

ICS 93.080.01

CCS P 11

团 体 标 准

T/JSJTQX 37—2023

公路路基路面施工智能测量技术规程 激光点云测量

Technical specification for intelligent measurement of highway subgrade and
pavement construction—Laser point cloud measurement

2023-05-20 发布

2023-06-01 实施

江苏省交通企业协会

发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
5 基本要求	3
6 仪器及软件	3
6.1 仪器	3
6.2 软件	4
7 施工测量	4
7.1 测量流程	4
7.2 测量准备	4
7.3 点云数据采集	4
7.4 点云数据预处理	7
7.5 点云数据深化处理	8
7.6 点云数据优化建模	10
7.7 路基路面点云数据的提取	10
7.8 成果输出	11
8 点云质量评价与改进	12
附 录 A（资料性） 滤波算法	14
附 录 B（资料性） 基于高程阈值的非地面点过滤方法	16
附 录 C（资料性） 基于坡度的滤波方法	18
C.1 算法流程图	18
C.2 数据组织与预处理	18
C.3 地形判断与多尺度滤波	19
C.4 优化处理与数据输出	20
附 录 D（资料性） Bezier 曲线道路边界拟合方法	21
参 考 文 献	22

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省交通企业协会提出并归口。

本文件起草单位：中交隧道工程局有限公司、江苏省交通工程建设局、江苏森淼工程质量检测有限公司、中国地质大学（北京）、阜新高等专科学校、江苏省交通技师学院、镇江市综合交通事业发展中心、北京中元浩业科技有限公司、南京交通建设管理集团有限公司、中交路桥建设有限公司、宿迁市公路事业发展中心、南京交通工程有限公司、苏交科集团检测认证有限公司、华设检测科技有限公司、无锡市航道工程有限公司。

本文件主要起草人：张胡贵、曲洪亮、唐光臣、吴永哲、张爱军、唐显云、成朝恒、李飞、王运港、马松、王勇衡、李志博、王鹏泽、李玲、刘小帅、邱凌佳、刘冰林、何良涛、杨云飞、李亚辉、杨渊、王宇阳、李绎峰、李丽、贾连姣、刘玉朋、谢伟伟、侯翔、蔡猛、郭永涛、汪军伟、张建伟、胡未艾、倪茂爱、谢文俊、何凌、朱牛锁、姜超、路星、胡腾、盛雅楠、张瑜、宋刚、李兴华、徐庆宏、张宇红、陈健、湛根善、欧定福、陆云涛、章荣福、曹妍、陈斯宁、侯爵、陈加富、王芮文。

本文件由江苏省交通技师学院正高级讲师曹妍、研究员级高级工程师王芮文、镇江市综合交通事业发展中心研究员级高级工程师章荣福、江苏省交通工程建设局研究员级高级工程师侯爵、陈加富、宿迁市铁路事业发展中心陈斯宁任主审。

公路路基路面施工智能测量技术规程 激光点云测量

1 范围

本文件规定了公路路基路面施工智能测量中激光点云测量技术的基本要求、仪器及软件、施工测量、点云质量评价和改进。

本文件适用于公路路基路面智能测量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 18314 全球定位系统（GNSS）测量规范
- GB / T 18316 数字测绘产品检查验收规定和质量评定
- GB T 36100 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法
- CH/Z 3017 地面三维激光扫描作业技术规程
- CH/T 8023 机载激光雷达数据处理技术规范
- CH/T 8024 机载激光雷达数据获取技术规范
- JTG C10 公路勘测规范
- JTG/T 3610 公路路基施工技术规范
- JTG/T F20 公路路面基层施工技术细则
- JTG F40 公路沥青路面施工技术规范
- SJ 21226 电子装备逆向工程三维建模技术要求
- T/JSTERA 39—2022 高速公路建设工程用表

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

点云滤波 point cloud filtering

去噪之后，对仍然隐藏在点云数据中的较小误差点进行滤波平滑处理，从而得到更准确点云数据的一种数据处理方法。

3.2

聚类分析 cluster analysis

将相似的点云数据对象通过静态分类方法分成不同组别或者若干子集，使其在同一个子集中点云对象都有相似属性，在坐标系中具有更加短的空间距离。亦称为群集分析。

3.3

激光点云 LIDAR point clouds

通过激光扫描捕获的点云。

[来源：CH/T 8023-2011，3.4]

3.4

邻域生长 neighborhood growth

将点云种子图像提取出来，根据原图像中的连通性将目标生成出来。

3.5

主成分分析 principal components analysis, PCA

通过降维技术把多个变量简化为少数几个主成分（综合变量）的统计分析方法。

注1：主成分分析是用于分析数据及建立数理模型。其方法主要是通过对协方差矩阵进行特征分解，以得出数据的主成分（即特征向量）与它们的权值（即特征值）。这些主成分能够反映原始变量的绝大部分信息，它们通常表示为原始变量的某种线性组合。

注2：主成分分析经用于减少数据集的维数，同时保持数据集中的对方差贡献最大的特征，通过保留低阶主成分，忽略高阶主成分做到，这样低阶成分能保留住数据的最重要方面。

3.6

点云数据配准 point cloud registration

把不同测站点获取的点云数据变换到同一坐标系的过程。

[来源：CH/Z 3017-2015, 3.1.5]

注：现有配准方法按精度可分为粗拼接和精确拼接。粗拼接将不同的坐标系下点云数据统一到同一个坐标系下，主要是为后续精确拼接提出一个初始值。精确拼接通过迭代计算出一组坐标变换参数，从而最小化拼接误差。

3.7

点云去噪 point cloud denoising

去除点云中由于外界因素（如光线、震动、噪声等）以及三维激光雷达扫描仪本身的因素造成的，不可避免的部分点的过程。

[来源：CH/Z 3017-2015, 3.1.9]

3.8

LAS 数据

基于目前点云数据的一种二进制典型格式。

4 符号和缩略语

4.1 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

GNSS-RTK：全球卫星导航系统实时动态测量（Global Navigation Satellite System Real-time kinematic）；

IMU：惯性测量单元（Inertial Measurement Unit）；

INS：惯性导航系统（Inertial Navigation System）；

CCD：电荷耦合器件（Charge Coupled Device）；

TIN：三角剖分（Triangulated Irregular Network）；

SLAM：同步定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping）；

MU：多用户共享（Multi-User）。

4.2 符号

下列符号适用于本文件。

H：机载式测量时相对航高，m；

- f_c : 焦距, mm;
 μ : 扫描仪镜头尺寸, mm;
 GR: 地面分辨率, m/像素;
 e: 弦高差;
 $[\varepsilon]$: 给定的弦高差允差。

5 基本要求

- 5.1 应通过扫描路基路面超精细表面信息捕获点云数据, 产出高精度高程模型、数字正射影像图、数字线画路线平纵横图等 3D 产品和路基路面断面特征。
- 5.2 应能基于高精度点云快速提取路基路面横纵地面; 应能基于高分辨率数字正射投影图直观清晰地判读路基红线范围内环境信息。
- 5.3 路基上路床智能测量应采用架站式激光雷达扫描仪; 路基下路床以下部位智能测量可采用架站式、机载式、车载式和移动背包式激光雷达扫描仪; 路基局部智能测量可采用移动背包式激光雷达扫描仪, 路面智能测量宜采用车载式和机载式激光雷达扫描仪。
- 5.4 点云精度和技术指标应满足表 1 的要求。

表 1 激光扫描点云精度和技术指标

等级	特征点间距 中误差 (mm)	点位相对于邻近控 制点中误差 (mm)	最大间距 (mm)	配准要求
一等	≤5	/	≤3	应采用标靶进行配准、连续传递配准次数不应超过 4 次
二等	≤15	≤30	≤10	控制点直接的连续传递配准次数不应超过 5 次
三等	≤50	≤100	≤25	控制点直接的连续传递配准次数不应超过 5 次
四等	≤200	≤250	/	

注: 一等不宜通过控制点进行配准。

6 仪器及软件

6.1 仪器

6.1.1 智能测量仪器宜采用智能激光雷达扫描仪。仪器应满足以下要求:

- 采用非光学成像原理的主动测量方式, 不受日照、大气及自然阴影影响;
- 可穿透植被等覆盖物直接获取距离观测值, 获得精确的点云数据;
- 结合遥感影像、摄影正射影像和高精度激光点云, 快速获取路线平面位置和高程坐标;
- 具有智能型用户接口, 用以输入和输出数据;
- 能自动生成公路路基路面断面和表面数据。

6.1.2 智能测量使用软件应满足以下要求:

- 能准确快速地进行数据处理, 降低点云数据处理时间;
- 人性化操作界面和自动化操作步骤;
- 能实现点云数据自动拼接和坐标系转换, 能将扫描数据直接与绘图软件协同, 实现虚拟现实化和一体化。

6.1.3 智能激光雷达扫描仪有架站式、机载式、移动背包式和车载式 4 种形式。其组成和特点如下:

- 架站式激光雷达扫描仪由高速精确扫描系统、反射棱镜、水平方位偏转控制器、高角度偏转控制器、数据输出处理器、数码相机等组成。该扫描仪具有采集精度高、应用灵活、能够实现细节特征自动化提取等特点;

b) 机载式激光雷达扫描仪由三维激光扫描系统、GNSS、INS等组成。该扫描仪属于高清测量系统，搭载无人机等飞行器，扫描范围广，适用于大面积三维数据采集、长路线断面扫描或地形复杂地区快速扫描；

c) 移动背包式激光雷达扫描仪由GNSS、高精度扫描仪、光线传感器、高清相机、IMU、内置工业级电脑、远程控制平板以及电池单元组成。该扫描仪系统体积小，操作灵活，扫描迅速，适用于局部路段的快速扫描；

d) 车载式激光雷达扫描仪以车辆为搭载平台，集成三维激光雷达扫描仪、GNSS、IMU、CCD相机和行驶里程计等实现地形扫描。该扫描仪搭载在汽车上，载体灵活，扫描快速，适合于行车畅通路段的地形扫描。

6.2 软件

6.2.1 软件包括仪器自带的系统软件和数据后处理软件两部分。

6.2.2 仪器自带软件根据仪器功能配置，不同型号仪器功能配备相应的功能实现软件。仪器自带软件有激光扫描信号转换软件、移动载体姿态调整软件以及GNSS信号接收软件等。

6.2.3 点云数据处理软件应具有点云数据提取和格式转换功能，可根据需要进行相应格式转换。

6.2.4 点云数据处理软件应有建立坐标系的功能、生成全景照片功能和导出三维点云模型功能。

6.2.5 点云数据处理软件应能提取基于点云特征图像，并具有基于扫描线和基于聚类分析的功能。

注1：基于点云特征图像方法是将三维离散点云通过投影转化为规则的二维图像，并使用成熟的数字图像处理技术来实现道路的提取，该方法生成图像时存在精度损失。

注2：基于扫描线的方法是当采用线性扫描方式扫描时，将一条扫描线作为一个横断面处理，该方法需要路面的高差、坡度等大量经验阈值。

注3：基于聚类分析方法是根据目标地物具有相似的局部特征对道路点云进行聚类分析，进而提取道路路面，这种方法容易出现过分割和欠分割的现象。

6.2.6 点云处理软件应兼容常用品牌型号的激光雷达扫描仪。

7 施工测量

7.1 测量流程

包括测量准备、点云数据采集、点云数据处理、点云数据优化建模、路基路面点云数据提取、成果输出等步骤。

7.2 测量准备

7.2.1 应编制测量方案，选择施工仪器。

7.2.2 应熟悉路基路面设计图纸，在测量前，应将路基路面高程和坐标设计数据输入到激光雷达扫描系统中。

7.2.3 应确定导线点和水准点，规划智能测量施测线路。

7.2.4 在仪器使用前1天，应进行仪器充电，并配备备用电池。

7.2.5 应配备至少2名测量技术人员，技术人员应经培训。

7.2.6 应准备相关技术文件、资料。

7.3 点云数据采集

7.3.1 使用架站式激光雷达扫描仪采集点云数据时，符合以下要求：

a) 按照独立设站方式架设激光扫描仪，架站数量可根据现场实际情况确定。扫描站应设置在地面稳定的安全区域，宜对三脚架进行加固处理。扫描前应进行现场规划站点，选择站点时应考虑测量效率和精度；

b) 设站时应避免出现测量死角。扫描站点宜选择在通视条件良好的开阔处，有效扫描的面积应超

出路基红线外 100cm 以上。站点选择应考虑有效扫描距离，相邻站点间扫描位置既不发生漏测也不过度重叠；

c) 在测站点上安设扫描仪后应设定扫描分辨率，其中基本分辨率（10cm×10cm），对于细部特征要求高的区域可人工调整扫描分辨率。当采用标靶进行不同站点点云数据配准时，应使用高分辨率扫描标靶。标靶应合理设置在相邻站点扫描重叠区域内，标靶数量不少于 3 个，且 3 个标靶不应共线；

d) 设置标靶时，如果标靶距离扫描站较远，应进行标靶识别与精确扫描。当采用标靶进行不同站点点云数据配准时，应使用高分辨率扫描标靶确保标靶中心坐标提取精度。标靶应设在相邻站点扫描重叠区域内，标靶数量不少于 3 个，且不共线，标靶间夹角宜控制在 15°～165°；

e) 控制点的平面坐标可通过全站仪、GNSS-RTK 等方式获得，高程可采用水准测量、三角高程、GNSS 拟合水准等方法获取。采用“测站点+后视点”的数据采集方法时，控制点与扫描设站点重合；采用其它数据采集方法时，控制点不少于 3 个，且应均匀分布在整个测区。控制点的平面和高程精度应满足图根点点位中误差和高程中误差在±5mm 之间及 JTG C10 的相关要求；

f) 架站式扫描仪数据采集时，应在保证扫描标靶能被扫描仪正确识别的前提下，尽量降低扫描分辨率，采用较低要求的噪声控制水平（即允许仪器有一定程度的测量噪声），如无必要应禁止扫描仪开启拍照功能；

注：禁止扫描仪开启拍照功能能成倍地减少每站的扫描时间并有效降低点云数据密度，大大减少外业时间并提升内业处理的效率，从而缩短测量时间。

g) 将激光雷达扫描仪的入射角控制在 55° 以内，确保扫描点云数据配准精度。同时还应保证测站之间重叠率大于 60%，对于扫描困难区域，要求测站之间重叠率不能小于 30%。当扫描路段形状复杂的时，应适当增加扫描密度，即在单元面积内增加点云数量；

h) 宜拍摄扫描区域照片，作为数据拼接合成时的参考依据；

i) 宜借助扫描仪自带的误差消除功能，保证测站之间测量误差小于 5mm。

7.3.2 使用机载式激光雷达扫描仪采集点云数据时，符合以下要求：

a) 按探勘情况和预设方案进行航线设定，确定航线间距和重叠度、相对航高、航线数量等。航带重叠度宜在 30% 左右，不宜过度重叠航带；

b) 在测量前，应确定设计航高。航高不应超过相对航高的 5%～10%，实际航高变化应不超过设计航高的 5%～10%。相对航高 H 按式（1）确定；

$$H = f_c \cdot \frac{GR}{\mu} \dots\dots\dots (1)$$

c) 无人机飞行校正方案应满足 CH/T 8024 的要求。施测之前应对姿态角和航偏角进行改正以提高精度。姿态角改正方法为：在两条对向飞行航线点云上，选择一处“人”字形房顶，方向垂直于飞行方向。通过测量两条“人”字形房顶的点云，获取其夹角 θ ，其改正角度为 $\theta/2$ ；航偏角的改正方法为：检校场范围内同向飞行的两条航线间公共重叠区域内，选择“人”字形房屋，并且其屋脊平行于飞行方向。两条屋脊点云线的夹角为 θ ，其改正角度为 $\theta/2$ ；

注：此方法用于减小侧滚角偏移。

d) 应合理布设地面基准站以有效减少大气误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差等。流动站安置在无人机上，将基准站和流动站采样间隔均调设为 1"，待扫描作业正常完成后，下载基站数据、流动站数据及 MU 数据，并进行联合解算，计算每个扫描点外方位元素及其航迹线；

e) 无人机起飞前和降落后，应对系统进行至少 10min 静态观测。对于需要激活的 INS，需要在进入测区前 5min～10min 飞行一个倒“8”字航线完成寻北。对于能自动寻北的 INS 系统可在静态观测后直接进入测区，待数据采集完成后 5min～10min 内应再飞行一个倒“8”字航线；

f) 飞行速度应均匀一致，速度变化应不超过 10m/s。航线俯仰角和侧翻角宜不大于 2°，最大应

不超过 4°；航线弯曲度应不超过 3%；飞机转弯时坡度应不超过 15°；

g) 数据采集时，点云数据密度应能满足内插数字高程模型数据要求，设定激光扫描密度为 5 点/m²~6 点/m²，且应满足 CH/T 8024 和 GB/T 36100 的要求；

h) 数据采集时，应选择晴朗和风小天气，确保模型清晰度和精确度；

i) 对机搭载系统要求及测量过程中对无人机的要求应满足 CH/Z 3005 的相关规定；

j) 在航线间公共重叠区域应进行数据平差处理；

k) 当测区内有较多河流和池塘时，应选择合适摄影条件避免对数码影像造成曝光；

l) 机载激光雷达获取的点云密度和测量误差应满足 CH/T 8024 的要求。点云数据质量评价计算方法应按 GB/T 36100 执行。

7.3.3 使用移动背包式激光雷达扫描仪采集点云数据时，符合以下要求：

a) 在正式检测前应对待测路段进行现场踏勘，根据路线走向规划行走路径，保证行走路径覆盖整个路基路面断面，且尽量减少重叠；

b) 在控制点上架设基准站并进行静态观测，基站距离测区不宜超过 5km。条件不具备时宜通过增设基站数量的方法进行优化；

c) 对于无内置 GNSS 系统的仪器需要架设 GNSS 基准站。基站应为多星座系统，使基站和测区整体走向相对垂直，保持几何图形结构。基站采集时间应完全覆盖背包任务采集时间，且宜架设在已知准确坐标控制点上；

d) 移动背包方案数据获取主要包括静态校准、动态校准、获取数据与下载，工作流程为静态校准、动态校准、获取数据、动态校准、静态校准、数据整理下载等；

e) 选择采集区域内对空条件良好位置进行设备静态和动态初始化。将背包放置在平地上，设备主机和控制平板开机，打开平板中远程桌面软件进行传感器及系统激活。静态观测时间宜不少于 5min，动态初始化应采用“8”字形惯性激活。检查控制软件参数设置及参数变化情况至完成初始化与系统调试；

f) 惯性激活后，将采样率和 GNSS 接收机采样间隔设置成 1s。然后开始按事先规划好的行走路径进行扫描采集数据；

g) 测量误差应满足 JTG C10 的要求。

7.3.4 使用车载式激光雷达扫描仪采集点云数据时，符合以下要求：

a) 在外业数据采集之前，应结合测区的实际情况设计移动测量车的行驶路线、速度以及数据采样的频率等，制定完整的外业实施方案；

b) 车载系统进行外业数据采集包括基站控制测量、点云数据扫描和三维控制点测量 3 部分。控制测量包括平面控制测量和高程控制测量；

c) 基站控制测量主要是测设站点的平面高程数据，需在数据采集前在采集周边选定位置，基站设置在信号较好处。现场施测基站平面坐标时，需将当地坐标站网与 GNSS 联测，按 GB/T 18314 中 D 级网要求施测。车载移动激光扫描需要同步在控制点上架设基站；

d) 将仪器设为外脉冲触发模式，并根据实际的天气情况和湿度调整相机曝光参数，激光雷达扫描仪设置线扫描模式、扫描角度、扫描密度等。惯导系统启动实时状态监测；

e) 外业车载点云数据采集时，应根据需要扫描的路基路面情况制定车载扫描路线，车载扫描路线要求车辆行驶尽量走直线，在加宽的部位或路基较宽时，需要往返行驶；

f) 如果在已通车路段进行扫描，应避开车辆和人流高峰期，以保证测量数据的完整性和准确性。

g) 数据采集时，路基上不应有车辆、施工人员以及物体遮挡，避免出现点云覆盖；

h) 移动测量车的行驶速度不宜过快，且尽量以固定速度行驶，新建公路行驶速度不宜大于 30km/h，通车路段行驶速度应不超过车辆正常行驶限速；

i) 测量的同时，应记录下车辆行驶的轨迹，对比设计的行驶路线，检查车辆是否按设计测量路线

覆盖到整个测区；

j) 进行三维控制点测量时，散点应测设在有明显三维特征的角点上，以便于所测散点能在点云成果中找到对应的同名点；

k) 宜在解算出初步点云后，进行三维控制点选择并进行外业数据施测；

e) 需在采集路段周边找空旷地区用于扫描仪 POS 静置使用；

m) 测量误差应满足 JTG C10 的要求。

7.4 点云数据预处理

7.4.1 点云数据处理应满足 CH/T 8023 的要求，点云成果质量元素参阅 GB/T 18316 执行。

7.4.2 点云数据预处理一般包括点云拼接及坐标转换、点云数据分析、噪点分离和植被剔除、点云数据重新采样、点云数据过滤并导出等。

7.4.3 通过后处理软件中设置坐标系参数，结合基准站数据对 SLAM 轨迹进行解算，得到点云的绝对坐标系下的坐标。

7.4.4 当采用架站式激光雷达扫描仪时，需要以靶标中心为公共点，拼接各站点数据，将所有站点的点云数据统一到一个坐标系中。

7.4.5 去除在扫描过程中的杂散光、背景光或者系统运行中的其他一些意外因素等产生的不属于路基路面上的本身数据。见图 1。



图 1 噪音过滤与剔除

7.4.6 噪音点去除可以采用人机交互的方法，通过图形显示，判别明显坏点，在数据序列中剔除。

7.4.7 当仪器存储的数据点数量过于庞大时，应对去噪后的点云数据进行过滤精简后再导出，以减小后期数据处理的难度和工作量。

7.4.8 经预处理后的点云数据可导出进行下一步处理。

7.4.9 点云数据预处理应注意以下：

a) 当采集的单幅点云图像无法完全覆盖测量范围时，需要进行点云拼接及坐标转换；

b) 当对以仪器为原点组成的坐标空间扫描时，宜采用全局方式进行拼接，整个方法基于扫描的站点，通过与该站点同名的相应参考位置数据执行强制拼接，使点云坐标数据统一进行转换并拼接到该站相应的基准点坐标系；当以大地绝对坐标进行扫描拼接时，应利用 GNSS（或全站仪）测量出各扫描站点的绝对坐标和仪器高，拼接时直接把各站点的扫描数据转换到同一绝对坐标系下。拼接误差应控制在 20mm 以内；

注：点云拼接有两种方式：一种是选定某一测站扫描数据作为基准，其他测站数据依据重叠区域同名特征点转换到该站统一坐标系下。该方法无需控制，只需要测站间保留一定扫描重叠区域，操作简单方便。但因测站拼接误差传递影响，精度不高且整体精度不均匀。第二种方式是基于扫描站点的绝对坐标完成。利用 GNSS（或全站仪）测量出各扫描站点绝对坐标和仪器高，拼接时直接把各站点的扫描数据转换到同一绝对坐标系下。这种方式可以避免多测站是点云拼接误差累计，有效保障了整体点云数据精度。

有文献指出，现场扫描获得的数据是相互独立但又具有同名特征的，为了能够实现扫描数据坐标真实化处理，需要将 3 组数据进行拼接，任意两组数据置于同一视图空间，任意选择重合的 3 个位置即可完成彼此间位置的转化，得到完整激光扫描点云模型。

c) 应结合现场信息对点云数据进行分析判断，初步确认需要进行处理的点云数据范围；

d) 将点云数据导入点云处理软件后,先对点云数据进行肉眼观察,框选出河塘处杂草、树根、凸起物、明显高处表面的其它物体等比较明显数据噪点。再利用点云处理软件中弦高差法进行精准定位,不断调整参数进行效果预览,直至到达较为完美的去噪效果。见图 2;

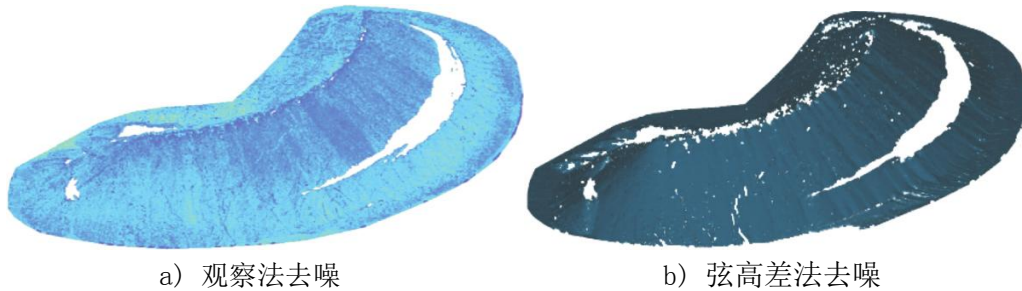


图 2 去噪方法

注:弦高差法原理。连接要检查的前后两个点,计算P到弦的距离,若点P的 $|e| \geq [\epsilon]$,其中 $[\epsilon]$ 为给定允差,则认为P是坏点,应该去除。这种方法适用于点云均衡分布但是分布比较密集情况,特别是在点云曲率明显较大情况。

点云噪声主要来源有扫描仪器系统噪声、因被测河塘表面不平整度、不均匀度以及反射程度差异产生的误差、人为干扰等。点云噪声类型有漂浮点、多余点、孤点、混杂点等4种,见图3。

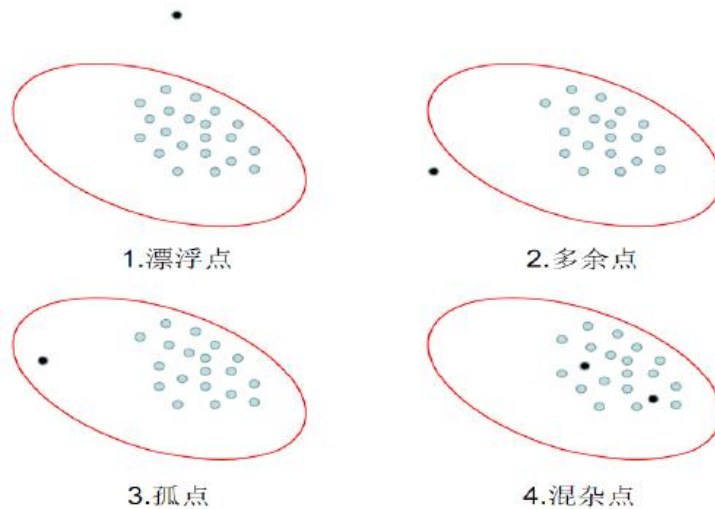


图 3 点云噪声类型

e) 对于降噪后缺失点无法通过修补优化时,应进行点云数据重新采样;

f) 当仪器存储的数据点数量过于庞大时,应对去噪后的点云数据进行过滤精简后再导出,以减小后期数据处理难度和工作量。

7.5 点云数据深化处理

7.5.1 当采集获取的点云数据不光滑时,或部分数据点有轻微偏离原始位置时,需要对点云数据进行平滑处理。

7.5.2 当采集的路基路面点云数据较大,影响系统运行速度时,应对数据进行简化并保留路基路面基本信息。

7.5.3 经正式处理后的点云数据应进行格式转换,应为 LAS 数据形式,保证数据输出及建模软件读取顺利

7.5.4 使用统计滤波算法去除噪音时,先对原始点云中每个点进行近邻搜索,统计每个点到其邻域所有点的平均距离,认为统计结果符合高斯分布后,通过均值与标准差制定一个标准区间,将平均距离在标准区间外的点判定为离群点并从原始点云中剔除。点云滤波见图 4。



图4 点云滤波

注1：统计滤波算法的数学模型为假定点云 p 中有 n 个点，任一点 p_i 的 k 邻域点集为 $N(p_i)$ ，通过公式(2)计算任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离 d_i ；然后计算点云 p 中所有点局部邻域距离的平均距离 d_0 和标准差 σ ，由式(3)和式(4)得到，设置距离阈值 $D=d_0+\lambda\cdot\sigma$ 。当某点 p_i 与其邻域中各点的平均距离 d_i 大于距离阈值 D ，则该点 p_i 为离群点并去除，反之保留。

$$d_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |p_j - p_i|, \quad p_j \in N(p_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- p_j, p_i ——点云中任意点；
- $N(p_i)$ ——点云中任一点的 k 邻域点集；
- d_i ——任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离；
- d_0 ——点云 p 中所有点局部邻域距离的平均距离；
- D ——距离阈值；
- σ ——标准差；
- k ——指距离点 p_i 最近的 k 个点。

$$d_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- d_0 ——点云 p 中所有点局部邻域距离的平均距离；
- d_i ——任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离；
- n ——点云 p 中的 n 个点；
- N ——点云 p 中的第 N 个点。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_0)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- σ ——标准差；
- d_0 ——点云 p 中所有点局部邻域距离的平均距离；
- n ——点云 p 中的 n 个点；
- d_i ——任一点 p_i 到 $N(p_i)$ 内所有邻域点的平均距离。

注2：统计滤波去噪算法的具体流程为：

- 输入原始点云，并对其建立八叉树空间索引；
- 对点云中每个点 p_i 进行 k 近邻搜索，然后统计点 p_i 到所有邻域点的距离，并计算邻域平均距离 μ 和标准差 σ ；
- 当邻域某一点距离点 p_i 超过 n 倍标准差以上时，将该点视为离群点并移除；
- 将保留的点输出。

统计滤波算法对整个输入进行两次迭代：在第一次迭代期间，它将计算每个点到其最近的 k 个邻近点的平均距离。

在计算机中使用setMeanK()设置k的值并计算这些距离的平均值和标准偏差，以便确定距离阈值，距离阈值=平均值+stddev_mult*stddev。setStddevMulThresh()为设置标准偏差的乘数。在第二次迭代期间，如果点的平均邻近距离分别低于或高于此阈值，则将其分类为非离群或离群。

7.5.5 应通过深化处理对点云数据进行反向构建被测路段形状。分为点云数据二次去噪和滤波、点云网格化、重构道路特征线以及生成土方表面三角网。

7.5.6 如果由于扫描时受到干扰物遮挡、架设站点角度和高度问题、点云精简等问题，点云数据网格化有缺失，即点云数据转化为三角网时存在空洞，则应考虑到河塘具有一定曲率，应遵循曲率优先原则对缺失的部分进行填补，使三角网接近河塘形状。见图5。

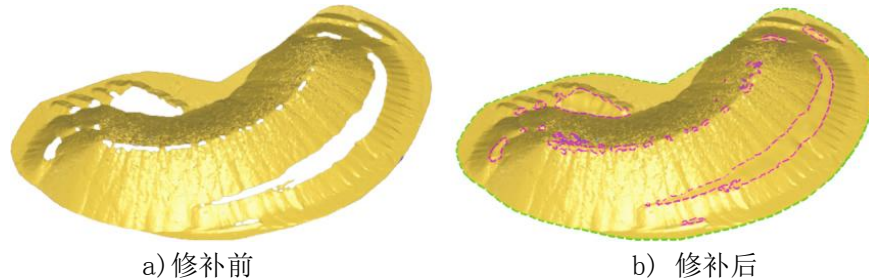


图5 修补效果

7.6 点云数据优化建模

7.6.1 点云数据优化建模应包括路基及路面的横断面、纵断面以及平面特征线，建模应满足 SJ 21226 的要求。

7.5.6 点云数据优化建模应满足 SJ 21226 的要求。

7.6.2 将点云数据导入点云建模软件后，应肉眼观察点云数据，框选出较明显的的数据噪点，再利用点云处理软件中弦高差法进行精准定位，不断调整参数进行效果预览，直至到达较为完美的去噪效果。

7.6.3 使用统计滤波算法去除噪音时，应先对原始点云中每个点进行近邻搜索，统计每个点到其邻域所有点的平均距离，认为统计结果符合高斯分布后，通过均值 μ 与标准差 σ 制定一个标准区间，将平均距离在标准区间外的点判定为离群点并从原始点云中剔除。

7.7 路基路面点云数据的提取

7.7.1 点云数据提取应按点云分段、非地面点滤波、地面点粗提取、边界点的细提取、结果聚类、边界拟合等程序进行。

7.7.2 当扫描获取的点云数据存在以下情况时，应对点云进行分段处理。

- a) 数据量庞大，数据处理困难；
- b) 道路高程变化较大，高程直方图统计时出现双峰及多峰现象；
- c) 点云数据不利于高程阈值的设置。

7.7.3 路基路面点云分段可沿施测轨迹按固定间隔对道路进行相同距离划分得到分割点，在各点处作垂直于行车轨迹的垂面，根据垂面对道路进行分段；也可采用相同数据量进行分段以确保局部范围内的高程不产生较大跨度。

7.7.4 应根据路基路面点云的具体情况，对非地面点进行滤波，对地面点提取的高程、宽度、坡度等参数及其阈值进行设置，滤波算法基本流程见附录 A。

7.7.5 根据测量结果用途，激光点云滤波方法可采用基于高程的滤波方法（见附录 B）、基于坡度的滤波方法（见附录 C）、移动窗口滤波方法以及基于不规则三角网滤波方法等。

7.7.6 对地面点的粗提取应按以下要求进行：

a) 计算某点以及局部点通过距离的最小二乘准则拟合得到平面，将该平面的法向量定义为该点的法向量，所有激光点可以此方法得到激光点的局部平面；

b) 通过主成分分析的方法构建激光点的协方差阵, 计算矩阵的特征值, 最小特征值所对应的法向量即为该点的法向量;

c) z 坐标轴与激光点法向量之间的夹角即为 α 。因路基或路面最外缘点与路基路面上的点云之间 α 角相差较大, 可通过角度差异进行路基边界点的提取;

d) 确定激光扫描的方向, 以激光雷达扫描仪的每一条扫描线为基本单位处理地面点云, 根据几何关系, 扫描线与测量方向垂直, 可近似表达为路基路面的断面线。通过设置 z 轴与法向量夹角阈值的方式对路缘点进行聚类, 对满足条件的激光点构建激光点集。在激光点集中选择高程低的激光点作为提取的路基路面边界点。

7.7.7 路基路面边界点细提取应满足以下要求:

a) 粗提取过程中可能有杂草、树木以及凸起物等轮廓点, 还应以连续性分布与距离作为约束条件进行边界点细提取;

b) 将扫描轨迹点和粗提取得到的点云投影至平面, 以扫描轨迹上某一位置为中心构建扫描带, 且垂直于扫描方向, 以扫描带宽度为边长对扫描带进行格网化处理, 标记所有包含粗提取点云的格网;

注: 对于车载式扫描仪, 若扫描车在进行路基路面点云扫描时, 靠近路中间位置, 则扫描车与扫描带中的局部道路边界的间距在一定范围内变化, 此时, 计算扫描车与标记格网的间距, 设置距离阈值 d_1 和 d_2 , 其中, d_1 为1.5倍单车道宽度, d_2 为0.75倍~1.0倍路基宽度。将满足 d_1 至 d_2 范围内标记的格网作为满足距离约束的格网。设置 d_1 的作用是排除路基路面边缘处高出路面物体对提取结果的影响; 设置 d_2 的作用是考虑路基路面宽度变化的影响。

c) 对满足条件的格网进一步进行 3×3 的格网划分, 见图6, 基于路基路面边界呈连续分布的直或者曲线这一特征, 从标记含有粗提取结果的格网中提取满足连续分布特征的格网集合。

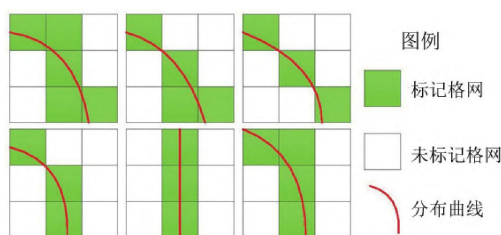


图6 根据连续分布特征进行道路精提取

注: 为了避免将路基边缘的树木、建筑物以及工程设备等轮廓误作为边界进行提取, 选择距离扫描车辆较近的格网集合作为路基路面边界提取结果。通过以上步骤可精确提取路基路面边界。

7.7.8 结果聚类按下列程序进行:

a) 取格网尺寸为点云间距的2倍~3倍对精提取结果进行格网化, 将边界点所在格网作为种子, 搜索邻域格网;

b) 将种子格网与邻域非空格网中心夹角、邻域非空格网数量作为聚类条件进行邻域生长。将格网数量小于 n_0 的聚类集合删除, n_0 为聚类阈值。

7.7.9 点云重新采样后内插得到矢量化边界, 并进行边界拟合。

注: 由于环境遮挡等因素, 导致线段连接后的路基路面边界存在缺失, 并且路基路面边界含有大量点云, 得到的3D矢量数据仍不能满足地形数据更新, 因此, 需要将道路边界点重新采样与内插得到矢量化边界。拟合的方法可采用Bezier曲线进行, 详见附录D。

7.8 成果输出

7.8.1 点云数据成果输出宜采用绘图软件, 输出过程为数据采集、文件格式转换、在绘图软件中连成线框图、对线框图进行修整、在修整图上绘制路基路面三维图、对路基路面实体模型着色渲染等。点云数据输出时, 应注意以下两点:

a) 利用三维激光扫描系统获得路基路面三维点云数据在软件环境下对三维点云数据进行优化处理然后将点云数据保存为通用交换格式以便转入到绘图软件中进行处理;

b) 可将三维特征点的坐标提取并输出成文本文档的形式，提取工作在软件下完成。提取后可直接读取所需的数据信息。

7.8.2 在绘图软件中进行文件分块、调入数据。并参照特征点和扫描到的点云数据绘制线框图。

7.8.3 三维建模应注意以下事项：

a) 规划三维建模，分析模型结构。对断面内路基、路面、边坡、边沟以及附近建筑物等进行组合，创建三维模型，再利用多种实体编辑的拉伸旋转等命令进行编辑；

b) 可用多种工具进行路基路面空间位置信息的标注；

c) 可以根据路基路面材料颜色进行实体渲染；

d) 可根据需要生成平面图、纵断面图和横断面图；

e) 可用绘图软件中读取任一点高程、任一断面的路基边坡坡度、横坡度，还可根据高程分布判断路基路面的平整度。

7.8.4 激光点云数据经处理输出后，可在成果图中直接读取路基路面高程、横坡、边坡、宽度等信息，并与设计信息对比，自动形成测量报告，测量报告形式宜与T/JSTERA 39—2022保持一致。

7.8.5 可根据成果图，采用不规则三角剖分方法计算路基填筑土方量。

7.8.6 可在成果图中智能判断出路基或路面凹凸不平路段、边坡冲刷路段、积水路段以及其它缺陷点。

8 点云质量评价与改进

8.1 智能测量精度主要与测量仪器系统误差、施测方法以及激光点云处理质量决定。

8.2 应以检测质量 Q、完整性 R、准确度 P 作为地面点提取精度统计与分析的定量评价指标，见式(5)~(7)。

$$Q = \frac{TP}{TP + FP + FN - FM} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

Q ——点云测量检测质量结果；

TP——正确提取的边界长度；

FP——错误提取边线长度；

FN——未提取的边线长度；

FM——由于点云缺失无法提取的边线长度。

$$R = \frac{TP}{TP + FN - FM} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

R ——点云测量完整性；

TP——正确提取的边界长度；

FP——错误提取边线长度；

FN——未提取的边线长度；

FM——由于点云缺失无法提取的边线长度。

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

P ——点云测量准确度；

TP——正确提取的边界长度；

FP——错误提取边线长度；

FN——未提取的边线长度；

FM——由于点云缺失无法提取的边线长度。

- 8.3 总体检测质量 Q 应不小于 95%，提取完整性 R 应不小于 95%、提取准确度 P 应不小于 90%。边界提取后应在点云场景中均匀采集 20 个道路边界点作为检测点进行复核，计算检测点与提取得到的道路边界线之间的平面距离，实测偏差应小于 30mm。
- 8.4 测量仪器的系统误差可采用建立误差改正模型、系统检校和平差改正等方法进行。
- 8.5 可以通过改变施测方法减少误差。
- 8.6 激光点云处理质量对智能测量精度的影响主要表现为点云原始质量和地面点提取质量。提升点云原始质量的方法应通过仪器精度、仪器移动速度的调整实现。

附录 A
(资料性)
滤波算法

A.1 限制点云处理范围。应尽量减少点云在滤波过程中需要处理的点云数据量，宜将路表以上和以下一定范围内的点云选取出来进行滤波处理。

A.2 点云数据格网化。应先确定点云区域的最大路面宽度 S 以及平面坐标的取值 (x_{\min} 、 x_{\max} 、 y_{\min} 、 y_{\max})，再计算点云所在格网行数 (L)、列数 (C) 和点云格网化格网数目。通过 S 可以确定格网边长，按式 (A.1) 计算。L、C 的计算见式 (A.2)。

$$\begin{cases} m = \text{int}\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{S}\right) + 1 \\ n = \text{int}\left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{S}\right) + 1 \end{cases} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中，

- S ——点云区域的最大路面宽度
- Int ——取整；
- x ——激光点的横坐标；
- y ——激光点的纵坐标；
- m ——x 方向格网数；
- n ——y 方向格网数。

$$\begin{cases} L = \text{int}\left(\frac{x - x_{\min}}{S}\right) + 1 \\ C = \text{int}\left(\frac{y - y_{\min}}{S}\right) + 1 \end{cases} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中，

- L ——点云所在格网行数
- C ——点云所在格网列数
- S ——点云区域的最大路面宽度
- Int ——取整；
- x ——激光点的横坐标；
- y ——激光点的纵坐标。

A.3 确定种子点。应先确定每个格网内激光点个数 N，再设置激光点个数阈值，如果某格网内激光点个数少于阈值，则该激光格网内所有激光点可视为非地面点，不参与种子点的选取。最后，将参与种子点选取的格网内高程最低点作为种子生长点。

A.4 确定种子点后，应判定其可靠性。因路基路面地面激光高程差异较小，通过式 (A.3) 判定格网内初筛种子点 O，计算 $\sum H$ ，若 $\sum H$ 小于设置阈值，则初筛种子点 O 可认定为地面种子点，若 $\sum H$ 大于阈值，则，种子点高程为 H_1 至 H_8 的平均高程。

$$\sum_{i=1}^8 H = \frac{|H_1 - H_0| + |H_2 - H_0| + \dots + |H_8 - H_0|}{8} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中，

$H_1 \sim H_8$ ——格网相邻的 8 个格网种子点高程;
 H_0 ——格网初筛种子点高程。

A.5 构建初始稀疏 TIN。为了在构建 TIN 时避免生成狭长三角形及保证三角网中的三角形的规则性, 需要满足两个条件:

- a) 构成的三角形的外接圆内部与圆上没有其他点;
- b) 三角形的最小内角之和最大化。

A.6 提取地面点。通过设定的滤波参数选取基准三角网附近新的地面点加密三角网。其中, 基准三角网与新的地面点 $O(x_0, y_0, z_0)$ 的垂直距离 d 为长度滤波参数。 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为角度滤波参数, 见图 A.1 和公式 (A.4) ~ 公式 (A.6)。

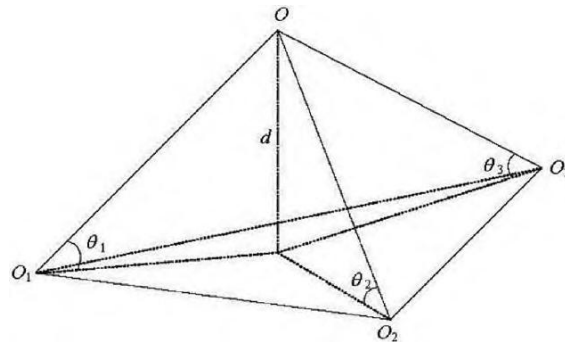


图 A.1 滤波参数示意图

$$d = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

- d ——长度滤波参数
- x_{oi}, y_{oi}, z_{oi} ——顶点坐标;
- a, b, c ——分别表示 O_1O_2 、 O_1O_3 、 O_2O_3 的距离。

$$\theta_i = \arcsin \frac{d}{S_{oi}}, i = 1, 2, 3 \dots\dots\dots (A.5)$$

式中:

- d ——长度滤波参数
- S_{oi} ——一点 O 至三角形 3 个顶点之间的距离。

$$S_{oi} = \sqrt{(x_{oi} - x_o)^2 + (y_{oi} - y_o)^2 + (z_{oi} - z_o)^2} \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

- S_{oi} ——一点 O 至三角形 3 个顶点之间的距离;
- x_{oi}, y_{oi}, z_{oi} ——顶点坐标。

A.7 如果公路路线纵断面起伏超过 10%, 角度滤波参数的阈值不能设置过小; 如果路线起伏不大, 则阈值可以设置较小。

A.8 在提取地面点时, 应先计算激光点所在三角形及滤波效果, 如果滤波参数大于阈值, 则该激光点为非地面点, 如果参数小于阈值, 则将该点作为地面点提取。

附录 B

(资料性)

基于高程阈值的非地面点过滤方法

B.1 由于扫描的路基路面周边地物的高程可能高于路面高程，所以可通过设置高程阈值来去除大部分非地面点，实现对道路路面的粗提取。不同路段路面高程不同，需要设置不同高程阈值。

B.2 Otsu 算法主要运用于二值图像的全局自适应阈值分割，属于一种非监督分类方法，其原理是依次使用不同的阈值对图像进行二值分割，然后分别计算前景与背景部分间的类间方差，当类间方差最大值时求得的阈值即为最佳分割阈值。

B.3 将 Otsu 算法的思想引入到高程阈值选取中，自适应计算出最佳高程分割阈值，对高程高于阈值的非地面点进行滤除，低于阈值的点予以保留。

B.4 输入点云数据，记录点云总个数 N ，获取高程的最大值 N_{\max} 和最小值 H_{\min} ，之后将高程分为 L 个等级，统计各高程等级中点云个数 n_i ，每个高程等级概率 p_i 计算见公式 (B.1)。

$$p_i = \frac{n_i}{N} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

p_i ——高程等级概率；

n_i ——各高程等级中点云个数；

N ——点云总个数。

B.5 假设以高程值 k ($H_{\min} < k < H_{\max}$) 为阈值将原始点云分为 C_0 和 C_1 两部分，则两部分点云出现概率为式 (B.2)，高程平均值为 (B.3)。

$$\begin{cases} \omega_0 = P(C_0) = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \\ \omega_1 = P(C_1) = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \end{cases} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

ω_0 —— C_0 部分点云出现的概率；

ω_1 —— C_1 部分点云出现的概率；

p_i ——高程等级概率。

$$\begin{cases} \mu_0 = \sum_{i=1}^k iP(i/C_0) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)} \\ \mu_1 = \sum_{i=k+1}^L iP(i/C_1) = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)} \end{cases} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

μ_T ——点云总体平均高程；

μ_0 —— C_0 部分点云的平均高程；

μ_1 —— C_1 部分点云的平均高程；

p_i ——高程等级概率

B.6 计算分割后地面点云与非地面点云之间的高程类间方差 g ，见式 (B.4)。

$$g = \omega_0\omega_1(\mu_0 - \mu_1)^2 \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

g —— 高程类间方差；

ω_0 —— C_0 部分点云出现的概率；

ω_1 —— C_1 部分点云出现的概率；

μ_0 —— C_0 部分点云的平均高程；

μ_1 —— C_1 部分点云的平均高程；

B.7 选取新的高程阈值 k ，重复上述步骤，直到类间方差取得最大值时的阈值即为最佳分割阈值 T 。将高程值大于阈值 T 的非地面点进行剔除，留下高程小于阈值 T 的点。

附录 C
(资料性)
基于坡度的滤波方法

C.1 算法流程图

C.1.1 算法主要分为数据组织与预处理、地形判断与多尺度滤波、优化处理与数据输出 3 部分。

C.1.2 基于坡度的滤波方法流程见图 C.1。

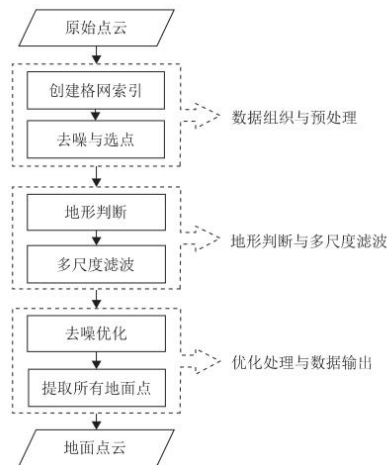


图 C.1 算法流程图

C.2 数据组织与预处理

C.2.1 创建格网索引，建立二维格网，将原始点云投影到 xoy 平面。

C.2.2 去噪与选点。在选取地面种子点前，先进行高程分析统计去噪，即对每个格网中的点按高度分层，若某一层中点数小于平均点密度的 $1/10$ ，则认为该点为孤立的噪点，需要去除。同时为了避免所选取的最低点是位于地面以下的噪点，改为选取每个格网内的次低点作为地面种子点。如图 C.2 所示。

C.2.3 如图 C.3 所示，若中心格网内所包含的点全是高于地面的非地面点，所选取的地面种子点也会是非地面点。因此，可以利用高差进行判断，将高差阈值 H 设定为 2 倍格网边长，计算该中心点与 8 邻域格网内地面种子点的高差 ΔH_i ($i=1, 2, \dots, 8$)，若 ΔH 大于 H 的邻域格网点数 $N=8$ ，则认为该点是非地面点，需要去除。

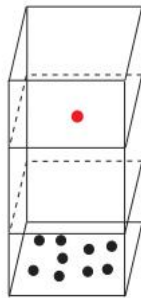


图 C.2 格网分层孤立点

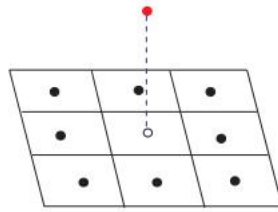


图 C.3 中心点与 8 邻域过高示意图

C.3 地形判断与多尺度滤波

C.3.1 如图 C.4 所示，计算某窗口内临近点之间的坡度，并对坡度进行分段，统计出坡度的频率分布情况，由曲线可以看出窗口内点云坡度值符合正态分布的统计规律。

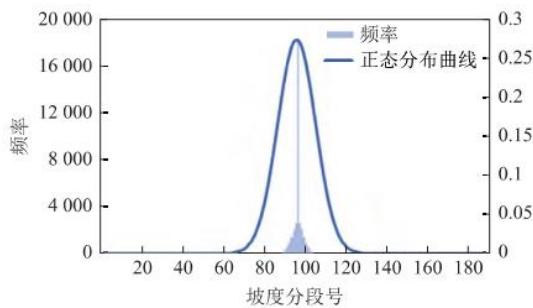


图 C.4 坡度频率分布图

C.3.2 进行滤波时，首先要计算较大窗口内的坡度值，统计局部坡度分布情况，将地形分为 3 类；然后根据地形选用不同尺度的滤波窗口，计算出该窗口范围内的局部坡度阈值；最后利用计算出的局部坡度阈值，对相应区域内的点云进行判断，得到准确的地面点。

C.3.3 地形判断。进行地形判断时，所选择的窗口大小应该顾及周围地形，不能过小，但是如果窗口过大，会同时包含多种地形信息，错判地形情况，导致滤波失败。考虑到以上问题，根据所处理的数据，设定 9×9 格网作为地形判断窗口 W_0 。

C.3.4 根据正态分布的统计规律，剔除一些可能有异常的坡度值，即计算出坡度均值 μ 与标准差 σ ，选取 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 内的最大坡度作为该窗口内判断地形的坡度值 S_0 。考虑到实际道路路面会有起伏，所以选择坡度值 0.3 作为路面与斜坡的分界值。若 $S_0 < 0.3$ ，则认为非边坡； $0.3 \leq S_0 < 1$ 则认为是缓坡； $S_0 \geq 1$ 的部分可认为是地形比较复杂的陡坡。

C.3.5 多尺度滤波。根据坡度值 S_0 判断出地形后，选择合适的滤波窗口 W_0 进行滤波。路面等平坦地形坡度变化较小，采用较大窗口可以更准确地判断中心点坡度，所以直接采用地形判断窗口 W_0 计算窗口内中心点与邻域格网内点的坡度。山地等地形坡度变化较大，若窗口过大，计算出的坡度阈值可能无法准确表示中心点坡度，所以要选择较小的窗口。考虑到数据要具有统计特性，数量不能过少，所以选择 5×5 格网作为较小的滤波窗口 W_s 。缓坡地形则选择介于二者之间的 7×7 格网作为滤波窗口 W_m 。按式 (C.1) 选择合适的滤波窗口。

$$\begin{cases} W_0 = W_s, S_0 < 0.3 \\ W_0 = W_m, 0.3 \leq S_0 < 1 \\ W_0 = W_b, S_0 \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

T/JSJTQX 37—2023

S_0 ——地形的坡度值；

W_0 ——合适的滤波窗口；

W_s —— 5×5 点云格网滤波窗口；

W_m —— 7×7 点云格网滤波窗口 W_m 。

C.3.6 选取合适的窗口后，需要计算出坡度阈值 S_m 来确定地面点。坡度阈值由中心点与窗口 W_0 内的所有邻域格网点的坡度值决定。同样选取 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 范围内所有坡度 S_i ，剔除粗差或疑似异常值，按照式 (C.2) 计算坡度阈值 S_m 。然后以中心点与 8 邻域格网点的最大坡度作为该点坡度，若小于阈值 S_m 则认为是地面点，否则需去除。

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i, S_i \in (\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma) \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

N ——在 $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ 范围内坡度数量；

S_m ——坡度阈值。

C.4 优化处理与数据输出

C.4.1 去噪优化。完成上述滤波后，可能还会存在少量噪点，如图 C.5 红点所示。这类噪点主要特征是周围没有临近点，处于孤立的位置。本文基于邻域判断去噪，以待判点为中心点，以窗口 W_0 为判断范围，统计该点的邻域格网内是否有点，如果有点的格网数小于窗口内格网总数的一半，即周围点数过少，则去除该中心点。

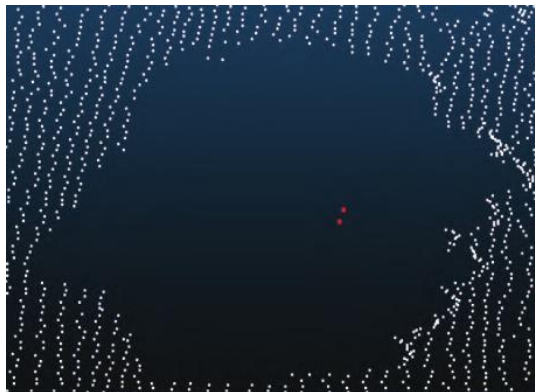


图 C.5 孤立点示意图

C.4.2 提取所有地面点。以所得到的地面种子点提取所有地面点。对于中心格网内各点，分别计算其与 8 邻域格网内地面种子点的坡度，求取均值 S_{sm} ，以上述的阈值 S_m 进行判断，若 $S_{sm} < S_m$ 则该点为地面点。然后对所有格网进行上述判断，提取出地面点。

附 录 D
(资料性)
Bezier 曲线道路边界拟合方法

D.1 Bezier 曲线中点的参数方程以式 (D.1) 表示。

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t), \quad t \in [0,1] \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

P_i ——第 i 个顶点的坐标;

$B_{i,n}(t)$ ——为 n 阶 Bernstein 基函数多项式, 见式 (D.2)。

$$B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$B_{i,n}(t)$ ——为 n 阶 Bernstein 基函数多项式;

C_n^i ——为 0 至 n 的系数。根据 Bernstein 基函数特性, 如果 $n=0$, 那么 Bezier 可视为一个顶点; 如果 $n=1$, 那么 Bezier 可视为一条直线, 这条直线连接两个顶点; 如果 $n \geq 2$, 那么 Bezier 可视为一条曲线。

D.2 通过 Bezier 曲线拟合线段, 曲线控制点的个数 n 与函数的次数应当一致。拟合高阶 Bezier 曲线的计算量随着控制点个数的增大而提高。可以通过多段 Bezier 曲线组成整段 Bezier 曲线的方式得到理想曲线。

D.3 为了使得到的整段 Bezier 曲线更加光滑, 分段 Bezier 曲线需同时满足两个条件, 一是相邻两个控制点与连接点需在同一直线上, 二是保证上一段曲线的终点与下一段曲线的起点为同一点。分段 Bezier 曲线形状可通过 4 个顶点进行控制, 并且采用 3 次 Bezier 曲线, 见公式 (D.3)。

$$P(t) = \sum P_i B_{i,3}(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3, \quad t \in [0,1] \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$P_0 \sim P_3$ ——为 Bezier 曲线的控制点;

$P(t)$ ——为插值后 Bezier 曲线中的某一点, 将式 (D.3) 转化为式 (D.4)。

$$P(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 & P_1 & P_2 & P_3 \end{bmatrix}^T, \quad t \in [0,1] \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中的系数矩阵就是三阶 Bezier 控制矩阵。

D.4 通过以上描述变换, Bezier 控制点可控制矩阵能够将曲线转化为多段直线, 获得量化的道路边界, 从而实现路面边界提取。

参 考 文 献

- [1] 骆磊, 马荣贵, 薛昊. 基于无人机的道路点云数据分割提取算法[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(2): 169-174.
- [2] 方莉娜, 杨必胜. 车载激光扫描数据的结构化道路自动提取方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 260-267.
- [3] 惠振阳, 胡友健, 康妍斐. 基于反射强度偏度平衡的道路点云提取算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 439-445.
- [4] 安瑶军, 陈晓轩, 隋立春, 等. 一种依据点云法向量相似度的结构化道路提取方法[J]. 测绘通报, 2018(11): 69-72.
- [5] 胡啸, 黄明, 周海霞. 车载激光扫描数据的高速道路自动提取方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(3): 101-106, 158.
- [6] 黄思源, 刘利民, 董健, 等. 车载激光雷达点云数据地面滤波算法综述[J]. 光电工程, 2020, 47(12): 3-14.
- [7] 李洪川, 楚恒, 霍英海. 城市道路的多特征多核SVM提取方法[J]. 测绘通报, 2018(2): 72-77.
- [8] 房华乐. 面向对象的移动激光扫描点云数据提取城市道路信息方法研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [9] 马浩, 王留召. 基于车载激光点云的道路边线自动分类与提取[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 126-128, 116.
- [10] 马天浩, 谭海, 李天琪, 等. 多尺度特征融合的膨胀卷积残差网络高分一号影像道路提取[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 341-348.
- [11] 李雅盟, 李朝奎, 王书涵, 等. 一种顾及地形特征的布料模拟滤波改进方法[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1261-1268.
-