利用该方法具有的高运算性能，提升变电站远程智能巡检图像的精准性以及实时性。本文算法可以在500 ms内快速识别变电站远程智能巡检图像目标，具有较高的应用性能。

表1 变电站远程智能巡检图像目标

识别序号	目标识别结果	识别目标数量/个	目标识别时间/ms
1	变压器	3	185
2	断路器	2	195
3	GIS设备	3	345
4	互感器	4	418
5	保护电器	2	105
6	电容器	3	184
7	继电保护设备	1	385
8	电能表	2	285
9	断路器	3	195
10	隔离开关	5	394

3 结束语

变电站远程智能巡检图像目标的快速识别是提升变电站运行性能的重要基础。设计变电站远程智能巡检图像目标快速识别算法，利用无人机搭载相机，采集变电站的远程巡检图像，对所采集的变电站远程巡检图像进行目标快速识别。通过实验验证，该算法可以精准识别变电站远程智能巡检图像目标，依据精准的目标识别结果，提升变电站巡检性能，提升变电站运行的安全可靠性。

参考文献：

[1] 常荣，杨传旭.基于图像识别技术的变电站二次保护状态检测方法[J].自动化技术与应用，2024，43(12)：175-177，182.

[2] 张春晓，陆志浩，刘相财.智慧变电站联合巡检技术及其应用[J].电力系统保护与控制，2021，49(9)：158-164.

[3] 王凯旋，任福继，倪红军，等.面向电力设备红外图像的温度值识别算法[J].智能系统学报，2022，17(3)：617-624.

[4] 魏豪，张凯，郑磊，等.基于HOG-RCNN的电力巡检红外图像目标检测[J].红外与激光工程，2020，49(S2)：242-247.

[5] 王伟，张彦龙，翟登辉，等.基于OpenCV+SSD深度学习模型的变电站压板状态智能识别[J].电测与仪表，2022，59(1)：106-112.

[6] 顾晓东，唐丹宏，黄晓华.基于深度学习的电网巡检图像缺陷检测与识别[J].电力系统保护与控制，2021，49(5)：91-97.

[7] 琚泽立，邢伟，金鸿鹏，等.基于轻量化网络的变电站缺陷图片检测算法[J].电网与清洁能源，2020，36(8)：43-49.

[8] 罗玉鹤，庞红旗，高飞翎，等.电力巡检图像中防振锤的区域全卷积网络识别方法[J].福州大学学报(自然科学版)，2020，48(6)：714-719.

[9] 蒋姗,孙渊,严道森.基于深度学习算法的航拍巡检图像的绝缘子识别[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(1):58-64.

[10] 张俊,庞世强,李晓斌,等.融合LSD算法与Hough变换的航拍输电线路图像杆塔自动识别方法[J].电子器件,2021,44(5):1210-1214.

[11] 王好,陈秀新,袁和金.基于改进Faster RCNN的变电站红外图像多目标识别[J].传感技术学报,2021,34(4):522-530.

[12] 万吉林,吴国强,管敏渊,等.基于RetinaNet的变压器图像小部件智能识别方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):166-173.

[13] 于虹,龚泽威一,张海涛,等.基于Faster R-CNN算法的变电站设备识别与缺陷检测技术研究[J].电测与仪表,2024,61(3):153-159.

[14] 李新海,徐宝军,范德和,等.变电站设备状态智能识别系统技术研究[J].电气传动,2021,51(24):33-39.

作者简介:卢铭翔(1992-),男,本科,工程师,研究方向:电网生产管理数据与实时数据融合分析应用研究。

(上接第122页)

图10所示。

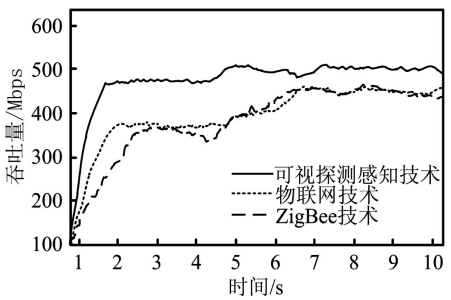


图10 系统吞吐量对比分析

通过图10可知,所提技术吞吐量变化曲线始终高于对比技术,因为所提技术采用modbus通信协议,能够有效防止通信数据丢失,进而单位时间内传输数量最多,优于对比方法。

2.5 系统响应时间对比分析

为了进一步证实可视探测感知技术设计系统性能良好,下面对比三种技术下系统的响应时间,对比结果如图11所示。

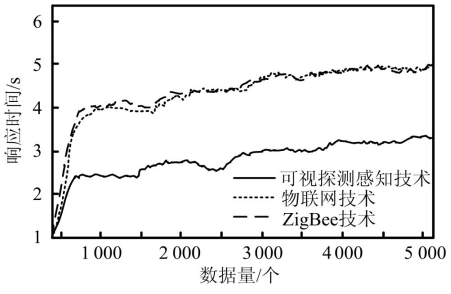


图11 系统响应时间对比

根据图11可知,所提技术系统响应时间最短,因为所提技术采用探测器可将数据信号进行压缩,进而减少冗余数据量,提升数据处理速度,进而系统响应时间最短,可以在最短时间内获得图像内是否存在异常点,及时进行灭火,消除隐患。

3 结束语

本文提出一种基于可视探测感知的风电场全自动灭火系统,采用ZigBee无线传感技术设计风电场火灾报警子系统;根据modbus通信协议、模糊路基数码构建作业人员感知子系统;为了维护系统安全设立系统管理子系统;通过灰度图、二值过滤、双CCD技术建立火灾识别子系统。实验结果表明,可视探测感知设计的系统,识别效果好、吞吐量高、影响时间短,具有较高实用价值。

参考文献:

[1] 张立中,赵海波.风电场生态环境评价及其恢复治理技术研究[J].能源与环保,2021,43(11):17-22.

[2] 胡卫,翁洪杰,冯永新,等.一起沿海风电场10 kV集电线路短路引起箱变着火故障分析[J].浙江电力,2020,39(6):32-38.

[3] Khoroshko V V,Hlinisty R V,Hlinisty R R,et al. Electronic fire safety systems efficiency in the combustion zone of cars for underground parkings of residential buildings[J].Doklady BGUIR,2020,18(7):63-70.

[4] 黄新静,任静.基于物联网技术的高层建筑自动喷水灭火系统设计[J].自动化与仪器仪表,2022(4):155-159.

[5] 郑学樑.基于ZigBee网络的电缆防火监控系统设计[J].微型电脑应用,2020,36(11):140-142,152.

[6] 张付东,赵子源,孙锐,等.基于人工智能与多传感器信息融合的电缆火灾预警算法[J].电子设计工程,2022,30(6):86-90.

[7] 刘蓝,谢明江,高珊,等.基于无线传感技术的秸秆焚烧火点在线监测系统设计与实现[J].东北农业大学学报,2020,51(9):89-96.

[8] 杨义,焦继业.基于自定义协议的维护通信总线(M-BUS)设计[J].计算机与数字工程,2020,48(2):479-482.

[9] 张惠远.基于OAM的室内火灾模拟场景模型构建及可视化表达[J].自动化技术与应用,2021,40(9):162-165.

[10] 许月兰.基于物联网技术的历史建筑室内外火灾疏散路径三维模拟[J].自动化技术与应用,2021,40(11):136-139,148.

[11] 胡宇鹏,王易君,王泽,等.同位素热源火灾事故环境模拟试验及仿真分析[J].原子能科学技术,2021,55(8):1529-1536.

[12] 李晨辉,胡潇尹,肖铎,等.基于MK-XGBoost的多传感器融合火灾识别技术[J].消防科学与技术,2022,41(1):104-107.

作者简介:刘智超(1988-),男,硕士,工程师,研究方向:电力系统及其自动化。