

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.057

基于智能机器人的高压配电柜红外图像自动检测

刘曰木, 张玉强

(国能榆林能源有限责任公司, 陕西 榆林 719407)

摘要: 为了自动检测高压配电柜内部的电气设备是否存在异常, 如过热、短路、接触不良等问题, 提高电力系统的可靠性和稳定性, 提出一种基于智能机器人的高压配电柜红外图像自动检测方法。采用投影矩阵和单视觉测量法明确待检测目标与机器人搭载红外传感器的水平间距, 根据水平间距与张正友标定法进行机器人视觉自动标定。结合视觉自动标定和 HSV3 分量重构法确定高压配电柜红外图像自动检测内部零件状态, 利用理想状态偏离度实现检测区域调整。在调整后的检测区域中计算图像特征点对应的区域熵, 根据仿射变换函数展开特征点匹配, 结合图像自动检测函数实现高压配电柜红外图像自动检测。实验结果表明: 该方法的高压配电柜红外图像自动检测效果好、精度高、自动检测结果可靠。

关键词: 机器人; 高压配电柜; 红外图像自动检测; 张正友标定法; HSV3 分量重构方法; 仿射变换函数

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0295-06

Automatic Infrared Image Detection of High-voltage Distribution Cabinets Based on Intelligent Robots

LIU Yuemu, ZHANG Yuqiang

(Guoneng Yulin Energy Co., Ltd., Yulin 719407, China)

Abstract: To automatically detect any abnormalities in the electrical equipment inside the high-voltage distribution cabinet, such as overheating, short circuit, poor contact, etc., and improve the reliability and stability of the power system, an intelligent robot based infrared image automatic detection method for high-voltage distribution cabinets is proposed. The projection matrix and single vision measurement method are used to determine the horizontal distance between the target to be detected and the infrared sensor installed on the robot. The robot vision is automatically calibrated based on the horizontal distance and Zhang Zhengyou calibration method. Visual automatic calibration and HSV3 component reconstruction method are combined to determine the status of internal parts in high-voltage distribution cabinet infrared image detection, and a ideal state deviation degree is set to achieve detection area adjustment. The image feature points are calculated corresponding to region entropy in the adjusted detection area, feature point matching is conducted based on affine transformation function, and by combination with image detection function, automatic infrared image detection of high-voltage distribution cabinet is achieved. The experimental results show that the proposed method has favourable infrared image automatic detection effect of the high-voltage distribution cabinet with high accuracy and reliable automatic detection results.

Keywords: robots; high voltage distribution cabinet; infrared image automatic detection; Zhang Zhengyou calibration method; HSV3 component reconstruction method; affine transformation function

0 引言

在工业快速发展的过程中, 电站作为工业电路的基础性设施, 增设数量越来越多。为了维护电站和设备的安全, 需要对电站内设备开展定期巡检和视察^[1]。高压配电柜是电力系统中重要的组成部分, 用于提供机械设备所需的电能, 确保机械设备正常运转^[2]。高压配电柜可以进行电源分配、过载保护、短路保护等功能, 以保障对机械设

备的稳定供电。而高压配电柜与机械设备的自动化控制系统紧密结合, 用于监控和控制机械设备的运行状态和参数。通过高压配电柜实现的电力控制能够为机械设备提供更加精确和可靠的控制。然而, 由于长时间运行和环境因素等原因, 高压配电柜内部可能存在潜在的故障风险, 如过载、短路和接触不良等^[3], 这些故障可能导致设备损坏、电力中断甚至火灾等严重后果。为了及时发现和解决高压配电柜中的故障问题, 红外图像自

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(S2019FDA0021)

第一作者简介: 刘曰木(1988—), 男, 陕西神木人, 工程师, 硕士, 研究方向为控制工程, 460682870@qq.com。

动检测技术被广泛应用。红外图像自动检测技术利用红外辐射特性,可以非接触地迅速检测出目标物体的表面温度分布情况。通过使用红外相机采集高压配电柜的红外图像并进行图像处理和分折,可以有效地识别出异常热点和潜在故障。搭载红外传感器的巡检机器人^[4]可以识别出高压配电柜上的各种元器件和设备,对其进行检测和分析,并可帮助机器人更加准确地判断设备的工作状态和健康程度,及时发现故障和问题,从而保障电力系统的安全稳定运行^[5]。

孙晓东等^[6]利用深度学习方法识别目标,通过单目测量距离方法测量机器人和待检测目标之间距离,建立机器人视觉系统,向机器人发送定位导航,实现机器人对视觉目标的检测。马东等^[7]利用 KCF 算法跟踪待检测目标,并通过小波变换方法提取待检测目标特征点,同时采用图像分块处理方法对提取的特征点进行均匀处理;利用 SURF 算法构建 ORB 描述子和 KNN 算法提高匹配精度,最后利用帧差法获取完整目标,实现机器人对视觉目标的检测。

以上两种方法对机器人没有进行视觉调整,导致高压配电柜红外图像自动检测效果差,检测精度低。为了解决上述方法存在的问题,本文提出基于智能机器人的高压配电柜红外图像自动检测方法。

1 红外传感机器人高压配电柜巡检中的视觉自动标定

搭载了红外传感器的机器人通过单视觉测量方法对高压配电柜进行测量^[8]。首先从机器人搭载的红外传感器中收集拍摄的照片^[9],然后根据世界坐标系与照片坐标系之间的关系进行换算,完成世界坐标系与拍摄照片的匹配。

根据几何相似理论和红外传感器小孔成像原理^[10],搭建投影矩阵,其公式为

$$\mathbf{K} = \frac{f}{z_c} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{c'} \\ y_{c'} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: f 表示成像与镜面的间距; u 、 v 均表示世界坐标转换参数; z_c 、 x_c 、 y_c 表示红外传感器投影的三维坐标; $x_{c'}$ 表示经过投影的横坐标; $y_{c'}$ 表示经过投影的纵坐标。

根据式(1),通过单视觉测量法明确待检测目标与机器人搭载红外传感器的水平间距 D ,其计算公式为

$$D = \frac{K(W \times F)}{P} \quad (2)$$

式中: W 表示待检测目标的水平宽度; F 表示机器人搭载红外传感器的聚焦距离; P 表示待检测目标图像的像素宽度。

利用图像、红外传感器、平面成像坐标系与世界坐标系之间的坐标转换算法,自动计算出待检测目标图像坐标系关系^[11],其计算公式为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{c'} \\ y_{c'} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: f_x 、 f_y 分别表示拍摄平面成像的横、纵坐标; f_s 表示坐标转换参数; c_x 、 c_y 分别表示图像坐标转换的横、纵坐标。

红外传感器外部参数矩阵 $\mathbf{M}$ 表达式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

选择非零因子 σ ,令 $\sigma = 1/z$,则满足待检测目标的图像坐标系与世界坐标系之间的转换形式,则转换矩阵用下述公式表示:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{M}(x_w, y_w, z_w)}{DH} \quad (5)$$

式中 x_w 、 y_w 、 z_w 表示世界三维坐标系。

拍摄红外传感器标定是指通过红外传感器拍摄图片获得红外传感器相关参数,并通过图像和相关参数恢复物体在原有空间中的形状和摆放位置^[12]。由于红外传感器标定能够提高机器人对待检测目标定位的精确度,因此采用张正友标定法展开标定。

红外传感器的内部参数矩阵为 $\mathbf{A}$,其计算公式为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x & g & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: a_x 、 a_y 分别表示红外传感器拍摄时内部空间的横纵坐标; g 表示重力; u_0 表示标定方向; v_0 表示反应速度。

结合图像坐标系中光心的方向矢量,计算出方向矢量的正交形式,其计算公式为

$$\mathbf{R} = \det \left[\min \sum_i m_i - m_i^2 \right] \quad (7)$$

式中: $\det$ 表示正交函数; m 表示图像坐标系中标定的坐标位置; i 表示标定序数。

根据式(7)可计算出受到约束的红外传感器

成像的内部参数 r_1, r_2, r_3, t , 内部参数的计算公式为

$$\begin{cases} r_1 = \lambda h_1 \\ r_2 = \lambda h_2 \\ r_3 = \lambda h_3 \\ t = r_1 r_2 r_3 \quad t \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: λ 表示约束条件; h_1, h_2, h_3 分别表示与 r_1, r_2, r_3 对应的矢量参数。

根据张正友标定法^[13]进行机器人视觉自动标定,具体如下:

$$p = \frac{t(\mathbf{KED}[\mathbf{R}|\mathbf{T}])}{\mathbf{A}(r_1 + r_2 + r_3)} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{T}$ 表示红外传感器外部参数矩阵。

2 机器人自动检测高压配电柜区域调整

结合视觉自动标定^[14]和 HSV3 分量重构法^[15]确定检测区域状态,通过检测高压配电柜区域理想状态偏离度实现检测区域调整。

在红外传感器测量高压配电柜过程中,由于存在不同地点和时间的光照强度不同,地面材质会引起反光、阴影和强光等不利于巡检的干扰现象。因此需要基于空间平面测距模型来处理复杂多变的光照条件,并确保视觉引导的稳定状态。

根据采集高压配电柜红外图像的颜色特征,利用 HSV3 分量重构法,将高压配电柜图像色调分量 $H(x, y)$ 进行取反与归一化处理。取反后的高压配电柜图像色调分量为 $\bar{H}(x, y)$,从而自动计算出灰度图像的重构矩阵 $\mathbf{H}^a$,其计算公式为

$$\mathbf{H}^a(x, y) = \bar{H}(x, y) \cdot \frac{(b-a)}{255^2} + \frac{pa}{255} \quad (10)$$

式中: a 表示取反图像中的灰度最大值; b 表示取反图像中的灰度最小值。

根据式(10),将高压配电柜图像中的亮度与饱和度分量做融合处理,并进一步重构融合后的图像灰度点以便凸显检测区域状态,从而实现特征自动提取,其计算公式为

$$f(x, y) = (2S(x, y) + V(x, y) \cdot \mathbf{H}^a(x, y)) \quad (11)$$

式中: $f(x, y)$ 表示高压配电柜灰度图像; $S(x, y)$ 表示亮度分量图像的灰度重构; $V(x, y)$ 表示饱和度分量图像的灰度重构。具体步骤如下。

1) 顺着纵向将高压配电柜灰度图像 $f(x, y)$ 划分成 3 个子域 $Z[c]$, 分别计算出 3 个子区域的平均灰度值 $T_{\text{avg}}[c]$ 。

2) 利用 Ostu 方法^[16]分别计算出高压配电柜

3 个子域的最佳分割数值 $T_{\text{ostu}}[c]$, 并融合 3 个子区域的平均灰度值与最佳分割阈值, 分别获得 3 个子区域的分割阈值 T_c 。

3) 二值化处理^[17]各个子域 $Z[c]$, 获得高压配电柜检测区域的二值图像 $G(x, y)$ 。

4) 通过对二值图像 $G(x, y)$ 展开逐行扫描, 获得高压配电柜图像像素点的长度 L , 得到高压配电柜检测区域在图像上的宽度范围 $[l_{\min}, l_{\max}]$ 。假如图像像素点的长度 L 在宽度范围内, 则将该连续的图像像素点进行保留, 反之进行归零处理。

高压配电柜二值图像 $G(x, y)$ 经过扫描后, 记录连续像素点的起始位置横坐标与终止位置横坐标, 从而自动确定检测区域状态, 其计算公式为

$$(I_c, J_c) = \frac{\eta(E_{x,\eta} + S_{x,\eta})}{p} \quad (12)$$

式中: I_c 表示初始状态; J_c 表示最终状态; η 表示最大扫描数; $E_{x,\eta}$ 与 $S_{x,\eta}$ 分别表示不同的高压配电柜检测区域理想状态偏离度。

结合高压配电柜检测区域理想状态偏离度, 检测区域自动调整结果如下:

$$X = \frac{\sum_{c=1}^n J_c \sum_{c=1}^n I_c J_c - E_{x,\eta} \sum_{c=1}^n I_c \sum_{c=1}^n I_c J_c^2}{(\sum_{c=1}^n J_c)^2 - S_{x,\eta} n \sum_{c=1}^n J_c^2} \quad (13)$$

3 高压配电柜红外图像自动检测方法设计

在调整后的高压配电柜检测窗口中计算图像特征点对应的区域熵, 根据仿射变换函数展开特征点匹配, 结合红外检测函数实现高压配电柜红外图像自动检测。

根据检测窗口的调整, 机器人搭载的拍摄红外传感器可以对高压配电柜进行全方位的拍摄^[18]。利用改进的尺度不变特征变换算法(scale invariant feature transform, SIFT)以高压配电柜红外图像的成像特点^[19], 规划图像中 SIFT 点的分布区域, 并将收集的图像分成多个网格。网格中每个待选特征点的所在位置都有与其对应的区域熵, 对特征点的数量进行限制, 使特征点均匀分布。

由于机器人搭载的红外传感器所拍摄的高压配电柜红外图像像素范围无法代表外界环境的全部情况, 因此在这些像素范围内所获得的 SIFT 点无法代表外部环境, 导致在获得 SIFT 点时出现了背景补偿精度降低的现象, 从而影响了特征点的分布范围计算精度。为解决这一问题, 将高压配

电柜红外图像按照网格形式进行划分,根据特征点所在位置和区域熵值,进一步计算出前 z 个特征点在网格内部的最终特征点。

在调整后的检测窗口中高压配电柜红外图像特征点对应的区域熵 W ,其计算公式为

$$W = \left\{ \sum_{m=0}^k XH(p_m) - \sum_{m=0}^k p_m q\gamma(p_m) \right\} \quad (14)$$

式中: k 表示常数; p_m 表示概率, m 表示灰度像素; H 表示全部特征点; γ 表示待选特征点; q 表示网格范围。

根据式(14)计算出的区域熵,按照阈值从大到小的顺序对待选特征点进行排序。预设参考像素帧位置是 (x, y) ,目前像素帧位置是 (x', y') ,根据仿射变换函数^[20]展开高压配电柜红外图像特征点自动匹配,结果如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_5 \\ R_3 & R_4 & R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中 $R_1, R_2, \dots, R_6$ 表示仿射变换的参数。

为了避免匹配点出现错误,在求解过程中利用RANSAC算法剔除错误特征点。

根据特征点匹配结果,确定高压配电柜目标,实现高压配电柜红外图像自动检测,检测阈值计算公式如下:

$$Z = \frac{W(R_4 + R_5 + R_6) |f'_1(x, y) - f_2(x, y)|}{(R_1 + R_2 + R_3)(x' - x)(y' - y)} \quad (16)$$

4 实验结果与分析

为了验证基于智能机器人的高压配电柜红外图像自动检测方法的整体有效性,本文进行了一系列相关测试。将其与文献[6]方法和文献[7]方法进行比较。实验主要从两个方面入手:目标视觉检测效果和量化评价。在两种指标下对比3种方法的最终实验结果,并根据实验结果证明所提方法的应用效果。

选取某厂家机器人搭载红外传感器,采集高压配电柜红外图像,其具体参数如下。

整体质量 78 kg, 尺寸为 722 mm × 458 mm × 960 mm, 续航时间 8 h。

运行工况:环境温度为-10℃~60℃,环境湿度≤99%,防护等级为IP55,小雨天正常工作。

运动模式:直行及行进中转向、原地转向、平移、驻车,最大行驶速度 1.2 m/s。

控制方式:远程遥控全自助或远程遥控。

通信方式:Wi-Fi、蓝牙。

红外传感器参数:近红外光谱范围为 700 ~ 1 100 nm,分辨率为 640×480 像素,探测距离为 50 m,视场角度为 45°,响应时间为 10 ms,工作温度范围为-40℃~100℃。

选择某一高压配电机房作为研究对象,实验环境如图1所示。



图1 实验环境

具体的实验过程如下。

1)准备工作:确保测试环境安全,并穿戴适当的个人防护装备。检查并准备好所需的机器人、红外传感器、计算机和其他测试设备。

2)设置红外传感器:将红外传感器安装在机器人的适当位置,调整其参数和设置。确保传感器的焦距和视场角度适合检测对象。

3)配置红外图像采集:使用传感器进行图像采集,并将图像传输到计算机或数据存储设备。确保设置适当的图像分辨率和其他相关参数。

4)运行实验:启动高压配电柜,并让其运行一段时间以达到稳定状态,同时使用红外传感器捕捉高压配电柜的红外图像。

5)图像分析:将采集到的红外图像导入相应的图像处理软件中。使用图像分析工具对图像进行处理和分析,以此得到相关的检测结果。

4.1 高压配电柜红外图像自动检测效果分析

3种方法的高压配电柜红外图像自动检测效果如图2所示。

将原图像和应用3种方法的图像进行对比发现,3种方法均能够实现高压配电柜红外图像自动检测,但是所提方法所得图像纹理细节更为清晰,质量更佳。而与所提方法相比,文献[6]方法和文献[7]方法所得图像细节缺失,存在大量噪声分量,导致高压配电柜红外图像自动检测效果下降。

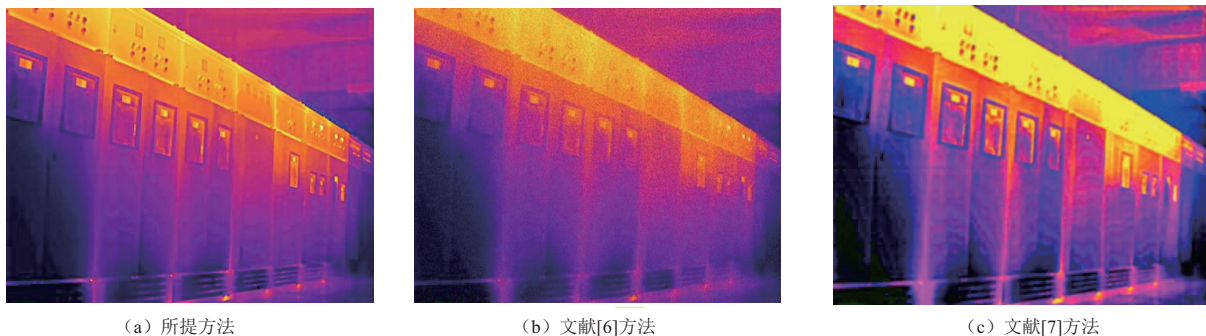


图2 3种方法的检测效果分析

4.2 量化评价

为了最直观地描述所提方法的高压配电柜红外图像发热故障检测精度,从收集的巡检图像数据库中随机抽取 10 组样本,每组样本包含 200 个测试样本。利用 F_1 数值对比 3 种方法的检测精度,实验结果如表 1 所示。其中, F_1 数值是指平均每秒内检测图像的帧数。 F_1 数值越大,说明检测精度越高。其计算公式为

$$F_1 = \frac{2P\varepsilon}{P + \varepsilon} \tag{17}$$

式中: P 表示精准率; ε 表示召回率。

表1 3种方法的自动检测精度对比 单位: %

样本集合	所提方法	文献[6]方法	文献[7]方法
1	0.93	0.57	0.63
2	0.88	0.67	0.75
3	0.94	0.62	0.64
4	0.87	0.52	0.74
5	0.94	0.64	0.75
6	0.82	0.74	0.73
7	0.87	0.73	0.81
8	0.93	0.78	0.53
9	0.95	0.53	0.56
10	0.94	0.63	0.75

根据实验结果可知,3 种方法中的 F_1 数值各不相同,其中所提方法的 F_1 数值最高。这表明所提方法的发热故障检测精度高,检测目标效果好。

3 种方法的高压配电柜红外图像自动检测时间如表 2 所示。

表2 3种方法的检测时间对比 单位: s

样本集合	所提方法	文献[6]方法	文献[7]方法
1	0.63	1.63	2.56
2	0.47	1.28	1.96
3	0.58	1.96	1.47
4	0.63	1.57	1.55
5	0.55	1.96	2.31
6	0.72	1.33	2.01
7	0.69	1.27	2.16
8	0.57	1.58	2.34
9	0.73	1.66	1.98
10	0.63	1.35	1.97

分析表 2 中的结果可知,所提方法的高压配电柜红外图像自动检测时间更短,效率更高,可以实现高压配电柜红外图像快速检测的目标。

5 结语

本文提出基于智能机器人的高压配电柜红外图像自动检测方法。该方法首先通过单视觉测量方法和张正友标定法实现机器人的视觉自动标定,然后调整检测区域,最后利用改进的 SIFT 方法提取特征点,结合相关的检测函数实现高压配电柜红外图像自动检测。实验结果表明:该方法可以全方位应用至高压配电柜红外图像自动检测过程,以此判断高压配电柜运行过程中存在的发热问题,从而提升高压配电柜与电力机械设备运行安全性。

参考文献:

[1] 郭瑜. 基于机器视觉的电力移动巡检作业安全检测方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(6): 231-234.

- 收稿日期:2023-07-26

- [14] WANG S H, GAN H, LUO Y, et al. Active disturbance rejection control with fractional - order model - aided extended state observer [J]. ISA Transactions, 2023, 142:527-537.
- [15] LEE J, YOU S S, KIM W, et al. Extended state observer-actor - critic architecture based output - feedback optimized backstepping control for permanent magnet synchronous motors [J]. Expert Systems with Applications, 2025, 270:126542.
- [16] 张祥, 李广文, 曹睿婷, 等. 基于自抗扰控制方法的自动着陆飞行控制律设计[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(5):98-104.
- [17] 刘伟, 胡磊, 陈雪辉等. 光伏跟踪电机的分数阶自抗扰控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报.

- 收稿日期:2023-09-04