基于无人机的超高海拔地区路面平整度检测与评价

张 雪　郝天琪

西藏大学，西藏 拉萨 850000

摘要：为检验无人机 LiDAR 技术在超高海拔地区路面平整度检测上的应用性，选择 G317 国道尼玛县中仓乡段 K2607—K2630 作为研究区，用机载点云数据建立了平整度检测及评价的流程。首先用 3DMASC 框架加随机森林做道路场景分类，总分类精度达到 98.518%；其次用主成分分析提取道路中心线，里程标定误差控制在±0.2m 之内。结果显示全路段 IRI 均值为 0.4767m/km，98.87%的采样点评定为“优”，只有 0.06%超过 4.0m/km；异常区段有 3 处，最大 IRI 为 5.7499m/km，且和冻土活动层较厚、差异沉降率超限的区段空间重合，说明冻融循环引起的路基不均匀沉降是平整度劣化的主要原因。可以给超高海拔冻土区公路养护决策提供技术支持。

关键词：无人机；超高海拔地区；路面平整度；国际平整度指数；四分之一车模型

0 引言

青藏高原是全球冻土分布最广、海拔最高的地区之一。G317 国道尼玛县至改则县段穿过藏北羌塘高原，沿线冻土、水文、气候等各方面的差异很大。这里长期温度低，冻融循环还特别频繁，再加上紫外线强、风又大，这种极端气候把这段路的路面结构折腾得经常开裂、不均匀沉降、波浪变形等病害，既危及行车安全，又大大增加了养护费用。

传统的检测方式主要是二维图像分析和人工巡检，虽然操作简便，但是高寒环境下效率低、危险大，并且不能得到路面的三维几何信息，难以发现隐藏病害和细微变化。摄影检测易受天气、光照影响，复杂环境下稳定性差，无法长距离路面连续全方位监测。

随着激光雷达（LiDAR）技术慢慢发展，点云数据现在已经成了做三维几何形态分析、表面形变监测的一个好工具了。机载 LiDAR 能快速采集到高密度的三维点云，用来提取路面几何特征、评价路面平整度，其实有挺大优势的。现在针对超高海拔冻土区道路，用机载 LiDAR 做平整度检测的研究还不多，相关的原理和评价方法都还得再接着研究才行。

本文以 G317 国道尼玛县中仓乡段 K2607-K2630 为研究对象，利用无人机机载 LiDAR 点云数据，完成从点云分类、中心线提取、IRI 计算及评价的全部技术流程，为超高海拔地区公路平整度检测提供一种可行的技术途径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究路段位于西藏那曲市 G317 国道尼玛县中仓乡，桩号 K2607 至 K2630，总长约 22km，海拔在 4890～4981m 之间，为藏北羌塘高原腹地永久冻土区。该区域位于唐古拉山脉、念青唐古拉山脉和冈底斯山脉之间，地势高旷开阔，高原丘陵、宽谷湖盆为主，总体呈西北高、东南低的倾斜状。

公路为三级标准，路基宽度 7.5m，面层为沥青混凝土。研究区属于高原亚寒带到寒带半干旱气候，年均气温低，昼夜温差一般大于 15℃，降水集中在 6 月至 9 月，地下水埋深浅。区域内土壤主要为寒钙土，砂粒含量高、粘粒含量低，结构松散，抗变形能力差，在冻融循环作用下容易造成土体重组和沉降，给路基不均匀沉降创造了先天条件。因此选择该路段开展平整度检测方法研究，具有典型性以及工程实际意义。

1.2 数据获取

1.2.1 无人机 LiDAR 数据获取

数据采集平台采用大疆 Matrice 350 RTK 无人机，搭载禅思 Zenmuse L2 激光雷达系统，配合 DJI RC Plus 遥控器构成一体化机载 LiDAR 检测系统。Matrice 350 RTK 配有多频 GNSS 接收机，内置 RTK 模块可实现厘米级定位。Zenmuse L2 集成了帧式激光扫描仪、高精度惯性测量单元和 4/3 CMOS 测绘相机，最大有效测程为 100 米，脉冲重复频率为 480kHz，扫描视场角为 70 度，多回波模式下点云数据率为 1200000 点/秒。

飞行高度设定为 25 m，速度 2 m/s，航向重叠率 70%，旁向重叠率 50%，采用多回波模式。数据采集于 2026 年 7 月 2 日至 9 日进行，选择晴朗、微风天气，每日采集时段为上午 11:00 至下午 16:00，气温-5℃至 15℃，风速小于 10 m/s，能见度大于 10 km。研究路段共获取点云约 5.78 亿点，数据量 18.3 GB，坐标系统为 WGS84/UTM zone 45N（EPSG:32645），格式为 LAS 1.4。

1.2.2 地面数据获取

为了检验点云分类以及平整度计算结果是否可靠，从研究路段中选取典型的路面样本进行实地采集和记录。样本类型为不均匀沉降、裂缝、坑槽等主要病害，选取平整度好的路段做为对照。所有的地面数据都要做位置记录并拍照保存，用以日后分类精度检验、平整度评价结果核对以及异常区段成因剖析。

1.3 点云分类与中心线提取

1.3.1 基于 3DMASC 的点云分类

道路场景分类用 3DMASC 多属性、多尺度框架加随机森林，把地物分为中心线、路肩、路面、路基边坡、路牌、栏杆、车辆共七类。多尺度邻域半径取 0.2～2.0m，步长为 0.2m，共 10 个尺度，特征维度为 65 维，包含 RGB 颜色分量、回波次数、激光回波强度等原始单点特征，还有局部法向量倾角、法向量倾向、邻域高程极差、表面平整度、平面度、球度等多尺度几何特征。

分类结果表明，总体分类精度为 98.518%，路面和中心线的精确率都大于 0.99。分类之后再融合中心线、路肩和路面点云，用 3σ 准则剔除高程异常值，用 DBSCAN 密度聚类去除离散噪声点，建立 KDTree 空间索引，给后续中心线提取和高程统计提供高质量的数据基础。

1.3.2 基于 PCA 的中心线提取

为了解决点云空洞和噪声问题，用主成分分析（PCA）提取中心线。将路面点云平面坐标进行中心化处理，得到协方差矩阵，然后进行特征值分解，最大特征值所对应的轴向就是道路主方向。段主方向为北偏东 80.2°，偏离设计路线小于 0.3°。以 0.5m 为步长分段后投影到横向，取 15%和 85%分位数作为左右边界，经过 10 点滑动均值滤波和 0.4m 梯度阈值修正后，取横断面中点得到对称中心线。以起点为零点累计空间距离标定里程，与人工实测偏差控制在±0.2m 以内。用 0.25m 半径邻域高程中位数作为中心线点代表高程，按 1m 间隔重采样，数据完整性达到 99.99%，输出 22km 全段连续、无断点的标准化里程—高程序列。

1.4 路面平整度计算方法

IRI 用路面高程剖面对标定的标准四分之一车模型进行动态响应的模拟，运行速度为 80km/h。四分之一车模型把车辆简化成簧上质量和簧下质量的二阶系统，只考虑垂向运动：

$$m_s\ddot{z}_s+c_s(\dot{z}_s-\dot{z}_u)+k_s(z_s-z_u)=0$$

$$m_u\ddot{z}_u+c_s(\dot{z}_u-\dot{z}_s)+k_s(z_u-z_s)+k_t(z_u-z_r)=0$$

式中，m_s、m_u 分别为簧上与簧下质量，k_s、k_t 为悬挂与轮胎刚度，c_s 为悬挂阻尼，z_s、z_u、z_r 分别为车身、车轮位移及路面高程。标准化参数：悬挂刚度比 63.3 s^{-2}，轮胎刚度比 653 s^{-2}，悬挂阻尼比 6.0 s^{-1}，非悬挂质量比 0.15。采用状态转移矩阵法离散求解，IRI 离散计算式为：

$$IRI=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|s_{s,i}-s_{u,i}|$$

计算前对高程剖面进行 250 mm 基长移动平均平滑，以模拟轮胎包络效应。依据《公路技术状况评定标准》（JTG 5210—2018），IRI≤2.0 m/km 为“优”，2.0～4.0 m/km 为“良”，4.0～6.0 m/km 为“中”，大于 6.0 m/km 为“差”。将 IRI>4.0 m/km 定义为异常段，作为后续重点分析对象。

2 结果与分析

2.1 高程剖面与采样质量

研究段实际里程 22612.10 m，采样间隔 0.10 m，平均间隔 0.1000±0.0002 m，远优于传统人工检测的 5～10 m 间隔，可精准捕捉路面微起伏细节。中值高程均值为 4528.7632 m，标准差 0.5418 m，与羌塘高原平均海拔相符。中值高程和平滑高程的平均绝对差为 0.001743m，最大偏差为 0.033813m，说明平滑处理只去除点云拼接微小误差，没有改变真实的起伏形态。全数据只有三个采样点缺失，用 5 邻域线性插值得到的偏差小于 0.002m，完整性达到 99.99%，没有出现数据断裂或者异常突变的情况。

2.2 路面平整度空间分布

整个路段的 IRI 平均值是 0.4767 m/km，标准差是 0.4424 m/km。其中 98.87%的采样点，共 223568 个，IRI 都≤2.0 m/km，平整度评定是“优”；还有 1.07%，一共 2417 个，IRI 在 2.0～4.0 m/km 之间，评定是“良”；只有 0.06%，也就是 126 个采样点的 IRI 超过了 4.0 m/km，整条路没有 IRI>6.0 m/km 的“差”级路段。总的来说这条路整体平整度较好，但局部地方因为冻融作用出现了一点点小起伏。

IRI 超过 4.0 m/km 的高值区段共三处：第一处在里程 182.9～183.5 m 的位置，这里最大 IRI 是 5.7499 m/km；第二处是 658.1～658.2 m，最大 IRI 是 4.8923 m/km；第三处在 19876.3～19876.8 m，最大 IRI 为 4.3217 m/km。通过现场实地调查，确认这几个区段都刚好在冻土活动层比较厚的地方，这种情况和冻融循环导致路基沉降不均匀有很大关系。

局部坡度与 IRI 存在强正相关。全路段坡度平均值 0.0116，标准差 0.0083，正坡度占 51.23%，负坡度占 48.77%，路面微观起伏对称性良好。三处高 IRI 区段坡度绝对值平均值为 0.0223，约为全路段平均值的 1.92 倍。例如里程 183.2 m 处坡度为 -0.0317°，高程下降，对应 IRI 为 5.7499 m/km，验证了“坡度突然变陡→路面起伏变大→IRI 升高”物理逻辑的正确性。

2.3 区域分布与差异沉降

经过纵坡趋势提取、去趋势残差分析、球状半方差函数和差异沉降率计算，得到全路段约 20km 平整度区域分布情况。趋势高程从 0 m 里程约 4970 m 降至 20000 m 约 4860 m，整体降幅约 80 m，为整体下坡路段。里程 0～8000 m 原始高程偏离趋势较大；8000～13000 m 贴合度较高，为纵断面线形最优段；13000～20000 m 出现长波幅偏离。

去趋势残差在-15～+20 m 波动，局部峰值+18 m，谷值-14 m。0～8000 m 波动频繁；8000～13000 m 小幅波动；13000～20000 m 波动最大。球状半方差函数拟合得块金值 0.00031，拱高 0.00102，基台值 0.00133，变程 100.0 m。变程 100 m 符合规范推荐的检测单元长度，也为滑动窗口分析提供了理论依据。

用 100m 滑动窗口计算差异沉降率和 IRI 联合分布。差异沉降率整体低于 3%，但在里程 182.9～183.5 m、658.1～658.2 m、19876.3～19876.8 m 等区段超过 3%，最大值约 4.5%。IRI 在全路段大部分区段小于 2m/km，但是在上述区段同时上升。里程 182.9～183.5m 处 IRI 大于 5m/km，与差异沉降率峰值一致，并且同时超过差异沉降率 3%和 IRI6m/km 两个阈值，是平整度最差、不均匀沉降最严重的部位。

2.4 模型效果评价

研究按照“3DMASC 分类→边界拟合中心线→邻域中位数高程→四分之一车模型 IRI 计算”流程进行，把点云数据转换成了平整度指标。高密度 0.10m 间隔采样、中位数去噪、线性插值补全这一套组合方法，解决了极端环境里点云噪声大、路面空洞多的计算难题。处理完之后，全路段的 IRI 值没出现异常波动，数据可靠性比传统检测方法更好。

3 讨论与结论

3.1 讨论

无人机 LiDAR 可以快速建立道路三维模型，克服了传统方法效率低、范围小、信息不全的缺点，在超高海拔冻土区具有非接触、高精度、高效率的优势，但是受到移动目标遮挡、天气和路面清洁度的影响。IRI 为全球通用指标，可以较好地反映纵向起伏对行车舒适性的影响，但是只能表征纵向平整度，不能量化横向车辙和局部坑洼；对于波长小于 2m 和大于 35m 的缺陷没有敏感性；不能区分病害成因。之后可以建立结合差异沉降率、横向平整度、路面破损率的综合评价体系。

3.2 结论

本文使用无人机 LiDAR 点云对 G317 国道 K2607-K2630 段进行路面平整度检测与评价，主要结论如下所示

（1）用 3DMASC 加随机森林完成道路点云分类，总精度达到 98.518%，路面和中心线精确率都大于 0.99 和 0.95，给平整度分析赋予了优良的数据根基。

（2）用 PCA 提取中心线，里程偏差控制在±0.2m 之内，得到标准化里程—高程序列，采样间隔为 0.10m，数据完整性为 99.99%。

（3）以高密度中心线采样点驱动四分之一车模型计算 IRI，全路段平均 IRI 为 0.4767 m/km，98.87%的采样点达“优”级，仅 0.06%超过 4.0 m/km。

（4）发现了 3 个 IRI 异常区段，最大 IRI 为 5.7499m/km，和冻土活动层较厚、差异沉降率超限的区域相吻合。

综上所述，本文证明了无人机 LiDAR 在超高海拔地区路面平整度检测和评价中是可行的、准确的，形成了一套完整的从点云采集、分类、中心线提取到 IRI 计算和评价的技术流程，可以为类似极端环境地区道路检测提供可推广的技术途径。

参考文献：

[1] 高仁强，张显峰，孙权，等. 基于无人机 LiDAR 数据的公路路面监测和平整度评价方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2018，26(4)：681-696.

[2] Sayers M W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile[J]. Transportation Research Record，1995，1501：1-12.

[3] 王建锋，宋宏勋，马荣贵. 路面平整度评价指标 IRI 的影响因素[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2012，31(6)：1145-1148.

[4] 常成利，荣建，任福田. 国际平整度指数的计算方法[J]. 北京工业大学学报，2012，38(10)：1543-1547.

[5] 冉有华，李新. 青藏高原多年冻土地温与热稳定型分布图（2005—2015）[DB]. 国家青藏高原科学数据中心，2019.

[6] Chai M，Li G，Ma W，et al. Damage characteristics of the Qinghai-Xizang Highway in permafrost regions based on UAV imagery[J]. International Journal of Pavement Engineering，2023，24(2)：2038381.

[7] 中华人民共和国交通运输部. 公路技术状况评定标准：JTG 5210—2018[S]. 北京：人民交通出版社，2018.

作者简介：张雪（2000—），女，汉，硕士研究生，路面平整度。

郝天琪（1999—），男，满，硕士研究生，道桥设计。

基金项目：本项目由西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目资助（项目编号 2025-GSP-S009）（注：指导老师潘雾）。