

基于多波段激光数据聚类的电力屏柜压板 状态图像位姿解算方法

张笑迪¹, 刘吉昫¹, 韦鸣月², 王吉亚³, 崔婧³, 郭欣璐¹

(1. 北京电力检修分公司, 北京 100073;

2. 电力系统人工智能(联研院)国家电网公司联合实验室, 北京 102209; 3. 北京市电力公司, 北京 100010)

摘要:研究基于多波段激光数据聚类的电力屏柜压板状态图像位姿解算方法,提升电力屏柜压板状态图像位姿解算精度。利用激光传感器采集电力屏柜压板激光图像,采用自相关算法分类激光图像的多波段激光数据属性,利用多波段激光数据聚类方法对电力屏柜压板激光图像实施降维处理。从降维后的电力屏柜压板激光图像中,通过确定电力屏柜压板有效面积、有效尺寸以及有效形状,提取电力屏柜压板的形态特征。依据提取的电力屏柜压板形态特征,利用空间坐标变换关系,实现电力屏柜压板状态的位姿解算。实验结果表明,该方法可以利用电力屏柜压板激光图像的多波段激光数据聚类结果,精准解算电力屏柜压板状态,适用于变电站电力屏柜压板管理中。

关键词:多波段;激光数据聚类;电力屏柜;压板状态;图像;位姿解算

中图分类号:TP391;TP249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.019

Method for calculating the state image pose of the power panel cabinet pressing plate based on multi-band laser data clustering

ZHANG Xiao-di¹, LIU Ji-yun¹, WEI Ming-yue², WANG Ji-ya³, CUI Jing³, GUO Xin-lu¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Maintenance Company, Beijing 100073, China;

2. Artificial Intelligence on Electric Power System State Grid Corporation Joint Laboratory (GEIRI), Beijing 102209, China;

3. State Grid Beijing Electric Power, Beijing 100010, China)

Abstract: In this paper, a method for calculating the state image pose of the power panel cabinet platen based on multi-band laser data clustering is studied to improve the accuracy of the image pose calculation of the power panel cabinet platen state. A laser sensor is used to collect the laser image of the power panel cabinet pressing plate, the auto-correlation algorithm is used to classify the multi-band laser data attributes of the laser image, and the multi-band laser data clustering method is used to reduce the dimension of the power panel cabinet pressing plate laser image. From the laser image of the power panel press plate after dimension reduction, the morphological features of the power panel press plate are extracted by determining the effective area, effective size and effective shape of the power panel press plate. According to the extracted morphological features of the power panel cabinet pressing plate, the spatial coordinate transformation relationship is used to realize the pose calculation of the power panel cabinet pressing plate state. The experimental results show that the method can use the multi-band laser data clustering results of the

基金项目:国网北京市电力-主网运检管控平台全业务管控模块建设-实施项目(No. B70233190003)资助。

作者简介:张笑迪(1988-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新型电力系统与电力大数据应用。

E-mail:shacheng0838834@163.com

收稿日期:2022-08-08;修订日期:2022-10-21

laser image of the power panel cabinet to accurately calculate the state of the power panel cabinet, which is applicable to the management of the power panel cabinet in the substation.

Keywords: multi-band; laser data clustering; power panel cabinet; platen state; image; pose calculation

1 引言

采用激光成像仪采集电力屏柜压板状态图像时,激光图像中包含众多波段,光谱分析是激光图像应用中的重要部分。聚类分析和特征提取等方法是激光图像分析中的常见手段^[1]。多波段激光图像目前广泛应用于众多领域中。分析激光图像波段,是激光图像实际应用的重要手段。近年来针对激光图像处理的算法众多,将数据挖掘算法应用于激光图像数据挖掘中,利用数据挖掘的数据聚类算法对激光图像进行降维处理^[2-4],挖掘激光图像中包含的有用信息,提升激光图像的应用性能。

伴随我国经济高速发展,电力系统发展趋于规模化与复杂化,电力系统的运行安全可靠更为重要。为了保证电力系统的安全可靠运行,电力系统中二次设备的运行与维护水平具有极高的重要性^[5]。电力系统变电站的二次设备屏柜结构逐渐复杂化,电力屏柜压板数量逐渐增加。电力屏柜保护压板的管理水平是电力系统继电保护装置巡检的重要部分,电力系统电力屏柜需要具有较高的智能化以及信息化水平,满足变电站的智能化需求。电力系统的电力屏柜保护压板状态可以确定电力屏柜运行状态^[6-7],图像位姿解算是电力系统中压板运维管理的重要应用。图像位姿解算技术广泛应用于电力系统中电力屏柜压板状态辨识中,采集电力屏柜压板图像,对所采集的多波段激光图像进行数据聚类,对电力屏柜压板图像进行降维处理,利用降维处理后的图像实现压板位姿解算,应用于电力系统智能化运维系统中,具有较高的应用性。

目前针对保护压板状态识别的研究较多,袁朝晖等人将多策略分割方法应用于变电站保护压板状态识别中^[8],该方法通过变电站保护压板图像分割结果,实现变电站保护压板状态的有效识别,但存在光照敏感性过高的缺陷,光照环境影响保护压板的识别结果;梁辰等人利用聚类算法校核变电站保护压板状态^[9],但存在保护压板状态校核实时性差的缺陷。针对以上研究方法存在的缺陷,研究基于多波段激光数据聚类的电力屏柜压板状态图像位

姿解算方法,改善采用人工检测电力屏柜压板状态存在的检测效率低,浪费大量人力,压板误操作以及漏操作数量较高的情况。所研究方法通过电力屏柜压板激光图像解算电力屏柜压板状态位姿,有助于电力系统的智能化运维建设。利用多波段激光数据聚类结果,获取激光图像中的有效数据,实现电力屏柜压板状态图像的位姿解算。

2 电力屏柜压板状态图像位姿解算

2.1 多波段激光数据聚类的图像降维

利用激光传感器采集的电力屏柜压板激光图像中包含多波段激光数据,利用多波段激光数据聚类方法对电力屏柜压板激光图像进行降维处理,依据多波段特征属性对电力屏柜压板激光图像进行位姿解算。依据同波段激光数据的属性一致性,对多波段激光数据特征进行不同属性的分类^[10]。采用自相关算法实现多波段激光数据的属性分类,设置电力屏柜压板激光图像中的多波段激光数据的训练样本为 $x(t)$, 该训练样本的向量模式可表达为:

$$x(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{k-1}(t)]^T \quad (1)$$

式中, t 表示训练样本在多波段激光数据训练集中的位置。

电力屏柜压板激光图像中的多波段激光数据特征属性的隶属度函数表达式如下:

$$d_j = \sum_{i=0}^{k-1} [x_i(t) - w_{ij}x_i(t)]^2 \quad (2)$$

式中, $j = 0, 1, \dots, N-1$, $w_{ij} = (w_{0j}, w_{1j}, \dots, w_{k-1j})^T$ 表示自相关算法的加权系数,加权系数与多波段激光数据特征内数据转置对应。重复迭代处理公式(2),获取公式(2)的最小值,将所获取最小值作为多波段激光数据聚类的属性隶属度函数。

利用所获取的属性隶属度函数实现多波段激光数据聚类的电力屏柜压板激光图像降维处理^[11],融合多波段激光数据信息,获取电力屏柜压板激光图像多波段激光数据聚类的全局最优解。

电力屏柜压板激光图像的多波段激光数据聚类流程如下:

(1) 从电力屏柜压板激光图像中提取多波段激

光数据,用有限集 X 表示。依据所获取的有限集内不同波段计算数据的映射关系,确定电压屏柜压板激光图像的 k 个样本;

(2) 对所提取的 k 个样本进行量化处理,建立多波段激光数据聚类的自回归平均模型用 $A(m, n)$ 表示;

(3) 用 $y(x_k)$ 表示完成映射的电压屏柜压板激光图像的激光数据样本向量,利用映射向量获取可以体现不同波段属性类别的训练样本 $y'(x_k)$;

(4) 抽取训练集中的 t 组训练样本,获取训练样本向量用 $x(t)$ 表示;

(5) 计算各训练样本向量的属性隶属度函数 d_j , 重复迭代处理获取样本向量的最小属性隶属度函数,利用所获取的最小属性隶属度函数,获取多波段激光数据聚类的挖掘判据,利用多波段激光数据聚类结果实现电力屏柜压板状态激光图像的降维处理。

2.2 提取电力屏柜压板形态特征

完成电力屏柜压板激光图像的降维处理后,从完成降维处理的电力屏柜压板激光图像中提取电力屏柜压板的形态特征,利用电力屏柜压板形态特征对电力屏柜压板状态进行位姿解算。

电力屏柜压板的形态特征提取过程如下:

(1) 确定有效面积

用 V_i 表示电力屏柜压板状态的面积阈值,利用面积阈值 V_i 筛选电力屏柜压板激光图像中的有效压板区域表达式如下:

$$V_i = \varepsilon \times \sum_{i=1}^5 V_a(i)/5 \quad (3)$$

式中, $V_a(i)$ 与 ε 分别表示电力屏柜压板激光图像中像素从大至小排列的区域面积以及判断裕度,设置有效压板区域面积的判断裕度大小为 0.4。电力屏柜压板激光图像中,高于阈值 V_i 的图像区域为电力屏柜压板状态的有效面积区域^[12]; 小于阈值 V_i 的图像区域为电力屏柜压板激光图像中的背景干扰区域。

(2) 确定有效尺寸

电力屏柜压板激光图像中的有效压板尺寸为固定,有效压板区域在激光图像中的像素比为固定状态,即激光图像的 X 方向与 Y 方向的区域边界长度与图像 X 方向与 Y 方向像素大小之比为固定值。电

力屏柜压板激光图像中尺寸特征提取的尺寸阈值表达式如下:

$$\begin{cases} X_i = P_x/100 \\ Y_i = P_y/100 \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_x 与 P_y 分别表示激光图像在 X 方向与 Y 方向的像素值。电力屏柜压板激光图像沿 X 方向与 Y 方向的区域边界长度大于所设置阈值时,将该像素设置为有效的压板尺寸; 否则将该像素设置为电力屏柜压板激光图像的背景干扰区域。

(3) 确定有效形状

电力屏柜压板具有固定的形状,电力屏柜压板区域在激光图像中存在等效长宽比,设置电力屏柜压板有效形状的比例阈值 S_i 为 2。即电力屏柜压板形状的等效长宽比大于 2 时,该区域为电力屏柜压板的有效形状特征,否则视该像素点为背景干扰噪声。

通过以上过程,从完成降维处理后的电力屏柜压板激光图像中提取电力屏柜压板形态特征,依据激光图像的像素面积、像素尺寸以及等效长宽比,设置形态特征提取的联合阈值,降低提取电力屏柜压板形态特征时,由于光线等干扰噪声影响电力屏柜压板状态特征提取的缺陷。

2.3 电力屏柜压板状态位姿解算

电力屏柜压板状态位姿解算对于实时性要求较高,快速解算电力屏柜压板状态位姿的算法极为重要。依据所提取电力屏柜压板形态特征,利用空间坐标变换关系,实现电力屏柜压板状态的位姿解算。

电力屏柜压板激光图像中的三条直线向量 I_1 、 I_2 、 I_3 间存在约束条件如下:

(1) 所提取形态特征中的边 I_1 与 I_2 为垂直状态。

(2) 电力屏柜压板坐标系与激光传感器坐标系为刚体变换状态,坐标系变换时的长度固定^[13]。用 λ 表示电力屏柜压板边缘直线间的距离,用 q_{c1} 与 q_{c2} 分别表示所提取电力屏柜压板形态特征中,两条纵向直线与横向直线交点的起始点,存在 $|q_{c1}q_{c2}| = \lambda$ 。

(3) 所提取形态特征中的边 I_1 与 I_3 为平行状态。

电力屏柜压板中随机点 p_i 与激光传感器光心 o_c 的距离即光心深度用 ϕ_i 表示。激光传感器坐标系中,电力屏柜压板形态特征中随机点坐标表达式如下:

$$q_{c_i} = \left(\frac{\phi_i x_{i1}}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}}, \frac{\phi_i y_{i1}}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}}, \frac{\phi_i f}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}} \right) \quad (5)$$

式中, f 表示激光传感器的主光轴焦距。

利用直线方程求解结果, 获取激光传感器坐标系内 q_{c_1} 与 q_{c_2} 的坐标。已知光心深度时, 激光传感器坐标系中电力屏柜压板形态特征中的直线 l_2 表达式如下:

$$l_{c_2} = \left(\frac{\phi_1 x_{i1} - \chi_2 x_{i2}}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}}, \frac{\phi_1 y_{i1} - \chi_2 y_{i2}}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}}, \frac{\phi_1 f - \chi_2 f}{\sqrt{f^2 + x_{i1}^2 + y_{i1}^2}} \right) \quad (6)$$

依据成像几何学中的消失点 q_w , 利用向量 $\overrightarrow{o_c q_w}$ 表示电力屏柜压板的边缘线向量 l_{c_1}, l_{c_2} 。单位化处理所获取的向量^[14], 建立单位正交化矩阵 $A = \begin{bmatrix} \frac{l_{c1}}{|l_{c1}|}, \frac{l_{c2}}{|l_{c2}|} \end{bmatrix}$, 对应电力屏柜压板坐标系的单位正交化矩阵为 $B = \begin{bmatrix} \frac{l_{w1}}{|l_{w1}|}, \frac{l_{w2}}{|l_{w2}|} \end{bmatrix}$ 。电力屏柜压板坐标系旋转至激光传感器坐标系的旋转矩阵 H 利用 $HB = A$ 获取。

旋转矩阵 H 具有正交线性特征, 利用最小二乘问题解决旋转矩阵的线性方程组问题, 建立表达式如下:

$$\begin{cases} O = \min \| A - HB \|^2 \\ H^T H = I_3 \end{cases} \quad (7)$$

利用 Umeyama 定理变换所获取的单位正交化矩阵, 可得转换矩阵的姿态角表达式如下:

$$\theta_c = -\arcsin(H(3,2)) \quad (8)$$

公式(8)为电力屏柜压板在激光传感器坐标系的方向旋转角度, 转化为电力屏柜压板姿态角的旋转矩阵表达式如下:

$$H_w^b = H_w^c H \quad (9)$$

式中, H_w^c 与 H_w^b 分别表示激光传感器相对于电力屏柜压板的旋转矩阵以及旋转后的电力屏柜压板坐标系。

电力屏柜压板直线在电力屏柜压板坐标系中的表达式如下:

$$q'_{c_i} = q_{c_i} + \eta D_{wi} \quad (10)$$

式中, η 与 D_{wi} 分别表示实数以及方向向量。

依据激光成像原理, 电力屏柜压板直线 l_i, l'_i 与激光传感器光心 o_c 均处于相同的解析平面 N_i 中, 电力屏柜压板成像平面 l 的表达式用 z_i 表示, 解析平面表达式如下:

$$a_i x_i + b_i y_i + c_i z_i = 0 \quad (11)$$

式中, $n_i = (a_i, b_i, c_i)^T$ 表示单位法向量。

用 s_i 表示 l'_i 的单位向量, 其表达式如下:

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{(a_i + b_i)^2}} (b_i, -a_i, 0)^T \quad (12)$$

$o_c d_i$ 的单位向量 m_i 表达式如下:

$$m_i = \frac{(-a_i c_i, b_i c_i, (a_i + b_i)^2)^T}{|(-a_i c_i, b_i c_i, (a_i + b_i)^2)^T|} \quad (13)$$

利用以上公式获取电力屏柜压板图像解析平面 N_i 上的标准正交基 $[s_i, m_i]$ 。

用 ζ 表示解析平面上的随机向量, 其表达式如下:

$$\zeta = \frac{s_i s_i^T + m_i m_i^T}{s_i + m_i} \quad (14)$$

用 $K_i = s_i s_i^T + m_i m_i^T$ 表示共性面参数, 解析平面 N_i 内电力屏柜压板直线 l_i 上随机点 $Hq_{c_i} + T$ 的表达式如下:

$$Hq_{c_i} + T = Hq_{c_i} + K_i T \quad (15)$$

随机选取电力屏柜压板直线上的点^[15], 两点的共面性误差之和表达式如下:

$$E(H, T) = \sum_{i=1}^n \| (I_3 - HK_i)(Hq_{c_i} + T) \|^2 \quad (16)$$

令旋转矩阵的导数为 0, 获取电力屏柜压板平移向量的最优解表达式如下:

$$T = Hq_{c_i} \sum_{i=1}^3 (I_3 - K_i) \left(\sum_{i=1}^3 (K_i - I_3) \right)^{-1} \quad (17)$$

利用公式(17)解算电力屏柜压板状态的位置姿态, 输出电力屏柜压板状态图像位姿解算结果。

3 实例分析

为了验证所研究基于多波段激光数据聚类的电力屏柜压板状态图像位姿解算方法, 确定电力屏柜压板状态位姿有效性, 将该方法应用于某电力系统变电站的二次设备电力屏柜运维管理中。利用激光传感器采集电力屏柜压板激光图像, 利用所采集的电力屏柜压板激光图像解算电力屏柜压板位姿。选取 Thermo Scientific DXRxi 显微拉曼成像光谱仪作为采集电力屏柜压板激光多波段图像的仪器, 该仪

器的光谱分辨率为 8 nm。该仪器包含 320 个光谱波段,光谱范围从 400 ~ 2600 nm。所采集激光图像像元大小为 180 × 180,空间分辨率高达 22 m。成像光谱仪的波段信息如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪波段信息

Tab. 1 Band information of the imaging spectrometer

波段	数值/nm
蓝	415 ~ 565
红	80 ~ 620
黄	630 ~ 700
近红外	710 ~ 1050
短波红外	1060 ~ 2600

采用本文方法采集的电力屏柜压板激光光谱图像如图 1 所示。

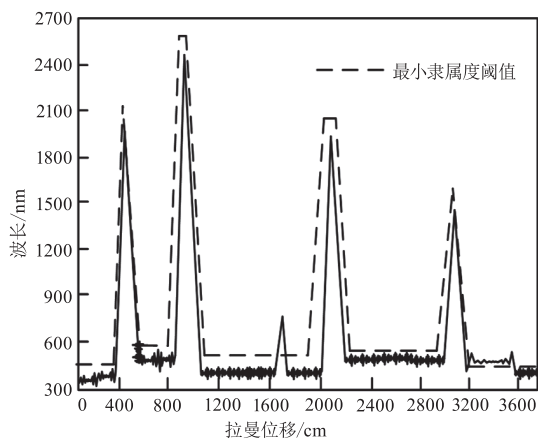


图 1 电力屏柜压板激光光谱图像

Fig. 1 Laser spectral image of power screen cabinet

采用本文方法利用多波段激光数据聚类算法,对电力屏柜压板激光光谱图像中的激光数据进行聚类处理,获取降维后的电力屏柜压板激光光谱图像如图 2 所示。

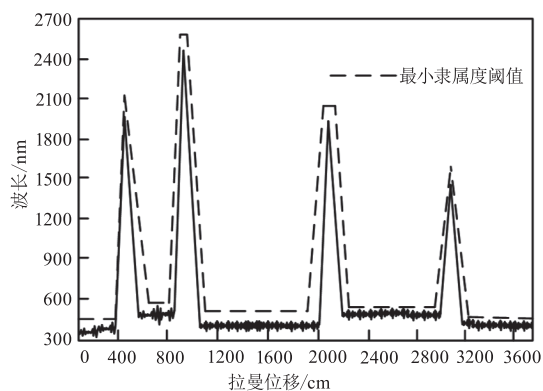


图 2 降维后电力屏柜压板激光光谱图像

Fig. 2 Laser spectrum image of power screen cabinet press after dimension reduction

通过图 1、图 2 实验结果可以看出,采用本文方法可以有效利用多波段激光数据聚类算法,根据各波段激光数据的最小隶属度阈值对电力屏柜压板激光图像进行降维处理。完成降维处理后的电力屏柜压板激光图像,有效过滤激光光谱不同波段中包含的噪声以及背景信息,保留阈值内的有效信息,为电力屏柜压板状态位姿精准解算提供依据。

采用本文方法提取的电力屏柜压板形态特征结果如图 3 所示。

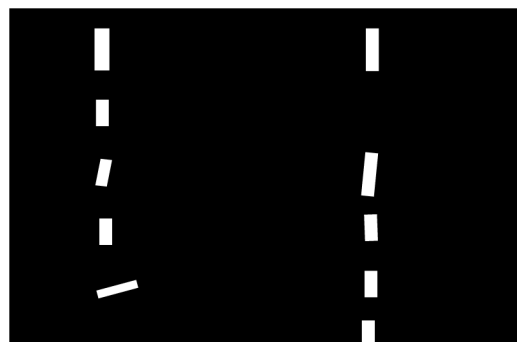


图 3 电力屏柜压板形态特征

Fig. 3 Form characteristics of power screen cabinet press plate

通过图 3 实验结果可以看出,采用本文方法可以精准提取电力屏柜压板形态特征,将所提取的电力屏柜压板形态特征作为电力屏柜压板状态位姿解算的重要依据。

依据本文方法提取的电力屏柜压板形态特征,对电力屏柜压板状态位姿进行解算,电力屏柜压板状态位姿解算结果如表 2 所示。

通过表 2 实验结果可以看出,采用本文方法可以有效解算不同光照强度下,电力屏柜压板激光图像中的压板位姿。电力系统二次设备运维人员可以依据电力屏柜压板激光图像的电力屏柜压板位姿解算结果,确定压板状态,实现电力屏柜内众多二次设备的运维管理。表 2 中采用本文方法解算的电力屏柜压板状态位姿结果,与实际电力屏柜压板状态位姿结果接近程度较高。在强度更高的 200 lx 光照下,本文方法获得的姿态角误差比 100 lx 光照误差高,但整体低于 5°,在可接受范围内。验证本文方法具有较高的电力屏柜压板状态位姿解算精度,可应用于电力屏柜压板状态位姿解算实际应用中。在实际应用中可尽量降低光照强度,提高精度。

表2 电力屏柜压板状态位姿解算结果

Tab. 2 Results of state position solution of power screen cabinet press plate

光照强度	压板序号	实际位置 /cm	解算位置 /cm	实际姿态角/(°)	解算姿态角/(°)
100/ lx	a	23.3,35.6,18.4	23.5,35.4,18.2	52.6	52.4
	b	54.6,58.4,23.5	54.3,58.7,23.3	34.8	34.6
	c	19.1,15.8,35.4	19.2,15.6,35.5	-45.8	-45.7
	d	38.4,25.4,45.6	38.6,25.6,45.8	59.6	59.8
	e	67.5,41.5,53.5	67.7,41.7,53.3	65.8	65.6
	f	8.9,23.5,61.7	9.1,23.7,61.9	48.5	48.3
200/ lx	a	8.6,9.5,10.5	8.8,9.9,10.7	123.6	123.2
	b	11.5,15.6,18.4	11.3,15.7,18.6	-90.5	-90.3
	c	23.5,25.1,29.5	23.3,25.3,29.4	84.5	84.8
	d	35.4,31.5,33.5	35.3,31.3,33.7	112.5	112.2
	e	41.8,43.5,44.8	41.9,43.4,44.6	-134.5	-134.3
	f	50.5,51.6,55.8	50.3,51.4,55.6	54.5	54.3

4 结论

伴随电力系统的信息化建设,电力系统的运维管理逐渐步入智能化操作,采集电力屏柜压板状态的激光图像,对所采集电力屏柜压板状态激光图像进行多波段激光数据聚类操作,将所获取的聚类结果作为电力屏柜压板状态图像位姿解算的重要依据。该方法可以避免采用人工巡检方式确定电力屏柜压板状态的实时性过低,导致影响变电站可靠运行的缺陷。通过实验验证,该方法可以应用于电力屏柜保护压板状态的位姿解算实际应用中,具有较高的适用性,有效解决采用人工巡检方式确定电力屏柜压板状态误操作过高的问题。电力屏柜压板状态的位姿解算结果可以作为变电站智能化运维的重要依据。

参考文献:

[1] Gao Song, Bai Lizhuo. Monocular camera-based three-point laser pointer ranging and pose estimation method [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 166 - 178. (in Chinese)
高嵩,白礼卓. 基于单目相机的三点式激光器测距及位姿估计方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 166 - 178.

[2] Lin Junyi, Zhang Ju, Li Longxi, et al. Next best measurement posture determination based on depth image adden-

city clustering [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(11): 3138 - 3147. (in Chinese)
林俊义,张举,李龙喜,等. 融合深度图像与密度聚类的下一最佳测量位姿确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(11): 3138 - 3147.

[3] Zhao Didi, Li Jiahui, Tan Fen, et al. Image registration algorithm based on smoothness constraint and cluster analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 156 - 162. (in Chinese)
赵迪迪,李加慧,谭奋利,等. 基于平滑约束和聚类分析的图像配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 156 - 162.

[4] Cao Xiong, Lin Zhaoxiang, Song Shalei, et al. Multispectral LiDAR point cloud denoising based on color clustering [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 499 - 506. (in Chinese)
曹雄,林兆祥,宋沙磊,等. 基于颜色聚类的多光谱激光雷达点云去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 499 - 506.

[5] Xia Xianzhao, Zhu Shixian, Zhou Yiyao, et al. LiDAR K-means clustering algorithm based on threshold [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics, 2020, 46(1): 115 - 121. (in Chinese)
夏显召,朱世贤,周意遥,等. 基于阈值的激光雷达K均值聚类算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 115 - 121.

[6] Zong Changfu, Wen Long, He Lei. Object detection based on euclidean clustering algorithm with 3D laser scanner [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2020, 50(1): 107 - 113. (in Chinese)
宗长富,文龙,何磊. 基于欧几里得聚类算法的三维激光雷达障碍物检测技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50(1): 107 - 113.

[7] Li Yu, Zhen Chang, Shi Xue, et al. Algorithm based on bandstatistical information weighted K-means for hyperspectral image classification [J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1119 - 1126. (in Chinese)
李玉,甄畅,石雪,等. 基于波段影像统计信息量加权K-means聚类的高光谱影像分类[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1119 - 1126.

[8] Yuan Zhaohui, Fu Wenlong, Li Bailin, et al. Protection platen status recognition for a smart substation based on multi-strategy segmentation and fusion and morphological feature identification [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 98 - 106. (in Chinese)

- 袁朝晖,付文龙,李佰霖,等. 基于多策略分割融合与形态特征辨识的变电站保护压板状态识别[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(1):98-106.
- [9] Liang Chen, Sun Jianwen, Wang Lanyu, et al. Application of clustering and evidence theory to checking the status of substation protection platen[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2343-2349. (in Chinese)
梁辰,孙建文,王兰玉,等. 应用聚类和证据理论实现变电站保护压板状态校核[J]. 电网技术, 2020, 44(6):2343-2349.
- [10] Wang Yang, Li Hengxuan, E Shiping, et al. State detection and recognition algorithm for hard platens of substation based on deep learning[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(6):676-680. (in Chinese)
汪洋,黎恒焜,鄂士平,等. 基于深度学习的变电站硬压板状态检测与识别算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(6):676-680.
- [11] Cao Pei, Xu Peng, He Jianming, et al. A intelligent method for insulation defect detection of switchgear based on multi-source sensing[J]. Electric Power, 2021, 54(10):117-124, 133. (in Chinese)
曹培,徐鹏,贺建明,等. 基于多源感知的开关柜绝缘缺陷检测技术[J]. 中国电力, 2021, 54(10):117-124, 133.
- [12] Wang Wei, Zhang Yanlong, Zhai Denghui, et al. Intelligent identification of substation pressure plate state based on OpenCV + SSD deep learning model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1):106-112. (in Chinese)
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.
- [13] Li Qinwen, Wang Zhiqian, Yang Wenchang, et al. Research on pose calculation method of binocular vision measurement system[J]. Computer Simulation, 2021, 38(5):214-218. (in Chinese)
李勤文,王志乾,杨文昌,等. 双目视觉测量系统位姿解算方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(5):214-218.
- [14] Feng Zhiyan, Wang Hanlong, Li Zhuang, et al. Design and application of state monitoring and anti-misoperation intelligent protection pressure plate[J]. Water Power, 2021, 47(2):93-96. (in Chinese)
冯志延,王翰龙,李壮,等. 状态监视及防误智能保护压板的设计与应用研究[J]. 水力发电, 2021, 47(2):93-96.
- [15] Zhou Ke, Yang Qianwen, Wang Yaoyi, et al. An improved SSD algorithm based on pressure plate status recognition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(1):69-76. (in Chinese)
周克,杨倩文,王耀艺,等. 一种改进的压板状态识别 SSD 算法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(1):69-76.