光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023031203

基于三维激光点云的隧道电缆敷设质量参数自动检测方法

郑维刚[1*]，赵振威[1]，唐　红[1]，张忠瑞[2]，杨　鑫[3]，杨泓悦[4]，苗　腾[3]

（1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院，沈阳 110006；2. 国网辽宁省电力有限公司，沈阳 110006；
3. 沈阳农业大学 信息与电气工程学院，沈阳 110161；4. 国网辽宁营销服务中心，沈阳 110168）

摘　要： 电力电缆敷设不规范是导致绝缘故障的主要原因，影响电缆的安全运行。当前电缆敷设质量检测多采用人工接触式测量，主观性强、精度低，容易对敷设区域造成二次损伤。文章提出一种基于点云的隧道电缆敷设质量参数自动检测方法。首先在电缆敷设施工位置获取隧道电缆点云数据；之后基于隧道的结构特征分割出电缆点云；最后，基于颜色和形态特征从电缆点云中分割出敷设区域并自动测量敷设质量参数。所提出的电缆和敷设区域点云分割算法的平均精确度、召回率、F1 分数均大于 0.92，自动测量的 4 个敷设质量参数平均绝对误差均小于 0.35 mm。试验表明，该方法可以准确定位电缆敷设区域，并对敷设质量参数进行自动精准测量。

关键词： 三维激光点云；电缆敷设；点云分割；计算机视觉

中图分类号： TP391；TM757　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0460－07

Automatic Detection Method for Tunnel Cable Laying Quality Parameters Based on Three-dimensional Laser Point Cloud

ZHENG Weigang[1], ZHAO Zhenwei[1], TANG Hong[1], ZHANG Zhongrui[2],
YANG Xin[3], YANG Hongyue[4], MIAO Teng[3]

（1. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, CHN;
2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, CHN;
3. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, CHN;
4. State Grid Liaoning Marketing Service Center, Shenyang 110168, CHN）

Abstract: Non-standard laying of power cables is the main cause of insulation failure, which affects the safe operation of cables. At present, the quality detection of cable laying mostly adopts manual contact measurement, which has strong subjectivity and low accuracy, and is easy to cause secondary damage to the laying area. In order to solve this problem, an automatic detection method of tunnel cable laying quality parameters based on point cloud is proposed. Firstly, the tunnel cable point cloud data was obtained at the cable laying construction position. After that, the cable point cloud was segmented based on the structural characteristics of the tunnel. Finally, the laying area was segmented from the cable point cloud based on color and morphological features, and the laying quality parameters were automatically measured. The average accuracy, recall rate and F1 score of the cable and laying area point cloud segmentation algorithm proposed in this study are all greater than 0.92, and the average absolute error of the

收稿日期：2023－03－12.

基金项目：国网辽宁省电力有限公司科技项目(2022YF-116)；国家自然科学基金项目(61903264).

* **通信作者：**郑维刚　**E-mail：**67812094@qq.com

four laying quality parameters measured automatically is less than 0.35 mm. Experiments show that this research method can accurately locate the cable laying area and automatically and accurately measure the laying quality parameters.

Key words: 3D laser point cloud; cable laying; point cloud segmentation; computer vision

0　引言

电缆敷设质量直接影响电缆的安全运行，据统计数据表明，电缆敷设过程不规范是导致电力电缆绝缘故障的主要原因[1]。电缆敷设施工过程中，一些关键敷设区域的几何尺寸（如电缆绝缘间距、封铅长度等）可作为质量参数用于评估施工质量。当前，技术人员多使用游标卡尺等接触式测量工具对敷设区域的几何参数进行测量，并通过照相记录关键敷设工序的完工状态。这种测量方式主观性强、精度差，容易对敷设区域造成二次损伤[2]；同时，二维图像也很难准确记录敷设区域的工况状态，后续出现质量问题时难以精确分析故障原因。

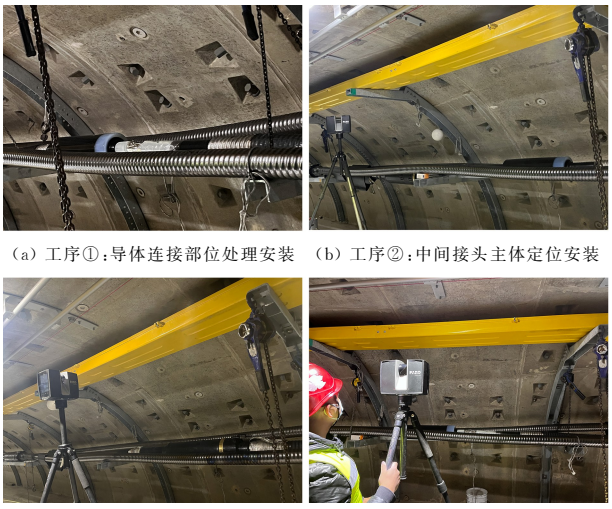
近年来，基于计算机视觉的电缆参数非接触测量技术取得了显著进展[3]；魏煌涛[4]使用彩色图提取电缆的中心线，通过贝塞尔曲线模型拟合得到电缆的曲线表达式，获得电缆相关参数；邹丽君[5]采用基于相位信息的边缘检测算法提取边缘轮廓，实现了对电缆绝缘层厚度的测量；张格悠等[6]采用金字塔 L-K 光流法和 SURF 特征点检测实现了对电缆护套断裂伸长率的测量；阴法明等[7]采用 Sobel 边缘检测和亚像素重定位算法实现了对电缆护套厚度的测量。上述基于图像的电缆参数测量技术对物体真实尺寸的表征能力较弱，测量精度不高。

基于三维点云的测量技术可精准重建待测物体的三维结构和空间方位，对几何参数的测量更加精准，因此在电力电缆检测领域逐步得到应用。游安清等[8]提出一种电力电缆、电塔和地面点云的分类方法，为机载激光雷达电力巡线过程中的输电系统净空排查提供了技术支持。李军阔等[9]结合圆柱面拟合与卡尔曼滤波技术实现了地下电缆点云的自动提取。麻卫峰等[10]提出一种基于激光点云的高压电缆覆冰厚度估测方法，实现了覆冰平均厚度的快速反演。邓磊等[11]使用半径滤波、RANSAC 等算法对交联聚乙烯电缆接头点云进行噪声点去除、圆拟合和部件分割，实现了对反应力锥参数的测量。

现有基于点云的电缆测量技术多用于对未敷设的电缆附件和敷设完成投入运行的电力电缆进行定位识别或参数测量，难以对电缆敷设施工过程中的质量参数进行检测。针对该问题，本研究以地下隧道电缆敷设为例，提出一种基于三维点云的电缆敷设质量关键参数自动解析方法。该方法首先对电缆敷设过程的关键工序进行三维颜色点云数据采集，再基于点云的空间分布、形态及颜色特征，对电缆点云和电缆敷设区域点云进行实例分割，最后对敷设区域的电缆绝缘间距、绝缘件长度和封铅长度三类质量参数进行自动测量。该方法可辅助施工和验收人员实现电缆敷设位置信息的高效准确分析和施工质量校核，从而降低电缆工程施工风险，以及减少电缆故障。

1　三维点云数据获取

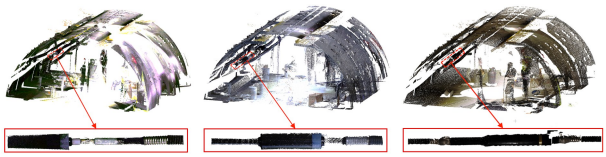
本研究利用 FARO Focus Premium 三维激光扫描仪对电缆敷设过程中的电缆导体连接部位进行处理及安装（工序①，图 1(a)）、中间接头主体定位安装（工序②，图 1(b)）以及电缆与金属套封铅处理三个关键工序（工序③，图 1(c)）进行彩色点云数据采集。采集点云时，首先将多个标定球摆放在待测电缆附件周围，且确保所有标定球不在同一平面。之后，利用 FARO 扫描仪分别在电缆附件安装位置的正前方、左前方和右前方 3 个不同位置进行点云数据采集（图 1(d)）。最后，利用 3D Sphere软件将



(a) 工序①：导体连接部位处理安装　(b) 工序②：中间接头主体定位安装

(c) 工序③：电缆与金属套封铅处理　(d) 点云数据采集过程

图 1　电缆敷设过程关键工序点云采集现场图



(a) 工序①点云数据 (b) 工序②点云数据 (c) 工序③点云数据

图 2 电缆附件敷设工况场景三维点云数据

3 组点云数据进行拼接，并采用统计滤波算法[12]将点云密度低的噪声区域删除，得到电缆敷设工况场景三维点云数据，如图 2，其中各子图红色框内为各工序敷设区域点云数据的放大效果。

2 敷设区域分割与质量参数测量

电缆敷设工况场景三维点云中包含隧道、工人、敷设工具、电缆和敷设区域等多类别点云，需要从中分割出电缆敷设区域点云进行参数测量。本文提出一种电缆敷设区域点云自动分割算法，通过隧道内壁点云去除、电缆点云分割和敷设区域点云分割三个步骤，实现对电缆敷设区域点云的自动准确提取。

2.1 隧道内壁点云去除

隧道内壁点云由地面和四周墙壁点云构成，本研究通过隧道内部建筑结构特征对其进行去除。每次数据采集时，由于标定球和激光扫描仪的放置位置不一致，得到的每组隧道点云数据会位于不同的坐标系中，为便于后续分割，本研究根据隧道空间分布构建隧道标准坐标系，并将点云从原始坐标系转换至标准坐标系中。

设隧道点云集合 $\boldsymbol{P}=\{\boldsymbol{p}_i\}$，$i=1,2,\cdots,m$，其中 m 为点云数量。构建集合 $\boldsymbol{P}$ 的去中心化矩阵 $\boldsymbol{X}_{3\times m}$：

$$\boldsymbol{X}_{3\times m}=[\boldsymbol{p}_1-\boldsymbol{p}_c,\boldsymbol{p}_2-\boldsymbol{p}_c,\cdots,\boldsymbol{p}_m-\boldsymbol{p}_c]$$

$$\boldsymbol{p}_c=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{p}_i \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{p}_c$ 为集合的重心坐标。计算 $\boldsymbol{X}_{3\times m}$ 的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}_{3\times3}=(\boldsymbol{X}_{3\times m})(\boldsymbol{X}_{3\times m})^{\mathrm{T}}$，对其进行谱分解可得：

$$\boldsymbol{C}_{3\times3}=(\boldsymbol{U}_{3\times3})(\boldsymbol{\Lambda}_{3\times3})(\boldsymbol{U}_{3\times3})^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{\Lambda}_{3\times3}$ 为对角矩阵，其对角线上的三个元素 σ_1，σ_2，σ_3 为 $\boldsymbol{C}_{3\times3}$ 对应的特征值，$\boldsymbol{U}_{3\times3}$ 的每一列均为 $\boldsymbol{C}_{3\times3}$ 的特征向量。设矩阵 $\boldsymbol{C}_{3\times3}$ 最大特征值 σ_1 对应的特征向量为 $\boldsymbol{u}_1$，第二大特征值 σ_2 对应的特征向量为 $\boldsymbol{u}_2$，最小特征值 σ_3 对应的特征向量为 $\boldsymbol{u}_3$，根据隧道结构特征，其延展方向距离最长，因此与 $\boldsymbol{u}_1$ 平行；本研究中涉及的隧道高度小于宽度，因此 $\boldsymbol{u}_2$ 与隧道宽度方向平行；$\boldsymbol{u}_3$ 与隧道高度方向平行。令 $\boldsymbol{p}_c$ 为标准坐标系的原点，$\boldsymbol{u}_1$ 为 X 轴，$\boldsymbol{u}_2$ 为 Y 轴，$\boldsymbol{u}_3$ 为 Z 轴，则将隧道点云集合中任意点 $\boldsymbol{p}_i$ 从原始坐标系的坐标 $(\boldsymbol{p}_i(x);\boldsymbol{p}_i(y);\boldsymbol{p}_i(z))$ 转换到隧道标准坐标系坐标 $(\boldsymbol{p}'_i(x);\boldsymbol{p}'_i(y);\boldsymbol{p}'_i(z))$ 的变换公式如下：

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}'_i(x)\\ \boldsymbol{p}'_i(y)\\ \boldsymbol{p}'_i(z)\\ 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}_1(x) & \boldsymbol{u}_1(y) & \boldsymbol{u}_1(z) & 0\\ \boldsymbol{u}_2(x) & \boldsymbol{u}_2(y) & \boldsymbol{u}_2(z) & 0\\ \boldsymbol{u}_3(x) & \boldsymbol{u}_3(y) & \boldsymbol{u}_3(z) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & \boldsymbol{p}_c(x)\\ 0 & 1 & 0 & \boldsymbol{p}_c(y)\\ 0 & 0 & 1 & \boldsymbol{p}_c(z)\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{p}_i(x)\\ \boldsymbol{p}_i(y)\\ \boldsymbol{p}_i(z)\\ 1\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{u}_i(x)$，$\boldsymbol{u}_i(y)$，$\boldsymbol{u}_i(z)$ 分别表示 $\boldsymbol{u}_i$ 向量在原始坐标系下的三维坐标（$i=1,2,3$），$\boldsymbol{p}_c(x)$，$\boldsymbol{p}_c(y)$ 和 $\boldsymbol{p}_c(z)$ 分别表示重心坐标 $\boldsymbol{p}_c$ 在原始坐标系下的三维坐标。

通过公式(2)得到的 $\boldsymbol{u}_3$ 向量正方向不确定，导致标准坐标系的 Z 轴正方向即可能指向隧道顶部，也可能指向地面，从而影响后续内壁点云去除。本研究根据隧道结构特点对标准坐标系的 Z 轴进行对齐矫正，使其正方向指向隧道顶部。设标准坐标系下隧道点云 Z 坐标的最大值为 $z_{\max}$，提取所有 Z 坐标大于 $0.95\times z_{\max}$ 的点云，并计算它们在 Y 坐标的最大值 $y^1_{\max}$ 和最小值 $y^1_{\min}$，则它们在 Y 轴的跨度 $y_1=y^1_{\max}-y^1_{\min}$；提取 Z 轴坐标小于 $0.05\times z_{\max}$ 的点云，并计算它们在 Y 坐标的最大值 $y^2_{\max}$、最小值 $y^2_{\min}$ 和 Y 轴跨度 $y_2-y^2_{\max}-y^2_{\min}$。由于隧道顶部点云呈圆弧形，因此隧道最顶部点云的 Y 轴跨度会小于地面点云的 Y 轴跨度。基于上述观察，如果 $y_1>y_2$，则当前 Z 轴正方向已经指向隧道顶部，所有点云的 Z 坐标不变；否则所有点的 Z 坐标乘以 -1。

在标准坐标系下，地面点云的 Z 坐标较小（图 3(a)），因此可通过直通滤波[13]进行地面点云去除。本研究将 Z 坐标小于 $0.1\times z_{\max}$ 的点云分割为地面点云（图 3(b)）。去除地面之后，剩余的隧道墙壁近似非完整的圆柱曲面，本研究采用 RANSAC 算法[14]



(a) 隧道原始点云 (b) 地面点云提取 (c) 四周墙壁点云提取 (d) 隧道内壁点云去除

图 3 隧道内壁点云去除过程（子图中红色和蓝色点云分别表示为地面和四周墙壁）

对内壁点云进行圆柱曲面拟合(图 3(c))。隧道内壁点云去除后的结果如图 3(d)所示。

2.2　电缆点云分割

去除内壁点云之后，剩余点云类别主要包括支撑钢架、电缆、工作人员和敷设工具，如图 3(d)所示。在隧道中，上述各类点云彼此间的相对位置不固定，为电缆点云的分割带来了难度。

观察发现，电缆和支撑钢架中的顶部横梁会沿着隧道的延展方向连续分布，相比其他类别点云，两者的 X 坐标分布均呈现连续性强且跨度大的特征，但两者在隧道中的高度分布不同，因此可将点云的 X 坐标连续性和 Z 坐标分布作为先验知识辅助电缆点云分割。首先提取 Z 坐标大于 $0.85\times z_{\max}$ 的点云作为支撑钢架中的顶部横梁，如图 4(a)所示，将其删除后，剩余支撑钢架点云的 X 坐标将不再连续。之后采用欧式聚类方法[15]将剩余点云分割为若干点云集合，如图 4(b)所示。计算每个点云集合的 X 坐标跨度，值最大的点云集合为整体电缆点云实例，如图 4(c)所示，它包含了所有电缆以及与电缆挨在一起的其他物体点云。采用 DBSCAN 算法[16]对整体电缆点云进行实例分割，并估算每个点云实例的 X 坐标跨度，跨度大于 $d_{\mathrm{m}}/2$ 的实例为分割得到的单根电缆点云实例，如图 4(d)所示，其中 d_{m} 为所有实例 X 坐标跨度的最大值。最后对电缆实例进行编号，便于用户对每个电缆实例进行选择。根据单根电缆实例中点云 Y 坐标绝对值的最大值可以判断其与隧道墙壁的距离，值越大表示距离越小，该电缆的编号越小。用户可通过编号来提取正在进行敷设的电缆点云实例。

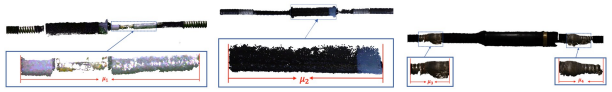


(a) 顶部横梁点云分割结果　(b) 欧式聚类分割结果　(c) 电缆点云提取结果　(d) 电缆点云实例分割结果

图 4　电缆点云分割过程(不同颜色点云代表不同分割实例，相同颜色点云为同一实例)

2.3　电缆敷设区域点云分割与质量参数测量

正在进行敷设的电缆点云实例由敷设区域点云和电缆自身点云构成。图 5 展示了不同工序下电缆敷设区域点云的位置和样式。工序①中敷设区域是电缆导体连接时进行绝缘处理的区域，该区域的待测质量参数为两侧电缆绝缘间距参数 μ_1；工序②的敷设区域是橡胶绝缘接头安装后所在位置，该区域待测参数为绝缘件长度参数 μ_2；工序③的敷设区域为金属套及其与电缆连接处的封铅区域，待测参数为两端的封铅长度参数 μ_3 和 μ_4。



(a) 工序①的电缆敷设区域点云及其待测质量参数　(b) 工序②的电缆敷设区域点云及其待测质量参数　(c) 工序③的电缆敷设区域点云及其待测质量参数

图 5　三个工序中的电缆辐射区域及其待测质量参数

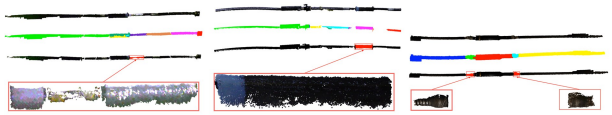
本研究根据不同工序中电缆敷设区域点云的几何和颜色特征差异设计分割方法，具体步骤如下：

步骤 1：计算点云曲率。构建 K-D 树寻找每个点云的 K 近邻点集合[17]，利用公式(2)计算每个点云 K 近邻点集的 3 个特征值 σ_1，σ_2 和 σ_3，则点云的曲率为 $\sigma_3/(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)$。

步骤 2：电缆部件分割。本研究在基于曲率的点云区域增长分割[18]算法流程中加入对邻域点云颜色相似度的判别，形成一种基于颜色和曲率的区域增长算法对电缆点云进行部件分割，如表 1，最终形成若干点云实例集合，如图 6。

表 1　基于颜色和曲率区域增长算法的伪代码

算法输入：待分割点云集合 $\boldsymbol{P}'=\{\boldsymbol{p}'_i\}$，每个点均包含坐标、颜色和曲率信息；颜色阈值参数 c_{th}，曲率阈值参数 σ_{th}；
步骤 1：创建一个空的点云集合序列 $\boldsymbol{C}$ 存放分割实例；创建空的点云队列 $\boldsymbol{Q}$ 存放种子点；创建空的点云集合 $\boldsymbol{R}$；将点云 $\boldsymbol{P}'$ 中的每个点标记为未处理；
步骤 2：计算 $\boldsymbol{P}'$ 中每个点 $\boldsymbol{p}'_i$ 与其 32 近邻点间的颜色距离，并取最小值作为点 $\boldsymbol{p}'_i$ 的颜色极值；
步骤 3：从 $\boldsymbol{P}'$ 内未处理的点云中，选择颜色极值最小的点作为种子点加入集合 $\boldsymbol{Q}$ 中；
步骤 4：从 $\boldsymbol{Q}$ 中取出一点 $\boldsymbol{p}'_s$，寻找该点的 32 近邻点集合，将所有近邻点标记为已处理并拷贝至集合 $\boldsymbol{R}$ 中；计算近邻点与 p_i^1 的颜色距离与曲率差，将颜色距离小于 c_{th}、曲率差小于 d_{th} 的点作为新的种子点加入 $\boldsymbol{Q}$ 中；循环执行该步骤，直至 $\boldsymbol{Q}$ 集合为空；
步骤 5：将集合 $\boldsymbol{R}$ 添加到集合序列 $\boldsymbol{C}$ 中，并将 $\boldsymbol{R}$ 置空；
步骤 6：循环执行步骤 3～5，直到所有点均标记为已处理，区域生长算法结束；序列 $\boldsymbol{C}$ 中的所有点云集合即为分割出的点云实例。



(a) 工序①的电缆敷设区域分割结果　(b) 工序②的电缆敷设区域分割结果　(c) 工序③的电缆敷设区域分割结果

图 6　电缆敷设区域分割结果(子图中从上到下依次为原始电缆点云、基于颜色和曲率的区域增长分割结果、部件分割结果、分割出的敷设区域点云)

步骤 3：基于颜色的敷设区域点云识别。首先计算每个实例点云集合的颜色归一化均值向量。设

第 i 个实例集合中有 m_i 个点云，其中第 j 个点的颜色向量为 (r_j, g_j, b_j)，则该实例的颜色归一化均值向量 $\boldsymbol{c}_i$ 由式(4)计算：

$$\boldsymbol{c}_i = \frac{1}{m_i}\left(\sum_{j=1}^{m_i}\frac{r_j}{r_j+g_j+b_j}, \sum_{j=1}^{m_i}\frac{g_j}{r_j+g_j+b_j}, \sum_{j=1}^{m_i}\frac{b_j}{r_j+g_j+b_j}\right) \tag{4}$$

设 $\boldsymbol{c}$ 为用户输入的电缆敷设区域颜色向量，分别计算每个实例 $\boldsymbol{c}_i$ 与 $\boldsymbol{c}$ 的欧式距离，距离最小的实例即为敷设区域点云(图 6)。本研究在分割工序①、工序②、工序③敷设区域点云时，向量 $\boldsymbol{c}$ 分别设为(0.329,0.328,0.343)、(0.274,0.308,0.418)和(0.404,0.336,0.26)。

利用分割出的电缆敷设区域点云计算敷设质量参数 $\mu_1 \sim \mu_4$。从图 5 可以看出，4 个质量参数均可看作敷设区域点云主成分方向的投影长度。因此，可使用公式(2)计算敷设区域点云的特征向量 $\boldsymbol{u}_1$，再计算这些点云在 $\boldsymbol{u}_1$ 上的投影坐标，投影坐标间的最大距离即为对应电缆敷设区域的质量参数。

2.4 算法性能评估

采用精确度、召回率和 F1 分数[19]对电缆、电缆敷设区域点云的分割精度进行评估。利用 CloudCompare 软件从隧道点云中手动分割出电缆和敷设区域点云作为分割真实值。评估点云分割精度时，对于第 λ 个实例点云集合，用 T_λ 表示属于该实例的点云被正确分割为该实例的点云数量，用 F_λ 表示不属于该实例的点云被误分割成该实例的点云数量，用 N_λ 表示属于该实例的点云被误分割为其他实例的点云数量，该实例点云的精确度 P_λ 和召回率 R_λ 可通过式(5)计算：

$$P_\lambda = \frac{T_\lambda}{T_\lambda + F_\lambda}; R_\lambda = \frac{T_\lambda}{T_\lambda + N_\lambda} \tag{5}$$

设分割实例总数为 M，则点云分割算法的精确度 P_r、召回率 R_e 和 F1 分数 F_1 可通过式(6)计算：

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{M}\sum_{\lambda=1}^{M} P_\lambda \\ R_e &= \frac{1}{M}\sum_{\lambda=1}^{M} R_\lambda \\ F_1 &= 2\frac{P_r \times R_e}{P_r + R_e} \end{aligned} \tag{6}$$

使用绝对误差[20]评价本研究方法对电缆敷设质量参数的测量准确度，利用现场人工测量结果作为真实值。绝对误差的计算公式如下：

$$E_{abs} = | y_{true} - y_{pred} | \tag{7}$$

式中，y_{true} 为实测真值，y_{pred} 为算法自动提取值。

3 结果与分析

本研究方法在配置为 3.00 GHz CPU、DDR 64 G 内存的工作站上运行，并对 10 组电缆敷设场景点云(每组场景均包含 3 个工序)进行测试。图 7、8 分别为电缆实例分割结果和电缆敷设区域分割结果可视化图，从图中可以看出，本研究方法可以在大场景隧道点云中较精确地提取出单根电缆点云和敷设区域点云。电缆点云的分割精度如表 2 所示，从表中可以看出，三个工序对电缆点云的分割精度差别不大，平均 F1 分数均能达到 0.945 以上。表 3 展示了敷设区域点云的分割精度，其中工序③敷设区域的召回率相较其他工序明显降低，其原因在于工序③中封铅区域的物体材质为金属铅，表面颜色呈现高光特征，会反射周边物体颜色，导致该区域颜色不连续，因此会出现欠分割。



(a) 工序①的电缆实例分割结果　(b) 工序②的电缆实例分割结果　(c) 工序③电缆实例分割结果

图 7 三个工序下电缆实例分割结果(图中红、绿、蓝三种颜色代表电缆的实例分割结果)



(a) 工序①的电缆敷设区域分割结果　(b) 工序②的电缆敷设区域分割结果　(c) 工序③的电缆敷设区域分割结果

图 8 三个工序下电缆敷设区域分割结果(图中红色代表缆敷设区域分割结果)

表 2 电缆点云分割精度

分割场景	平均精度	平均召回率	平均 F1 分数
工序①	0.952	0.971	0.961
工序②	0.965	0.980	0.972
工序③	0.951	0.961	0.955

表 3 电缆敷设区域点云分割精度

敷设区域	平均精度	平均召回率	平均 F1 分数
工序①	0.936	0.982	0.950
工序②	0.962	0.990	0.976
工序③	0.964	0.928	0.945

本研究在分割电缆点云时，充分考虑了隧道的空间结构特征，将隧道内不同物体的相对位置信息作为先验知识辅助点云分割，相比直接采用通用点

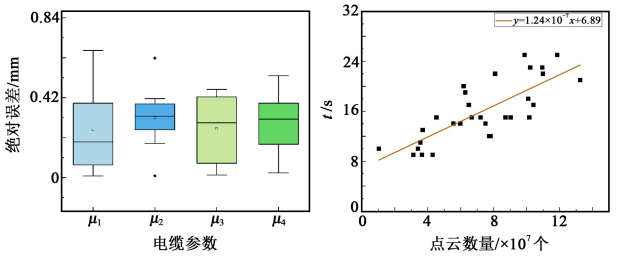
云分割方法，可以获得更好的电缆分割结果。图 9 为单独使用欧式聚类、DBSCAN 聚类和区域增长技术对工序①隧道点云进行电缆分割的可视化结果，与图 7(a)相比可以看出，本研究方法得到的结果要远好于其他方法。



(a) 欧式聚类方法分割结果　(b) 区域生长分割结果　(c) DBSCAN 分割结果

图 9　通用点云分割方法的电缆分割结果

电缆敷设质量参数的测量误差要求为 1 mm 以内。如图 10(a)所示，本研究方法自动提取的 μ_1～μ_4 4 个参数的绝对误差均值分别为 0.25，0.32，0.26 和 0.29 mm，绝对误差均值小于 0.35 mm，能够满足实际工程需要。



(a) 误差箱线图　(b) 点云数量与算法处理时间点线图

图 10　电缆质量参数绝对误差箱线图和点云数量与算法处理时间点线图

本研究处理的隧道场景大，点云数量多，为提高计算效率，本研究根据场景内物体的空间位置关系对非电缆点云进行快速去除，大大提高了运行效率。图 10(b)显示了本研究算法在不同点云数量场景下的处理时间，从图中可以看出，点云数量与算法处理时间有较强的线性相关性，在处理约 1 200 万个点云的场景时，方法运行时间仅为 25 s。

4　结论

本研究提出一种基于三维点云的电缆敷设质量关键参数自动解析方法。该方法首先对电缆敷设过程的关键工序进行三维颜色点云数据采集，再根据隧道点云的空间分布特征、敷设区域点云的形态和颜色特征对电缆点云和敷设区域点云进行自动分割，最后对敷设区域的质量参数进行测量。本研究提出的电缆和敷设区域点云分割算法的平均 F1 分数大于 0.945，自动提取的 4 个敷设质量参数绝对误差均值小于 0.35 mm，处理约 1 200 万个点云场景时，方法运行时间仅为 25 s。试验结果表明，本研究方法可辅助施工和验收人员实现电缆敷设位置信息的高效准确分析和施工质量校核，为电缆敷设工程质量验收提供一种新的数字化技术手段。

参考文献：

[1] 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 Lin，Li Zhaohong，Hao Yanpeng，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.

[2] Sun C，Wang C. Assessment study of aging life for typical defects in XLPE cable joints[C]// 2020 3rd Inter. Conf. on Advanced Electronic Materials，Computers and Software Engineering(AEMCSE)，2020.

[3] 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，2018，122：106-116.

[4] 魏煌涛. 基于视觉的电缆安装方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
Wei Huangtao. Research on installation method of cable based on vision[D]. Harbin：Harbin Institute of Technol.，2020.

[5] 邹丽君. 基于图像处理的电缆绝缘层厚度测量的研究[D]. 青岛：青岛科技大学，2009.
Zou Lijun. Research on thickness measurement of cable insulation layer based on image processing[D]. Qingdao：Qingdao University of Science and Technol.，2009.

[6] 张格悠，龚　俊，陈俊松，等. 基于双目视觉的电缆护套断裂伸长率自动测量[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2021，33(11)：1668-1676.
Zhang Geyou，Gong Jun，Chen Junsong，et al. Automatic measurement of elongation at break of cable sheath based on binocular vision[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics，2021，33(11)：1668-1676.

[7] 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 Faming，Wang Kang，Zhao Li. Sub-pixei edge detection algorithm based on gray-moment for thickness measurement of cable sheath material[J]. J. of Electronic Measurement and Instrument，2019，33(10)：128-133.

[8] 游安清，潘旭东，赵　平，等. 激光雷达电力巡线点云自动分类方法研究[J]. 应用光学，2019，40(6)：1077-1083.
You Anqing，Pan Xudong，Zhao Ping，et al. Research on automatic classification of point cloud scanned by lidar during

power-line patrol[J]. J. of Appl. Opt., 2019, 40(6): 1077-1083.

[9] 李军阔, 刘 建, 李光毅, 等. 一种地下电缆点云自动提取分割算法[J]. 激光技术, 2023, 47(2): 233-240.
Li Junkuo, Liu Jian, Li Guangyi, et al. An automatic extraction and segmentation algorithm of underground cable point cloud[J]. Laser Technology, 2023, 47(2): 233-240.

[10] 麻卫峰, 王 成, 王金亮, 等. 基于激光点云的高压输电线覆冰厚度反演[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 89-95.
Ma Weifeng, Wang Cheng, Wang Jinliang, et al. Inversion of ice thickness for high voltage transmission line based on a LiDAR point cloud[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 89-95.

[11] 邓 磊, 刘桂华, 邓 豪, 等. 三维点云分割的交联聚乙烯电缆接头参数测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 197-207.
Deng Lei, Liu Guihua, Deng Hao, et al. Parameter measurement of cross-linked polyethylene cable joint based on three-dimensional point cloud segmentation[J]. J. of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(9): 197-207.

[12] Schall O, Belyaev A, Seidel H P. Adaptive feature-preserving non-local denoising of static and time-varying range data[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(6): 701-707.

[13] Rusu R B, Cousins S. 3D is here: Point cloud library (PCL)[C]// IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation, 2011: 1-4.

[14] Chum O, Matas J. Optimal randomized RANSAC[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(8): 1472-1482.

[15] 陈向阳, 杨 洋, 向云飞. 欧氏聚类算法支持下的点云数据分割[J]. 测绘通报, 2017, 488(11): 27-31, 36.
Chen Xiangyang, Yang Yang, Xiang Yunfei. Measurement of point cloud data segmentation based on euclidean clustering algorithm[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, 488(11): 27-31, 36.

[16] Ester M, Kriegel H P, Sander J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]// Proc. of the Second Inter. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. KDD'96, 1996: 226-231.

[17] Nurunnabi A, West G, Belton D. Outlier detection and robust normal-curvature estimation in mobile laser scanning 3D point cloud data[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(4): 1404-1419.

[18] Vo A-V, Truong-Hong L, Laefer D F, et al. Octree-based region growing for point cloud segmentation[J]. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 104: 88-100.

[19] Goutte C, Gaussier E. A probabilistic interpretation of precision, recall and F-score, with implication for evaluation[C]// Advances in Information Retrieval. ECIR 2005. Lecture Notes in Computer Science, 2005: 345-359.

[20] Chen K, Guo S, Lin Y, et al. Least absolute relative error estimation[J]. J. of the American Statistical Association, 2010, 105(491): 1104-1112.

作者简介:

郑维刚(1983—),男,博士,高级工程师,硕士生导师,从事输电电缆线路运维技术研究。