DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260571

基于区域生长法的三维激光点云标靶提取方法研究

陈海虎[1],胡　杰[1],陈　超[1],蔡煜梁[2,3]
(1.浙江交工路桥建设有限公司,浙江 杭州 311300; 2.宁波工程学院 建筑与交通工程学院,浙江 宁波 315211;
3.宁波工程学院 全省深海基础智能建造与运维重点实验室,浙江 宁波 315211)

摘　要: 三维激光点云中标靶核心区域的精准提取是后续靶心定位和点云数据对齐的关键。针对传统标靶提取方法依赖预设阈值、易受隧道复杂施工环境影响等问题,提出一种基于区域生长法的标靶提取方法。基于标靶局部颜色相似性准则,结合手动种子点选择与固定半径邻域生长策略,实现标靶区域的自适应提取。通过采用几何拟合法与重心法对提取的标靶核心区域进行靶心定位,并与激光放样的准确靶心坐标开展误差对比。结果表明:所提出的方法无需人工动态调整参数,在隧道复杂施工环境下仍能保持较高的提取精度与数据稳定性,定位偏差与基准靶心坐标高度吻合,显著提升了复杂施工环境下标靶提取的精度与工程适用性。

关键词: 三维激光点云;标靶提取;复杂施工环境;区域生长法;靶心定位;点云预处理
中图分类号: TB22　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)09-0031-04

Research on Target Extraction Method of 3D Laser Point Cloud Based on Region Growing Algorithm

CHEN Haihu[1], HU Jie[1], CHEN Chao[1], CAI Yuliang[2,3]
(1. Zhejiang Jiaogong Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou 311300, China; 2. School of Architecture and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China; 3. Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation and Maintenance for Deep-sea Foundations, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: Accurate extraction of the core target area in 3D laser point clouds is the key to subsequent target center positioning and point cloud data registration. Aiming at the problems of traditional target extraction methods, such as reliance on preset thresholds and susceptibility to the complex construction environment of tunnels, a target extraction method based on the region growing algorithm is proposed. Based on the local color similarity criterion of targets, combined with the strategies of manual seed point selection and fixed-radius neighborhood growth, the adaptive extraction of target areas is realized. The geometric fitting method and the centroid method are used to locate the target center of the extracted core target area, and the error comparison is carried out with the accurate target center coordinates obtained by laser lofting. The results show that the proposed method does not require manual dynamic parameter adjustment, and can still maintain high extraction accuracy and data stability in the complex tunnel construction environment. The positioning deviation is highly consistent with the reference target center coordinates, which significantly improves the extraction accuracy and engineering applicability of targets in complex construction environments.

Keywords: 3D laser point cloud; target extraction; complex construction environment; region growing method; target center positioning; point cloud preprocessing

0　引　言

三维激光扫描技术在工程测量、隧道施工、文物保护及工业构件检测等领域已得到了广泛应用。作为连接扫描数据与设计模型的核心媒介,标靶提取质量直接决定了后续点云数据对齐、靶心拟合定位的精度,进而影响整个测量工作的可靠性与效率[1-4]。

现有标靶提取方法多依赖回光强度或红绿蓝(red green blue,RGB)属性预设固定阈值,通过阈值筛选实现标靶区域分离。朱凌[5]对地面三维激光扫描标靶进行了基础研究,奠定了传统标靶提取方法

收稿日期: 2026-05-22
基金项目: 宁波交通运输领域重点支持科技项目(2024042)
作者简介: 陈海虎(1986—),男,本科,高级工程师,从事公路工程相关工作。
通信作者: 蔡煜梁(1993—),男,博士,讲师,从事桥梁与隧道数字工业化建造研究工作。电子信箱:397054694@qq.com

的理论基础。王烽[6]采用模糊聚类算法探究平面标靶中心提取精度，但其本质仍依赖聚类阈值的设定。在隧道复杂施工环境下，光照条件波动、粉尘浓度变化及湿度波动等因素会直接改变标靶及周边区域的光学特性[7]，导致预设阈值无法适配环境变化，需人工动态调整参数，不仅增加了操作复杂度，还降低了提取效率与自动化程度，难以满足长距离施工连续量测的需求。

关于标靶靶心定位，官云兰等[8]基于地面激光雷达系统实现平面标靶稳健定位，重点优化了定位算法的抗干扰性；薛晓璐等[9]针对残缺平面标靶，提出基于随机样本一致算法（random sample consensus，RANSAC）的稳健定位方法，提升了对不完整标靶的适应性；何华等[10]结合凸包算法与抗差最小二乘法，实现圆形标靶中心的高精度定位；陈俊杰等[11]基于激光点云直接提取平面标靶中心坐标，简化了计算流程。此外，刘建华[12]提出基于迭代最小二乘的平面标靶点云去噪方法，为标靶提取的预处理提供了技术支撑。

本文以标靶局部颜色一致性为核心生长准则，通过自动识别种子点并迭代生长形成完整标靶区域，以有效规避环境变化对光学属性的影响，为长距离施工连续量测提供稳定可靠的技术支撑。

1　研究方法

1.1　数据预处理

三维点云数据由大量离散点构成，受测量设备扫描角度、物体表面微观特性及环境等因素的影响，同一平面的扫描结果存在一定厚度，需通过预处理实现去噪与平面投影，为后续标靶提取奠定基础。

（1）点云中心化

设点云数据集合为$P_i=[x_i,y_i,z_i]$表示第i个点的坐标，则点云质心c为：

$$c=\frac{1}{N}\sum_{N}^{i=1}\mathrm{p}_i=\left[\frac{1}{N}\sum_{N}^{i=1}x_i,\frac{1}{N}\sum_{N}^{i=1}y_i,\frac{1}{N}\sum_{N}^{i=1}z_i\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中：N为点云总点数，将每个点P_i减去质心c，得到中心化点云P_c：

$$P_c=\{p_i-c\,|\,i=1,2,\cdots,N\} \tag{2}$$

以消除整体位置偏差对后续处理的影响。

（2）奇异值分解与平面法向量求解

对中心化后的点云P_c进行奇异值分解，分解形式为：

$$P_c=\mathbf{USV}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：$U\in R^{3\times3}$是左奇异向量矩阵（列向量是正交）；$S\in R^{3\times N}$是奇异值矩阵，对角线上的元素σ_i表示奇异值，且$\sigma_1\geqslant\sigma_2\geqslant\sigma_3\geqslant0$；$V\in R^{N\times N}$是右奇异向量矩阵（列向量是正交）。由于最小奇异值$\sigma_3$对应的右奇异向量$V_3$反映了点云主要平面方向，故将作为平面法向量$\boldsymbol{n}=\left(n_x,n_y,n_z\right)$。

（3）平面拟合去噪与投影

基于法向量$\boldsymbol{n}$建立平面方程$ax+by+cz+d=0$，其中$a=n_x$、$b=n_y$、$c=n_z$、$d=-c\cdot n$；采用最小二乘迭代去噪法剔除异常点。每个点到拟合平面的距离dp为：

$$d_p=\frac{|ax+by+cz+d|}{\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \tag{4}$$

剔除距离大于两倍标准差的点，若当前迭代剔除点数大于之前迭代，则更新点云数据与平面参数；将剩余内点投影至拟合平面，点p在拟合平面上的投影p'的坐标为：

$$P'=P-d_p\frac{\boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{n}|}, \tag{5}$$

则投影点$p'(x',y',z')$的坐标可表示为：

$$\begin{aligned}x'&=x-d_p\cdot\frac{n_x}{\sqrt{{n_x}^2+{n_y}^2+{n_z}^2}},\\ y'&=y-d_p\cdot\frac{n_y}{\sqrt{{n_x}^2+{n_y}^2+{n_z}^2}},\\ z'&=z-d_p\cdot\frac{n_z}{\sqrt{{n_x}^2+{n_y}^2+{n_z}^2}}\end{aligned} \tag{6}$$

原始点云与拟合平面的可视化结果如图1所示，预处理后点云在三维空间中的分布特征及拟合平面的贴合效果较好，验证了平面拟合的有效性。

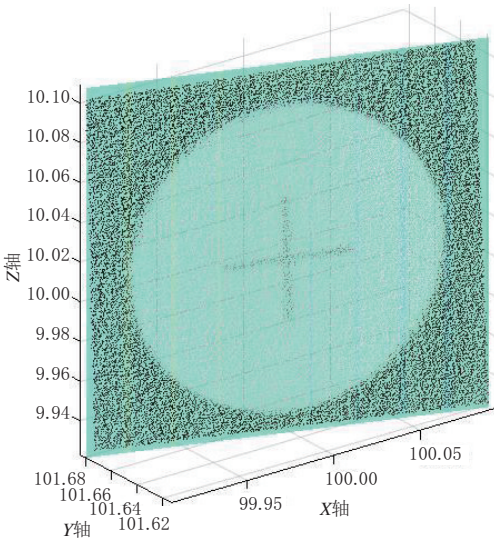


图1　原始点云与拟合平面的可视化结果

1.2　基于区域生长法的标靶点云提取

区域生长法是一种基于种子点的迭代分割技

术，核心在于通过相似性准则与生长策略逐步扩展区域，最终实现目标的提取。针对标靶提取需求，设计如下关键技术环节：

（1）种子点选择

预处理后的标靶区域特征显著，采用手动选择种子点策略。该方法通过直观视觉判断定位种子点，可避免自动选择算法的初始误差，确保种子点准确性，同时操作高效，无需复杂计算，为区域生长提供可靠起点。图 2 为种子点选择的可视化界面，用户可通过点击点云图中的标靶区域确定种子点，界面实时显示当前选中位置的 X、Y、Z 坐标，便于精准定位。

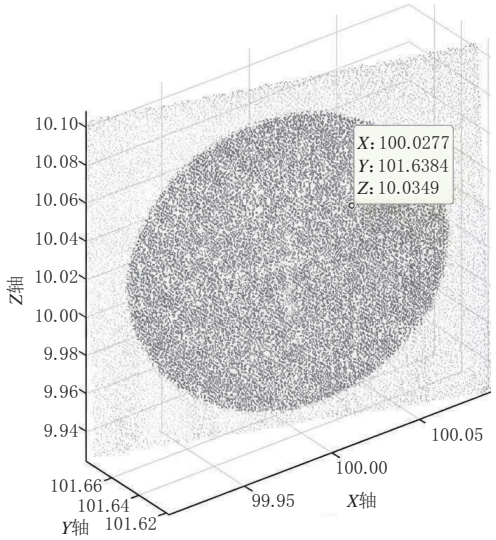


图 2　种子点选择的可视化界面

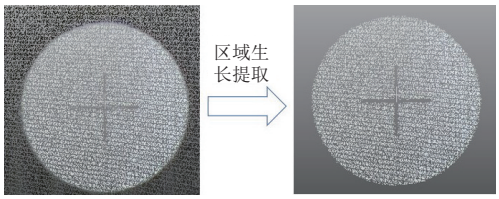
（2）相似性准则定义

以点云的 RGB 属性为核心相似性指标，颜色信息能够有效反映标靶与周边区域的特征差异。通过统计分析点云颜色分布，设定 RGB 属性差值阈值：根据经验，当两个点的 R、G、B 分量差值均在 25 以内时，判定为颜色相似，满足生长条件。该准则可精准识别标靶区域的颜色一致性，为区域分割提供量化依据。

（3）生长策略设计

采用基于固定半径的邻域扩展策略，通过欧几里得距离定义邻域范围，如设定半径值为 0.005 来定义邻域范围。该策略简洁高效，易于实现，可通过调整半径适配不同密度的点云；同时聚焦局部区域生长，避免全局搜索的计算冗余，且对噪声具有一定鲁棒性，通过固定邻域范围限制过度扩展，保障分割稳定性。

区域生长流程为：以手动选择的种子点为起点，遍历其邻域内的所有点，判断是否满足颜色相似性准则，将符合条件的点纳入当前区域；以新纳入的点为新的生长起点，重复上述过程，直至无满足条件的点可添加，最终形成完整标靶区域。图 3 为区域生长提取结果的关键信息展示，选中种子点的坐标为（100.03，101.64，10.03），颜色（R，G，B）为（0.84，0.85，0.88），本次提取共获得 17 964 个标靶点云，未提取点数量为 16 688，直观反映了标靶区域与背景点云的分离效果。



请在点云图中点击以选择一个种子点。
选中点的信息：
坐标：（100.03，101.64，10.03）
颜色（R，G，B）：（0.84，0.85，0.88）
提取到的点数量：17964
未提取到的点数量：16688

图 3　区域生长提取结果关键信息

2　试验结果与分析

2.1　试验设计

试验采用天宝 X7 架站式三维激光扫描仪，其 60 m 范围内理论扫描精度为 2 mm，采集实际隧道施工环境下的点云数据，标靶为圆形平面标靶。通过 MATLAB 平台实现本文所提出的标靶提取方法及靶心定位算法。以激光放样所获得的真实靶心坐标为基准，采用几何拟合法与重心法分别进行靶心计算，从定位偏差、数据稳定性两个维度评估提取精度。

2.2　靶心定位方法

（1）几何法

基于标靶的圆形几何特征，精准提取标靶边缘点云，采用最小二乘法拟合圆模型，求解圆心（靶心）坐标与半径，实现高精度定位。该方法依赖标靶边缘提取精度，适用于几何特征明确的标靶。图 4 为增强边界提取结果（局部搜索），可清晰观察到标靶边缘点云的分布情况。图 5 为基于 RANSAC 算法的 3D 圆拟合结果，拟合圆心坐标为（X：99.998 6，Y：101.648，Z：10.011 2），直观展示了几何法靶心定位的可视化效果。

（2）重心法

通过计算标靶区域内点云的质心位置确定靶心坐标。首先提取标靶区域内所有点（提取点数量为 17 964，未提取点数量为 16 688），采用统计方法计算

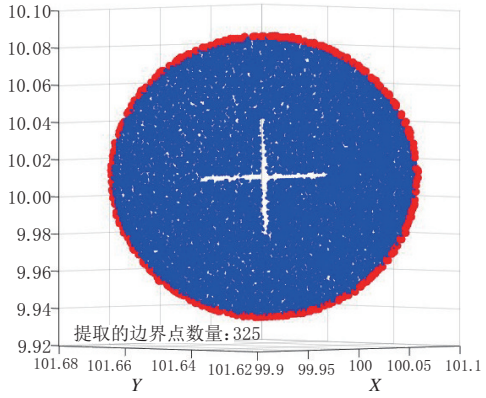


图 4　增强边界局部搜索提取结果

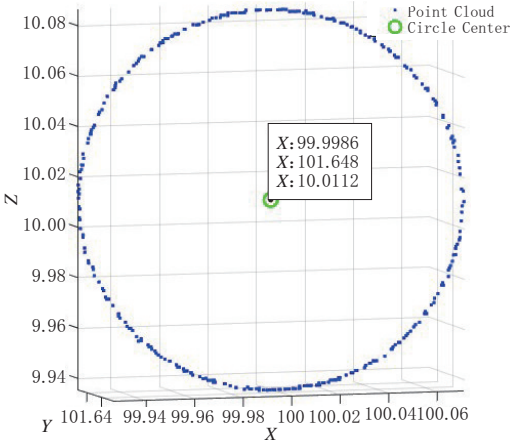


图 5　基于 RANSAC 算法的 3D 圆拟合结果

点云坐标均值，作为靶心坐标。该方法操作简便，计算高效，适用于标靶区域完整提取的场景。图 6 为重心法定位结果的可视化图，定位得到的靶心坐标为（X：100，Y：101.648，Z：10.010 8），点云分布与靶心位置的对应关系清晰可见，表明了重心法的可行性。

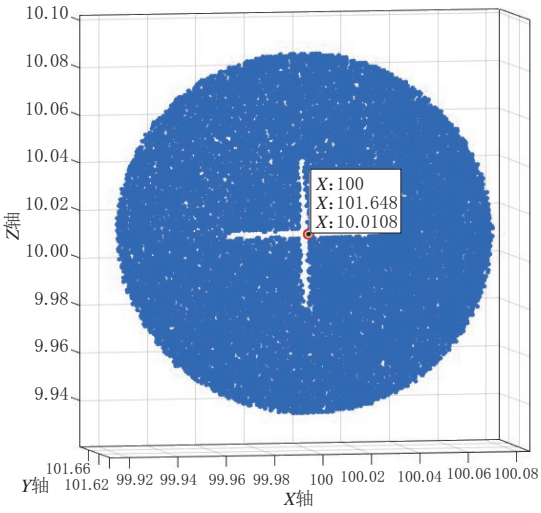


图 6　重心法靶心定位可视化结果

2.3　试验结果分析

几何法、重心法的分析结果与基准坐标（激光放样真实值）的对比如表 1 所示。

表 1　靶心定位结果对比　　单位：m

靶心定位方法	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
几何法	99.998	101.648	10.011
重心法	100.000	101.648	10.010
基准值	100.000	101.648	10.011

通过表中数据对比分析可知：

（1）几何法定位分析结果中，X 坐标偏差为 0.002 m，Y 坐标与 Z 坐标均无偏差；重心法 X 坐标无偏差，Y 坐标偏差为 0.001 m，Z 坐标偏差为 0.001 m。两种方法的定位偏差均控制在毫米级，可为靶心定位提供高质量的数据支撑。

（2）两种定位方法的结果均与基准值高度吻合，数据稳定性良好，无显著波动。这表明区域生长法在复杂隧道施工环境下的抗干扰能力，其基于颜色一致性的生长准则有效规避了光照、粉尘等因素的影响，确保了标靶提取的稳定性与可靠性。

3　结　论

针对传统标靶提取方法依赖预设阈值且易受复杂工程环境干扰等问题，提出了基于区域生长法的标靶提取方法，并开展了靶心定位方法的相关验证试验，主要结论如下：

（1）通过点云中心化、奇异值分解、平面拟合去噪与投影预处理优化点云数据质量，结合手动种子点选择、RGB 颜色相似性准则及固定半径邻域生长策略，实现了标靶区域的自适应精准提取，并有效抵御隧道内光照波动、粉尘干扰等不利环境的影响。

（2）几何拟合法与重心法定位结果与真实靶心坐标偏差均控制在毫米级，表明所提出的标靶提取方法具有较高的提取精度与稳定性，能够满足复杂工程环境测量中高精度靶心定位的需求，且无需人工动态调整参数，显著提升了工作效率与自动化水平。

（3）本方法可为复杂工程环境下三维激光扫描连续量测作业提供可靠的标靶提取解决方案，在隧道施工、建筑工程竣工量测等领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 熊爱成，杨俊志，叶作权．三维激光扫描仪若干问题的研究[J]．北京测绘，2023，37（9）：1285-1290.

[2] 李颖捷，刘新宇，吴志强．移动手持式激光扫描仪在建筑工程竣工测量中的应用[J]．现代测绘，2024，47（3）：75-78.

[3] 张序，李兆堃，张婉莹，等．手持式激光扫描仪在文物测量中的应用研究[J]．测绘通报，2013（12）：41-44.

（下转第 68 页）