

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205324

三维点云分割的交联聚乙烯电缆接头参数测量*

邓磊^{1,2} 刘桂华^{1,2} 邓豪^{1,2} 周炳宏^{1,2}

(1. 西南科技大学信息工程学院 绵阳 621010; 2. 特殊环境机器人技术四川省重点实验室 绵阳 621010)

摘要: 针对现有参数测量方法难以对交联聚乙烯电缆接头各参数进行有效测量的问题,提出了一种基于三维点云分割的电缆接头参数测量方法。该方法先用半径滤波及随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法对复合式三维扫描仪获取的电缆接头点云进行噪声点去除及坐标摆正预处理。其次,使用 RANSAC 算法对电缆接头点云进行圆拟合,并根据区域交界处相邻拟合圆半径方差之比的突变特性实现粗分割,得到多个包含区域交界点的局部点云。然后,使用主成分分析法对局部点云进行法向量估计,并根据小片点云轴线夹角在区域交界点处的跳变特性及自适应阈值算法,得出各条状点云上的区域交界值。接着,对多个条状点云所得同一区域交界值进行统计分析实现电缆接头点云的精分割,完成参数测量。对多根电缆接头进行的测量实验结果表明,所提方法的绝对误差小于 1.0 mm,相对误差小于 4%,说明了该方法用于交联聚乙烯电缆接头参数测量的有效性与准确性。

关键词: 电缆接头;参数测量;三维点云分割;半径方差之比;法向量轴线夹角

中图分类号: TP391;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Parameter measurement of cross-linked polyethylene cable joint based on three-dimensional point cloud segmentation

Deng Lei^{1,2} Liu Guihua^{1,2} Deng Hao^{1,2} Zhou Binghong^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Key Laboratory of Special Environment Robotics of Sichuan Province, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing parameter measurement methods are difficult to effectively measure the parameters of cross-linked polyethylene cable joint, a cable joint parameter measurement method based on three-dimensional point cloud segmentation is proposed. Firstly, radius filtering and random sample consensus (RANSAC) algorithm are used to remove the noise points and preprocess the coordinate alignment of the cable joint point cloud obtained by the composite 3D scanner. Then, the RANSAC algorithm is used to fit the cable joint point cloud to a circle, and the rough segmentation is realized according to the mutation characteristic of the ratio of radius variance of adjacent fitting circles at the regional junction, so as to obtain multiple local point clouds containing regional junction points. Next, the normals of the local point clouds were estimated using principal component analysis, and the regional junction values were derived from the jump characteristics of the axial angles of the point clouds at the regional junction points and the adaptive threshold algorithm. Finally, a statistical analysis of the junction values of the same area obtained from multiple strip point clouds was carried out to achieve a fine segmentation of the cable joint point cloud and complete the parameter measurement. The results of the measurement experiments on several cable joints show that the absolute error of the proposed method is less than 1.0 mm and the relative error is less than 4%, which demonstrates the validity and accuracy of the method for measuring the parameters of cross-linked polyethylene cable joint.

Keywords: cable joint; parameter measurement; three-dimensional point cloud segmentation; ratio of radius variance; angle of normal axis

收稿日期: 2022-03-29 Received Date: 2022-03-29

* 基金项目: 广东电网公司广州供电局委托项目(080044KK52190002)、四川省科技厅重点研发项目(2021YFG0380)资助

0 引言

城市化的快速发展推动了电力系统的进步,高压电力电缆是都市电力系统的重要组成部分,在电力系统中起着至关重要的作用,而交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆具有良好的电气特性、绝缘性能、机械强度等优点,因此被广泛应用于高压和超高压线路中^[1-2]。XLPE 高压电力电缆系统由电缆和附件(中间接头和终端头,即电缆接头)组成,电缆间通过中间接头进行连接、电缆与其他设备间通过终端头进行连接^[3]。电缆接头往往是人工在户外制作,质量分散性较大,导致其成为电缆绝缘的薄弱部位和运行故障的典型部位。据统计数据表明,导致电力电缆绝缘故障的原因主要有外力破坏、敷设工艺不佳、绝缘老化和接头制造品质不良等,而电缆接头部位所引发的故障率最高^[4],一方面原因是将金属护套(屏蔽)和绝缘层割开制作接头时破坏了其电场分布,导致接头处的电场分布较电缆本体发生较大变化^[5],另一方面原因是目前难以对现场打磨的电缆接头的相关尺寸进行测量,导致非标电缆接头接入了电力系统,非标接头长时间在高电压的作用下会因局部放电而导致绝缘击穿。因此,对将安装的高压电缆接头进行相关参数的测量,是避免电缆接头带病运行,对保障电力系统安全、可靠运行具有重要意义^[6]。

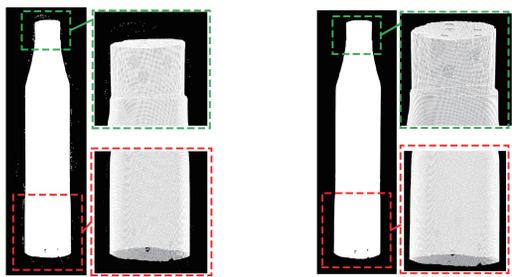
目前在工业领域技术人员大多使用游标卡尺等接触式测量工具对电缆接头等工件的参数进行测量,但此类测量方法存在效率低、精度差、成本高、且容易对被测物造成二次损伤等问题,难以满足测量需求,因此基于机器视觉的非接触式参数测量方式在近年来备受关注^[7]。在基于二维视觉方法的电缆参数测量方面,阴法明等^[8]、沈舷等^[9]、Wang 等^[10]通过采用 Sobel、Canny 边缘检测算子对电缆边缘进行提取,然后利用图像的灰度值变化对目标区域进行分割,实现了电缆护套厚度的测量。王爱军等^[11]先通过形态学运算获取图像的边缘信息,然后通过切线法定位圆心,再根据线性映射关系实现了电缆横截面直径和绝缘厚度等参数的测量。Lenty 等^[12]通过对电缆边缘进行提取,然后使用 Ramer-Douglas-Peucker 算法实现了电缆导体部分直径的测量。夏为东^[13]使用 Sobel-Zernike 亚像素轮廓提取方法对高压电缆轮廓进行提取,然后使用最小二乘法对轮廓进行特定模型拟合,实现了对高压电缆外径等参数的测量。从上述研究可以看出基于二维视觉测量技术的电缆参数测量算法大多以轮廓提取为前提,但轮廓提取的准确性易受图像质量影响,且二维图像难以表征物体的真实尺寸,因此通过尺寸映射获取电缆尺寸参数时,易受图像获取方式的影响^[14],导致精度与鲁棒性均较低。此外,电缆接头上多个区域交界

处的灰度值信息并无明显变化,所以此类方法难以对电缆接头的参数进行准确测量。但目前国内外都缺乏基于三维视觉的电缆参数测量方法,主要原因是受施工标准和制造工艺水平限制,目前难以通过自动化设备进行电缆接头的制作,而人工打磨的电缆接头,不仅表面存在多种打磨缺陷(如划痕、凹坑和凸起等),且不同技术人员打磨的电缆接头差异性较大,但基于三维视觉测量技术的工件参数测量方法却广泛应用于各个领域,如周光义^[15]、Liu 等^[16]、周密^[17]及张如如等^[18]通过结合图像处理与双目视觉技术实现了对圆柱体等简单工件的参数测量;Wang 等^[19]提出了一种基于表面结构光的三维测量算法,实现了对非漫反射物体表面的三维测量,对非漫反射工件的参数测量具有一定指导意义;刘家豪等^[20]将双目视觉与线结构光进行结合,一定程度上解决了使用双目视觉测量法对曲面工件测量效果不佳的问题;Long 等^[21]根据点云中点的密度差异实现目标区域局部点云求取,然后将三维点云投影为二维数据,并根据投影点的几何分布,实现了飞机零件之间间隙的测量。曾凯等^[22]采用移动线结构光平台获取弯管形工件表面点云,并使用 Delaunay 三角网生长算法对工件进行三维重构,实现了对弯管形工件的宽度、高度及内径的测量,但由于受重构精度影响,导致测量结果存在较大误差;Song 等^[23]利用点云配准,实现了对大尺寸制式工件的参数测量,但测量过程耗时较长。虽然这些基于三维视觉的参数测量方法无法直接用于电缆接头的参数测量,但对使用三维视觉测量技术实现电缆接头的参数测量具有一定指导意义。

因此,本文结合电缆接头的结构特征与三维点云处理技术提出了一种基于三维点云分割的 XLPE 电缆接头参数测量方法。该方法先采用圆柱拟合坐标摆正的方式解决了电缆接头点云的无序性问题;接着针对电缆接头区域分割时各区域之间的相互干扰问题,提出了基于拟合圆半径方差之比突变特性的粗分割方法,缩小区域交界点的分布范围;然后针对接头点云中单个点的轴线夹角易受缺陷影响的问题,提出了一种三维点云空间划分方式,对接头点云进行“抽条”及“切片”,求得条状点云及小片点云,以小片点云上所有点轴线夹角的均值替代单个点的轴线夹角;最后根据小片点云轴线夹角的跳变特性,设计的自适应阈值算法及统计分析法对电缆接头实现精分割,完成对电缆接头外半导体过渡带的轴向高度 A_1 、交联绝缘的轴向高度 A_2 、反应力锥的轴向高度 A_3 、内半导体层的轴向高度 A_4 、导体的轴向高度 A_5 及接头开线的轴向高度 A_6 的测量,为电力行业电缆接头的参数测量提供了新方法。

1 点云数据获取及预处理

本文使用思看科技的复合式三维扫描仪 KSCAN20 进行点云数据采集,该扫描仪利用双目视觉原理获得空间三维点云。使用扫描仪获取电缆接头表面点云的同时不可避免会产生一些噪声点^[24],为减小噪声点的影响,在进行坐标摆正、粗分割等处理前,本文先采用半径滤波^[25]去除原始接头点云中的噪声点。半径滤波设定点云中每个点在指定的半径范围内至少包含一定数量的近邻点,不满足则滤除。实验中,设定半径滤波的搜索半径为 1.0 mm,临近点数量为 10 个,电缆接头点云滤波前后对比如图 1 所示。

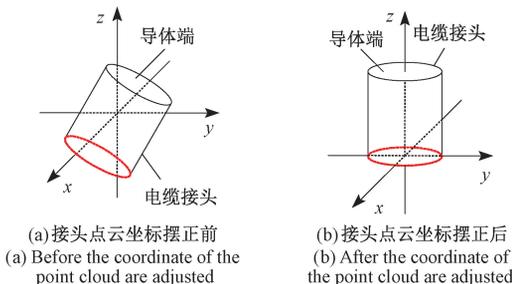


(a) 接头点云滤波前 (a) Joint point cloud before filtering
(b) 接头点云滤波后 (b) Joint point cloud after filtering

图 1 电缆接头点云滤波前后对比

Fig. 1 Comparison of joint point cloud before and after filtering

滤波后的电缆接头点云,虽然各点间的相对位置在空间中是确定的,但点云中各点在 x 、 y 、 z 任一维度上仍然无序^[26],为了便于后续处理,本文对滤波后的电缆接头点云进行了“坐标摆正”处理。电缆接头点云进行“坐标摆正”时,先使用 RANSAC 算法^[27]对其进行圆柱拟合,然后将圆柱轴线方向摆正为空间坐标系的 z 轴方向,电缆接头坐标摆正示意图如图 2 所示。



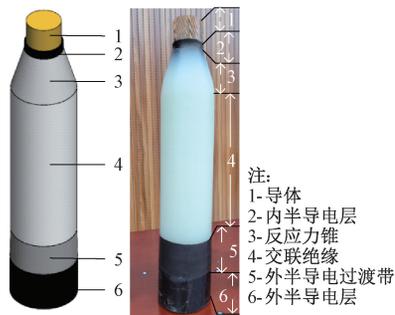
(a) 接头点云坐标摆正前 (a) Before the coordinate of the point cloud are adjusted
(b) 接头点云坐标摆正后 (b) After the coordinate of the point cloud are adjusted

图 2 电缆接头点云坐标摆正示意图

Fig. 2 Schematic diagram of point cloud coordinate alignment

2 电缆接头特征分析

在对点云进行分割时利用多个特征能有效避免过分割和欠分割,因此本文先对电缆接头的结构特性进行分析,得出其结构特征,本文所使用的 XLPE 电缆接头结构图及实物图如图 3 所示。



注:
1-导体
2-内半导体层
3-反应力锥
4-交联绝缘
5-外半导体过渡带
6-外半导体层

图 3 电缆接头结构示意图及实物图

Fig. 3 Schematic diagram and physical image of cable joint

2.1 拟合圆半径方差之比特性分析

针对类圆柱体结构的电缆接头点云,可将其沿轴线方向切分成多个圆,针对各个圆,采用圆拟合的方式得到圆的半径等信息。本文采用 RANSAC 算法进行圆拟合,RANSAC 是一种随机参数估计方法,该方法通过在样本空间中随机抽取子集来初始化模型,接着计算样本空间中所有样本与该模型的残差,并与给定阈值进行比较,从而将样本空间点划分为内点子集与外点子集,然后经过多次迭代,最终选取内点最多的子集作为该样本集的最佳模型估计。使用 RANSAC 算法对图 1 所示的电缆接头点云 M 进行圆拟合的步骤如下:

1) 将电缆接头点云 M 沿 z 轴方向进行等高度切分,得到各拟合圆所需的局部点云。电缆接头点云 M 中任意一点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 属于某拟合圆的判定方式如下:

$$\{p_r \in P_{circle}(i), [(i-1) \cdot d < z_r \leq i \cdot d]\} (d > 0) \quad (1)$$

式中: i 为拟合圆编号, $P_{circle}(i)$ 为拟合第 i 个圆的点集合, z_r 为点 p_r 的 z 坐标值, d 为每个圆的高度。

2) 从集合 $P_{circle}(i)$ 中随机选取 3 个点生成圆 C_{circle} , 计算 $P_{circle}(i)$ 中任意点 p_r 到 C_{circle} 的距离 D_x ;

3) 选取阈值 T_{th} , 若 $D_x < T_{th}$, 则点 p_r 被认为是内点, 统计出此拟合圆的内点个数 N ;

4) 重复步骤 2)~3), 选取内点个数最多的圆 C_{circle} 作为点集合 $P_{circle}(i)$ 的圆拟合结果;

5) 重复步骤 1)~4), 直到 M 中所有点均被遍历, 完成电缆接头点云的圆拟合。

使用 RANSAC 算法将电缆接头点云沿 z 轴方向进行

等间距拟合所得拟合圆的半径变化如图 4 所示。

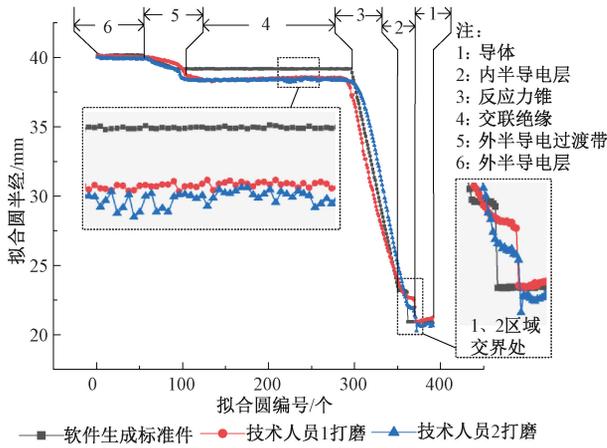


图 4 电缆接头点云拟合圆半径变化

Fig. 4 Variation of fitting circle radius of cable joint point cloud

从图 4 可以看出,从外半导体层区域至导体区域,拟合圆的半径整体上在逐渐变小,但由于电缆接头在剥离外半导体层时容易产生主绝缘划痕、外半导体断口剥离不整齐等缺陷,导致拟合圆的半径在局部上并非单调性变化。此外,内半导体层与导体交界处两相邻圆的半径在整条曲线中跳变最大,因此该交界点可用最大半径差进行求取,但其他区域相邻圆之间的半径变化较小且非单调,难以凭该特征实现对其他区域交界点的求取。但从图 4 可以得出,电缆接头的外半导体过渡带区域起点与反应力锥区域起点处具有起点左侧 n 个近邻拟合圆半径方差较小,右侧 n 个近邻拟合圆半径方差较大的特点;而区域终点具有终点左侧 n 个近邻拟合圆半径方差较大,右侧 n 个近邻拟合圆半径方差较小的特点。因此本文根据该结构特征实现电缆接头区域的粗分割,得到包含外半导体过渡带区域起点与终点、反应力锥区域起点与终点的局部点云,缩小区域交界点的分布范围,为增强该特征对区域交界点的表征能力,本文对该特征采用如式(2)所示的计算方式。

$$\begin{cases} V_b(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_{i+k} - r^b)^2 & (i \geq n) \\ V_f(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_{i-k} - r^f)^2 & (i \geq n) \\ F_b(i) = \frac{V_b(i)}{V_f(i)}, F_f(i) = \frac{V_f(i)}{V_b(i)} & (F_b > 0, F_f > 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为求半径方差的相邻拟合圆个数, $V_f(i)$ 、 $V_b(i)$ 分别为拟合圆 i 处前、后 n 个拟合圆的半径方差, r^f 、 r^b 分别为拟合圆 i 处前、后 n 个拟合圆的半径均值, $F_b(i)$ 为电缆接头点云拟合圆 i 处后 n 个拟合圆半径方差与前 n 个拟合圆半径方差的比值, $F_f(i)$ 为拟合圆 i 处前 n 个拟合圆

半径方差与后 n 个拟合圆半径方差的比值, $r_{i \pm k}$ 为电缆接头第 $i \pm k$ 个拟合圆的半径,图 1 所示电缆接头点云的拟合圆的 $F_b(i)$ 、 $F_f(i)$ 变化如图 5 所示, T 为式(7)中阈值。

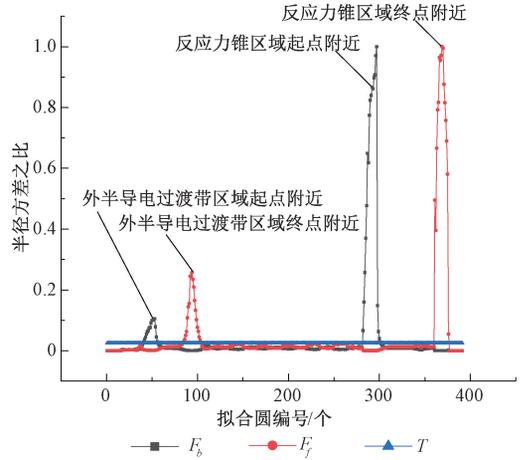


图 5 电缆接头点云拟合圆半径方差之比变化

Fig. 5 Variation of variance ratio of fitting circle radius

从图 5 中可以看出,外半导体过渡带区域与反应力锥区域具有起点附近 F_b 值较大、终点附近 F_f 值较大的特点。

2.2 小片片云轴线夹角特性分析

估计点云中一点的法向量问题近似于估计该点邻域一个相切面法向量的问题,点云中任意一点的相切面可以表示为:

$$ax + by + cz + D = 0 \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 为平面参数,也是该平面的法向量, D 为坐标系原点到相切面的距离。

求解平面方程最常用的方法有最小二乘法及主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[28],由于电缆接头表面存在划痕等缺陷,导致所获点云中存在干扰点,而最小二乘法对于干扰点的适应性较低,因此本文采用 PCA 算法对电缆接头点云进行法向量估计。对点云中任意一点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 进行法向量估计时,按式(4)使用其 m 邻域构建协方差矩阵 R ,并使用奇异值分解求取 R 的各特征值与特征向量,矩阵 R 的最小特征值 λ_0 对应的特征向量 v_0 即为点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 的法向量。

$$\begin{cases} \bar{p} = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m p_r \\ R = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m (p_r - \bar{p})(p_r - \bar{p})^T \\ R \cdot \vec{v}_j = \lambda_r \cdot \vec{v}_j, r \in \{0, 1, 2\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: m 是点 p_r 邻域点的数量, \bar{p} 表示最近邻元素的三维质心, λ_r 表示协方差矩阵 R 的第 r 个特征值, v_j 表示特征值 λ_r 的特征向量。参数 D 的计算方式如式(5)所示:

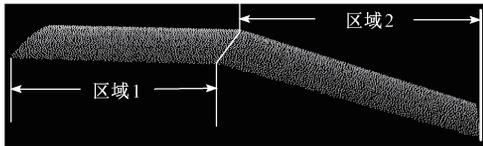
$$\begin{cases} D = -(\bar{ax} + \bar{by} + \bar{cz}) \\ \bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m x_r, \bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m y_r, \bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{r=1}^m z_r \end{cases} \quad (5)$$

式中： \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 分别为点 p_r 邻域点 x 坐标值、 y 坐标值、 z 坐标值的均值。

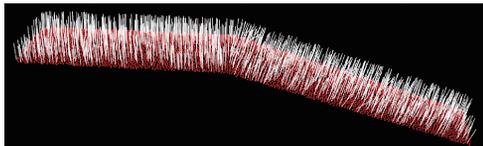
使用PCA算法估计的法向量的方向具有二义性,为其方向满足所需方向,需对其进行重定向,若点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 的法向量 $\vec{N}_r(a, b, c)$ 不满足式(6),则对其重定向。

$$\vec{N}_r \cdot (V_p - p_r) > 0 \quad (6)$$

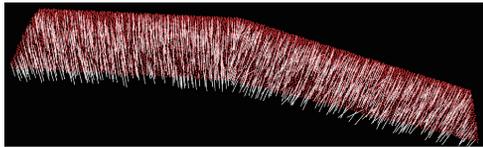
式中： \vec{N}_r 为点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 的法向量, V_p 为视点。使用PCA算法对电缆接头局部点云进行法向量估计结果及重定向结果如图6所示。



(a) 电缆接头区域交界点附近局部点云
(a) Local point cloud near the junction in the cable joint area



(b) 图(a)点云法线重定向前
(b) Point cloud normals of figure (a) before redirecting



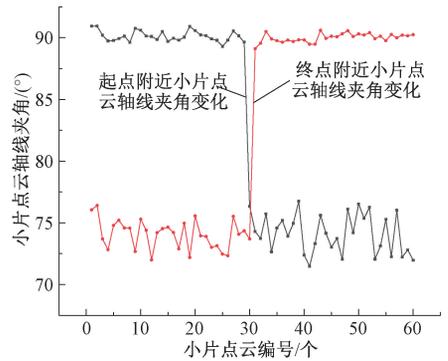
(c) 图(a)点云法线重定向后
(c) Point cloud normals of figure (a) after redirecting

图6 电缆接头局部点云法线估计结果

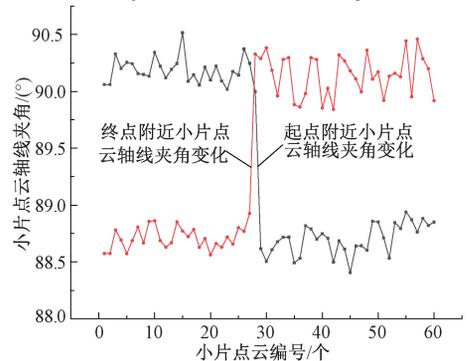
Fig. 6 Estimation results of cable joint local point cloud normals

从图6可以看出,电缆接头点云同一区域内各点法向量的轴线夹角之差较小,而不同区域间各点法向量的轴线夹角之差较大。因此本文使用“抽条”“切片”方法获得局部小片点云,并以局部小片点云法向量轴线夹角的跳变特性实现精分割,图7为电缆接头外半导体过渡带、反应力锥区域起点、终点附近小片点云的轴线夹角变化情况。

从图6及7可以看出,同一区域小片点云的轴线夹角并不是固定值,而是在较小范围内波动,即轴线夹角之差较小,但在区域交界处,相邻小片点云的轴线夹角会发生较大跳变。



(a) 反应力锥区域交界点附近小片点云轴线夹角变化
(a) Axis angle variation of piece point cloud near the junction of anti-stress cone region



(b) 外半导体过渡带区域交界点附近小片点云轴线夹角变化
(b) Axis angle variation of piece point cloud near the outer semi-conductive transition zone

图7 区域交界点附近小片点云轴线夹角变化

Fig. 7 Axis angle change of piece point cloud near the junction

3 电缆接头区域分割

点云分割是指利用一个或多个特征将无序的点云数据,分割成若干类别子集的过程,每个子集中的数据具有相同或相近的属性。

3.1 拟合圆半径方差之比粗分割

根据对电缆接头拟合圆半径方差之比的分析结果及图5可知,相比其他区域,外半导体过渡带与反应力锥起点附近的 F_b 值较大,终点附近的 F_f 较大,因此,可以使用该特征进行粗分割缩小电缆接头两区域起点与终点的分布范围,减少非交界区域干扰,提高检测精度,据此特征设计的粗分割算法步骤如下,图8为粗分割流程示意图。

1) 使用RANSAC算法对预处理后的电缆接头点云沿 z 轴方向等间距进行圆拟合;

2) 根据圆拟合结果及式(2)计算第 i 个拟合圆处相邻拟合圆的半径方差之比 $F_f(i)$ 、 $F_b(i)$;

3) 根据求得的 $F_f(i)$ 、 $F_b(i)$ 值及式(7)计算电缆接头外半导体过渡带与反应力锥两区域起点的拟合圆编号集合与终点的拟合圆编号集合;

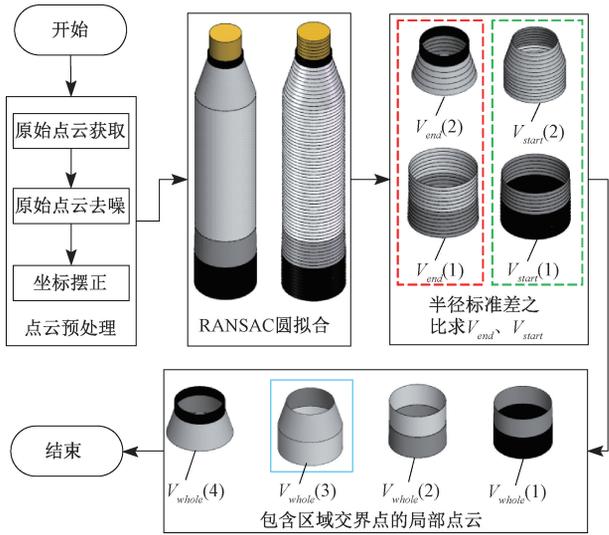


图 8 拟合圆半径方差之比粗分割流程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the rough segmentation for variance ratio of fitting circle radius

$$\begin{cases} i \in V_{start}, (F_b(i) > T) \\ i \in V_{end}, (F_f(i) > T) \end{cases} \quad (7)$$

式中: i 为拟合圆编号, V_{start} 为外半导体过渡带、反应力锥两个区域起点附近的拟合圆编号集合, V_{end} 为外半导体过渡带、反应力锥两个区域终点附近的拟合圆编号集合, T 为图 5 中所示阈值。

4) 由图 5 可知, 集合 V_{start} 、 V_{end} 中包含外半导体过渡带与反应力锥两个区域起点、终点附近多个拟合圆编号, 为避免分割时区域间的相互干扰, 按式 (8) 对 V_{start} 、 V_{end} 中元素进行聚类:

$$\begin{cases} S_h \in V_{start}(e), [|S_h - S_{h+1}| \leq 15] \\ O_h \in V_{end}(e), [|O_h - O_{h+1}| \leq 15] \end{cases} \quad e = 1, 2 \quad (8)$$

式中: S_h 、 O_h 为 V_{start} 、 V_{end} 集合中的第 h 个元素, 其值为拟合圆的编号, $V_{start}(e)$ 为第 e 个区域起点附近的拟合圆编号集合, $V_{end}(e)$ 为第 e 个区域终点附近的拟合圆编号集合。

5) 根据 $V_{start}(1)$ 、 $V_{start}(2)$ 、 $V_{end}(1)$ 、 $V_{end}(2)$ 集合中元素对应拟合圆的编号, 得到包含外半导体过渡带起点 $V_{whole}(1)$ 、终点 $V_{whole}(2)$ 、反应力锥区域起点 $V_{whole}(3)$ 、终点 $V_{whole}(4)$ 交界点的 4 个局部点云。

3.2 小片片云法向量轴线夹角精分割

由电缆接头的结构特征及拟合圆半径方差之比特性可知, 理想情况下电缆接头区域 e 的起点为 $V_{start}(e)$ 集合中 F_b 值最大处, 终点为 $V_{end}(e)$ 集合中 F_f 最大处, 但由于受打磨缺陷、扫描精度及拟合误差等因素的影响, 导致此分割结果与实际结果存在偏差, 因此本文对粗分割所得

局部点云进行“抽条”、“切片”处理得到小片片云, 并基于小片片云轴线夹角的跳变特性进行精分割以提升分割精度, 从粗分割得到的 $V_{start}(e)$ 、 $V_{end}(e)$ 局部点云中获取区域起点、终点的精分割步骤如下(以取反应力锥区域起点为例, 包含反应力锥区域起点的局部点云为 $V_{whole}(3)$), 图 9 为精分割流程示意图。

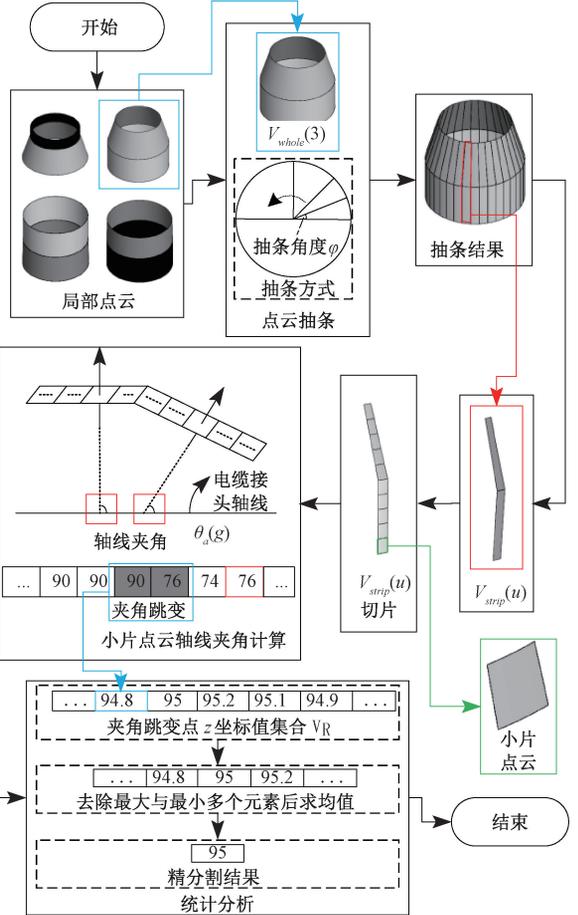


图 9 小片片云轴线夹角精分割流程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the fine segmentation process of piece point cloud axis angle

1) 用 PCA 法向量估计算法对点云 $V_{whole}(3)$ 进行法向量估计, 并据式 (9) 计算各点法向量与电缆接头轴向量的轴线夹角 θ_r :

$$\theta_r = \arccos \left[\frac{(x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + z_1 \cdot z_2)}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \right] \quad (9)$$

式中: $\vec{n}_1(x_1, y_1, z_1)$ 为点云 $V_{whole}(3)$ 中任意一点的法向量, $\vec{n}_2(x_2, y_2, z_2)$ 为电缆接头轴向量。

2) 将 $V_{whole}(3)$ 按等角度“抽条”为多个条状点云, 如图 9 所示, 局部点云 $V_{whole}(3)$ 中任意一点 $p_i(x_r, y_r, z_r)$ 属于某条状点云的判定方式如式 (10) 所示:

$$\begin{cases} \alpha_r = \arctan | (y_r/x_r) |, (x_r > 0, y_r > 0) \\ \alpha_r = 90^\circ + \arctan | (y_r/x_r) |, (x_r < 0, y_r > 0) \\ \alpha_r = 180^\circ + \arctan | (y_r/x_r) |, (x_r < 0, y_r < 0) \\ \alpha_r = 270^\circ + \arctan | (y_r/x_r) |, (x_r > 0, y_r < 0) \\ p_r \in V_{strip}(u), [(u-1) \cdot \varphi < \alpha_r \leq u \cdot \varphi] \end{cases} \quad (10)$$

式中： u 为条状点云编号， $V_{strip}(u)$ 为 $V_{whole}(3)$ 局部点云抽条得到的第 u 个条状点云， φ 为抽条角度， α_r 为点 $p_r(x_r, y_r, z_r)$ 与 x 轴的夹角。

3) 将条状点云沿 z 轴方向等间距“切片”为多个片状点云，取各小片点云上所有点的轴向夹角计算平均轴线夹角 $\theta_a(g)$ 作为各小片的片轴线夹角；

4) 按式(11)计算各条上的区域交界点，并将条状点云得到的区域交界点的 z 坐标值存至集合 V_R ；

$$\begin{cases} \theta_e = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 \theta_{ai} \right) \quad \theta_b = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 \theta_{bi} \right) \\ T_h = | \theta_e - \theta_b | \\ Z_g = \frac{1}{n} \left(\sum_{r=1}^n z_r \right) \\ Z_g = V_R, [| \theta_a(g) - \theta_a(g+1) | > r \cdot T_h] \quad (r > 0) \end{cases} \quad (11)$$

式中： θ_e, θ_b 分别为第 u 个条状点云上起始、最后 5 个小片轴线夹角的均值， T_h 为第 u 个条状点云上起始 5 个小片的轴线夹角均值与最后 5 个小片的轴线夹角均值之差， Z_g 为第 u 个条状点云上第 g 个小片点云上所有点的 z 坐标值的平均值， $\theta_a(g)$ 为条状点云 u 上第 g 个小片点云的轴线夹角， r 为比例系数；

5) 对 $V_{whole}(3)$ 抽条所得所有条状点云重复步骤 3) ~ 4)，最终集合 V_R 中的元素个数等于点云 $V_{whole}(3)$ 的抽条条数。为增强算法对表面缺陷的抗干扰性，对 V_R 中所有元素进行排序后，去除 V_R 集合中两端多个元素，取剩下所有元素计算均值作为反应力锥区域起点。

4 电缆接头区域分割与参数测量实验

为了验证所提方法对电缆接头参数测量的有效性与精度，本文对南网工匠大学清河校区专业技术人员制作的多根真实电缆接头，及软件生成的尺寸标准的电缆接头点云进行了测量实验，被测电缆接头结构示意图如图 10 所示，其中各参数含义及计算方式如表 1 所示。

各电缆在进行参数测量时均在同一实验平台进行，实验平台为 Intel Core i7-11700K, 32 GB 内存，程序开发平台，Visual Studio2015@PCL1. 8. 1。并使用相对误差与绝对误差对测量精度进行量化评价^[29-30]，计算方法如下：

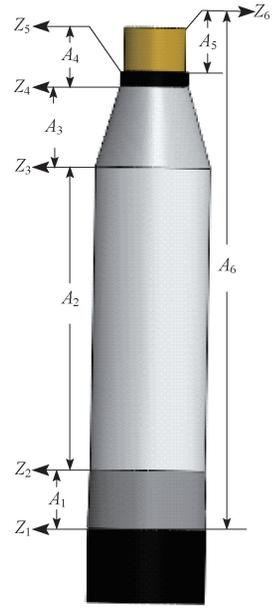


图 10 电缆接头被测参数结构示意图
Fig. 10 Diagram of measured parameters of cable joint

表 1 电缆接头被测量参数含义及计算方式

Table 1 The explanation of measured parameters and calculation method of cable joint

测量参数	被测参数含义	被测参数计算方法
A_1	外半导体过渡带轴向高度	$Z_2 - Z_1$
A_2	交联绝缘轴向高度	$Z_3 - Z_2$
A_3	反应力锥轴向高度	$Z_4 - Z_3$
A_4	内半导体轴向高度	$Z_5 - Z_4$
A_5	导体轴向高度	$Z_6 - Z_5$
A_6	接头开线轴向高度	$Z_6 - Z_1$

$$\begin{cases} E(x) = x^* - x \\ E_r(x) = [| E(x) | / x^*] \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中： $E(x)$ 为绝对误差， $E_r(x)$ 为相对误差， x^* 为被测量精确值， x 为测量值，其中人工打磨电缆接头的精确值 x^* ，均由南网工匠大学清河校区的多个专业技术人员通过游标卡尺等工具多次测量取平均所得，精度为 1.0 mm。图 11 中展示了多个电缆接头的区域分割效果（不同颜色代表不同区域），表 2 为图 11 对应电缆接头的参数测量结果，试验时式(1)中 $d = 0.75$ (mm)，式(2)中 $k = 20$ ，式(7)中 $T = 0.03$ ，式(10)中 $\varphi = 9^\circ$ ，式(11)中 $r = 0.6$ 。

从图 11 可以看出，所提算法在对不同技术人员打磨的电缆接头及软件生成的标准接头进行区域分割时，均能取得较好的分割效果。

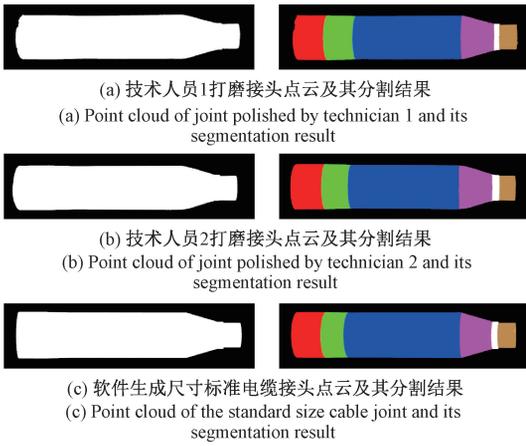


图 11 电缆接头点云区域分割结果

Fig. 11 Region segmentation of cable joints point cloud

表 2 电缆接头参数测量结果

Table 2 Measurement results of cable joint parameter

技术人员 1 打磨接头测量结果						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
设计最佳值	40	205	55	10	30	340
x^*/mm	44.5	202.5	58.5	9.5	31.5	346.5
x/mm	45.4	203.3	57.6	9.7	30.6	345.7
$E(x)/\text{mm}$	-0.9	-0.8	0.9	-0.2	0.9	0.8
$E_r(x)$	2.0%	0.4%	2.0%	2.0%	3.0%	0.2%
技术人员 2 打磨接头测量结果						
x^*/mm	42.5	203.5	57.5	11.5	28.5	343.5
x/mm	43.3	202.6	56.7	11.9	29.3	344.3
$E(x)/\text{mm}$	-0.8	0.9	0.8	-0.4	-0.8	-0.8
$E_r(x)$	2.0%	0.4%	1.0%	3.0%	3.0%	0.2%
尺寸标准电缆接头点云测量结果						
x^*/mm	40	205	55	10	30	340
x/mm	40.2	205.3	54.8	10.1	29.9	340.4
$E(x)/\text{mm}$	-0.2	-0.3	0.2	-0.1	0.1	-0.4
$E_r(x)$	0.5%	0.2%	0.4%	1.0%	0.3%	0.1%
人工测量耗时/分	10					
算法测量耗时/分	0.47 (三维模型点数:约 890 000)					

由表 2 数据可知,本文所提算法对尺寸标准的电缆接头点云进行参数测量时,绝对误差小于 0.5 mm、相对误差小于 2%,而对不同技术人员打磨的含有缺陷的电缆接头进行参数测量时,其绝对误差均小于 1.0 mm、相对误差均小于 4%。

此外,为直观展示所提算法中关键参数对测量精度的影响,本文对式(1)中拟合圆高度 d 、式(10)中抽条角度 φ 、式(11)中比例系数 r ,使用控制变量法对同一技术人员打磨的电缆接头的反应力锥轴向高度(多个技术人员测量平均值:57.5 mm)及外半导体过渡带轴向高度(多个技术人员测量平均值:43.5 mm)进行了测量及误差分析,实验结果如表 3、4、5 所示。

表 3 拟合圆高度 d 对测量精度的影响 ($r=0.6, \varphi=9$)
Table 3 Variation of measurement accuracy depend on the height of fitting circle d ($r=0.6, \varphi=9$)

	$d = 0.25$	$d = 0.5$	$d = 0.75$	$d = 1$	$d = 1.25$
A_3/mm	59.36	55.68	57.96	58.32	55.19
$E(x)/\text{mm}$	-1.86	1.82	-0.46	-0.82	2.31
A_1/mm	40.31	45.86	42.76	45.18	39.67
$E(x)/\text{mm}$	3.19	-2.36	0.74	-1.68	3.83

由表 3 数据可知,随着拟合圆高度 d 的逐渐变大,测量精度呈先上升后下降的趋势,这是由于当 d 过小时,参与圆拟合的点过少,导致拟合误差较大且易受缺陷影响,而 d 过大时,拟合圆数量过少,拟合圆半径方差之比误差增大。

表 4 抽条角度 φ 对测量精度的影响 ($r=0.6, d=0.75$)

Table 4 Variation of measurement accuracy depend on the strip angle φ ($r=0.6, d=0.75$)

	$\varphi = 3$	$\varphi = 6$	$\varphi = 9$	$\varphi = 12$	$\varphi = 15$
A_3/mm	53.97	54.89	57.96	57.16	57.39
$E(x)/\text{mm}$	3.53	2.61	-0.46	0.34	0.11
A_1/mm	46.68	41.64	42.76	42.63	42.56
$E(x)/\text{mm}$	-3.18	1.86	0.74	0.87	0.94

由表 4 数据可知,在抽条角度 φ 由小变大的过程中,算法测量精度逐渐上升并趋于稳定,这是由于 φ 过小时,局部小片点云过少,轴线夹角易受缺陷影响,但当抽条角度 φ 持续增大时,会降低统计分析法的作用,导致算法对缺陷的抗干扰能力下降,因此在对电缆接头参数进行测量时该值设为 9° 。

表 5 比例系数 r 对测量精度的影响 ($d=0.75, \varphi=9$)

Table 5 Variation of measurement accuracy depend on the ratio r ($d=0.75, \varphi=9$)

	$r = 0.2$	$r = 0.4$	$r = 0.6$	$r = 0.8$	$r = 1.0$
A_3/mm	49.23	51.79	57.96	58.36	56.69
$E(x)/\text{mm}$	8.27	5.71	-0.46	-0.86	0.81
A_1/mm	51.36	49.37	42.76	43.38	—
$E(x)/\text{mm}$	-7.86	-5.87	0.74	0.12	—

由表 5 数据可知,当比例系数 r 由小变大时,算法精度呈先上升后下降的趋势,这是由于当 r 过小时,同区域内的小片点云轴线夹角波动对算法测量精度的影响较大,导致算法抗干扰性较低,而当 r 过大时,又难以找出满足条件的轴线夹角跳变点,造成测量误差增大。

由算法原理可知,对电缆接头标准点云测量时,其误差来源于圆拟合时的拟合误差及小片点云轴线夹角跳变点的切片误差,而对技术人员打磨接头进行测量时,其误差来源除拟合误差及切片误差外,还来源于技术人员的测量误差与数据获取时的重建误差。

5 结 论

针对现有参数测量方式对电缆接头进行参数测量时,存在效率低、精度差以及容易对被测接头造成二次损伤的问题,本文提出了一种基于三维点云分割的XLPE电缆接头参数测量方法,其主要贡献如下:

1) 从三维角度分析了电缆接头的结构特性,给出了可用于其区域分割的两个关键结构特征,并通过实验验证了该特征用于电缆接头区域分割的有效性。

2) 采用粗分割得到包含区域交界点的局部点云,精分割得到多个区域交界值,对多个值进行统计分析求取区域交界点的区域分割与参数测量方式,实现了对电缆接头的非接触式测量。

3) 分析了算法中各参数对测量精度的影响,较为完备的阐述了各参数的内在关联性,并对误差来源进行了分析。

本文提出的基于三维点云分割的电缆接头参数测量方法在对不同技术人员打磨的含有不同缺陷的电缆接头进行参数测量时,虽然绝对误差小于1.0 mm,相对误差小于4%,具有较高的测量精度,但该方法的实时性较低,因此后续可在降低测量耗时及取得更高的测量精度方面进行探索,此外,由于传统基于阈值的接头参数测量方法的泛化性较低,因此可尝试将该方法与深度学习进行融合,使其具有更稳定的分割效果。

参考文献

- [1] 饶显杰, 徐忠林, 陈勃, 等. 基于频域反射的电缆缺陷定位优化方法[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3681-3659.
RAO X J, XU ZH L, CHEN B, et al. Cable defect location optimization method based on frequency domain reflection[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3681-3659.
- [2] 王孟夏, 周生远, 杨明, 等. 计及海底电缆热特性的可接纳海上风电装机容量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 195-202.
WANG M X, ZHOU SH Y, YANG M, et al. Assessment method for acceptable installed capacity of offshore wind farms considering thermal characteristics of submarine cables [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 195-202.
- [3] ZHOU X, CAO J, WANG S, et al. Simulation of electric field around typical defects in 110 kV XLPE power cable joints [C]. International Conference on Circuits. IEEE, 2017.
- [4] 阳林, 李昭红, 郝艳捧, 等. 工作温度和绝缘温差约束下的高压直流电缆接头载流量计算[J]. 电力系统

自动化, 2016, 40(18): 129-134.

YANG L, LI ZH H, HAO Y P, et al. Calculation of current-carrying capacity of HVDC cable joint under constraints of operating temperature and temperature difference of insulating layer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 129-134.

- [5] CHEN S, XIA Y, SHAO X, et al. Analysis and countermeasure of 110 kV cable joint defects [C]. 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2019.
- [6] SUN C, WANG C. Assessment study of aging life for typical defects in XLPE cable joints [C]. 2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), 2020.
- [7] XIANG R, HE W, ZHANG X, et al. Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads [J]. Measurement, 2018: 106-116.
- [8] 阴法明, 王康, 赵力. 电缆护套厚度灰度矩亚像素测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 128-133.
YIN F M, WANG K, ZHAO L. Sub-pixel edge detection algorithm based on gray-moment for thickness measurement of cable sheath material [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 125-133.
- [9] 沈舷, 周锋, 赵力. 基于局部区域灰度亚像素法电缆护套厚度精确测量[J]. 电测与仪表, 2016, 53(8): 62-28.
SHEN X, ZHOU F, ZHAO L. A sub-pixel edge detection algorithm based on local area gray-scale of thickness measurement of cable sheath material [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(8): 62-68.
- [10] WANG J L, LI Z. Measurement of cable thickness based on sub-pixel image processing [J]. IEEE, 2011: 38-41.
- [11] 王爱军, 田东哲, 李宇翔, 等. 基于切线法定位圆心的电缆横截面几何尺寸自动测量方法的设计与实现[J]. 郑州大学学报(理学版), 2018, 50(2): 114-118.
WANG AI J, TIAN D ZH, LI Y X, et al. Design and realization of automatic measuring method of cable cross section geometry based on tangent method [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2018, 50(2): 114-118.
- [12] LENTY B, SIOMA A, KWIEK P. Quality control automation of electric cables using machine vision [C]. Photonics Applications in Astronomy, Communications,

- Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 2018.
- [13] 夏为东. 基于机器视觉的高压电缆关键尺寸测量系统研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
XIA W D. Research on measuring system of key dimensions of high voltage cable based on machine vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2020.
- [14] WANG Y, CHEN Y, ZHANG X, et al. Research on measurement method of leaf length and width based on point cloud[J]. Agriculture, 2021, 11(1):63.
- [15] 周光义. 基于双目视觉的低对比度三维几何参数测量技术研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2021.
ZHOU G Y. Research on low contrast 3D geometric parameter measurement based on binocular vision[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2021.
- [16] LIU W, JIA Z, WANG F, et al. An improved online dimensional measurement method of large hot cylindrical forging[J]. Measurement, 2012, 45(8):2041-2051.
- [17] 周密. 基于双目视觉的滴丸几何参数在线测量技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
ZHOU M. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [18] 张如如, 葛广英, 申哲, 等. 基于 HALCON 的双目立体视觉工件尺寸测量[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(1):59-63.
ZHANG R R, GE G Y, SHEN ZH, et al. Measuring dimension of parts of binocular vision based on HALCON[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(1):59-63.
- [19] WANG J, ZHOU Y, YANG Y. A novel and fast three-dimensional measurement technology for the objects surface with non-uniform reflection [J]. Results in Physics, 2019, 16:102878.
- [20] 刘家豪, 贺赛先. 基于双目便携式三维扫描技术的小工件测量[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7):31-41.
LIU J H, HE S X. Measurement of small workpiece on portable 3-D scanning technology based on stereo vision[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7):31-41.
- [21] LONG K, XIE Q, LU D, et al. Aircraft skin gap and flush measurement based on seam region extraction from 3D point cloud [J]. Measurement, 2021, 176(6):109169.
- [22] 曾凯, 王福斌, 刘贺飞, 等. 基于线结构光点云三维重建的弯管形工件测量方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(4):1477-1482.
- ZENG K, WANG F B, LIU H F, et al. Measurement of elbow-shaped workpiece based on 3D reconstruction of line structured light point cloud[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(4):1477-1482.
- [23] SONG L, LIN D, PENG X, et al. Two-stage point cloud registration for 3D measurement of large workpieces[C]. 2021 16th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). IEEE, 2021: 500-505.
- [24] 叶一飞, 王建中. 基于点云的复杂环境下楼梯区域识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4):124-133.
YE Y F, WANG J ZH. Stair area recognition in complex environment based on point cloud [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4):124-133.
- [25] 彭婷, 陈时健, 任利杰, 等. 三偏心蝶阀密封面在位测量的点云数据处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12):30-38.
PENG P, CHEN SH J, REN L J, et al. A point cloud data processing method for in-position measurement of sealing surface of triple eccentric butterfly valves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12):30-38.
- [26] WANG T, LIU L, ZHANG H, et al. High-resolution point cloud reconstruction from a single image by redescription [C]. 2020 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW). IEEE, 2020.
- [27] 邱佳月, 赖际舟, 方玮, 等. 一种基于动态剔除和场景匹配的 Robust SLAM 方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3):249-257.
QIU J Y, LAI J ZH, FANG W, et al. A robust SLAM method based on eliminating dynamic points and matching scenes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3):249-257.
- [28] ARTAC M, JOGAN M, LEONARDIS A. Incremental PCA for on-line visual learning and recognition[C]. 2002 International Conference on Pattern Recognition. IEEE, 2002, 3: 781-784.
- [29] CHANG S, ZHANG Y. Research of online measurement and inspection approaches for 2.5 dimensional workpieces [C]. IEEE International Conference on Information & Automation. IEEE, 2015.
- [30] WANG Z, GUO D, WANG Y, et al. Research on self-calibration strategy of workpiece processing based on machine vision [C]. 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). IEEE, 2021: 1-3.

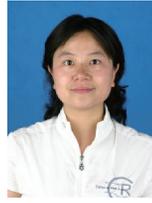
作者简介



邓磊, 2020年于西南科技大学城市学院获得学士学位, 现为西南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉与三维测量。

E-mail: 3523713131@qq.com

Deng Lei received his B. Sc. degree from City College of Southwest University of Science and Technology in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Southwest University of Science and Technology. His main research interests include machine vision and three-dimensional measurement.



刘桂华, 1993年于西南科技大学获得学士学位, 2001年于武汉理工大学获得硕士学位, 2012年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南科技大学教授, 主要研究方向为机器视觉以及信息处理。

E-mail: liughua_swit@163.com

Liu Guihua received her B. Sc. degree from Southwest University of Science and Technology in 1993, M. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2001 and Ph. D. degree from Southwest Jiaotong University in 2012, respectively. Now she is a professor in Southwest University of Science and Technology. Her main research interests include machine vision and information processing.