

基于车载激光点云的道路平整度检测新方法研究

黄庆财

(福州新区开发投资集团有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:路面平整度是评定道路路面质量的主要技术指标之一,传统的平整度测量方法检测效率低、劳动强度大,难以满足道路快速巡检和公路养护的需求。移动测量系统能够快速动态获取高精度道路点云数据,能详细再现道路的细节特征。因此,通过分析车载点云的精度特点以及国际平整度 IRI 的计算方法,提出一种应用车载激光点云进行路面平整度检测的方法,首先对车载点云数据进行预处理,沿轮迹带方向提取路面点;然后采用等间距邻域均值采点的方式获取路面高程值;最后使用路面高程值进行 IRI 计算并与高精度水准数据计算的标定结果进行对比。实验结果表明,车载移动测量系统能够用于路面平整度的快速检测。为道路三维快速巡检和公路养护提供了技术支持。

关键词:车载移动测量系统;路面平整度;激光点云数据

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0057-04

0 引言

至2020年末,全国公路总里程519.81万km,其中高速公路16.10万km,国道里程37.07万km,省道里程38.27万km,农村公路里程438.23万km^[1]。随着各等级道路陆续投入使用,道路信息化及日常巡检工作量日益增加,路面平整度(IRI)作为道路工程质量评价和后期养护管理的重要性能指标,其不合格会导致道路结构的加快破坏,缩短养护周期^[2]。美国联邦公路局从1917年开始使用仪器检测路面平整度,我国从上世纪60年代开始注意到路面平整度的检测。目前,平整度检测的方法主要分为断面类和响应类两大类^[3]。我国用于平整度检测的传统方法主要有:水准测量、3m直尺测量、连续式路面平整度仪测量、车载式颠簸累积仪测量、激光平整度仪测量。

水准仪能够精确获取路面的高程值,是最基本的平整度检测设备,但是依赖纯手工操作,检测效率低,通常只用于对其他各种检测方法和仪器设备进行标定。3m直尺法应用标有高度标线的塞尺塞进立面间隙处,测量直尺底面与路面之间的最大间隙高度,多次测量取平均值来反映路面的平整度;该方法工作人员的劳动强度大、主观影响明显且效率低

下。连续式路面平整度仪由前后四个支撑轮进行支撑,依靠机架中部安装的测量轮和记录仪在行驶过程中记录平整度仪的纵向位移量,当平整度仪高速移动时,检测精度较低。车载式颠簸累积仪是一种反映类检测平整度仪器,用于反映车辆行驶过程中车辆后轴与车身的位移累积值;这类方法需要经常对其进行标定,标定过程费时费力,适用性不强。车载式平整度仪利用高精度位移传感器对路面点进行纵向扫描,获取路面点的高程值,进而计算IRI值;该方法具有高精度、高效率的特点,是目前平整度检测技术的主要发展方向。

传统的平整度测量方法存在检测效率低、劳动强度大、干扰交通、检测仪器依赖进口、价格昂贵、检测结果及评价标准与我国公路发展水平不符等诸多不足;车载移动测量系统能够快速、动态、精确获取路面及两侧地物的三维空间信息,在道路巡检方面具有独特的优势^[4],为路面的平整度检测提供了一种全新的、可实施的技术手段。

本文通过分析车载激光点云数据的精度以及国际平整度IRI的计算方法,提出一种利用三维激光点云计算道路路面平整度的新方法。

1 车载点云精度特点

车载激光移动测量系统是以汽车为移动载体、多传感器集成的测量系统,主要包括激光扫描仪、惯性导航系统(INS)、全球定位导航系统(GNSS)、惯性测量单元(IMU)、工业相机、全景相机、时间同步控制器等传感器^[5]。

收稿日期:2022-11-25

基金项目:福建省住房和城乡建设厅科技研究开发项目(2020-k-99)

作者简介:黄庆财(1977—),男,本科,高级工程师,从事道路施工与检测管理工作。

车载激光扫描系统利用 GNSS 和 IMU 提供的定位定姿信息,对获取的点云进行航迹解算、检校及坐标转换,进行地理定位,提供高精度的三维坐标信息,实现道路及周围地物的三维信息实时获取。

由于误差的存在,移动测量系统获取激光点云的位置与理论值存在偏差。点云精度误差主要来源于扫描仪与 GNSS、IMU 的相对方位,扫描仪的点位测量精度以及轨迹位姿三部分的测量误差。扫描仪与 GNSS、IMU 相对方位的标定是系统使用前的必要工作;扫描仪点位测量精度达到厘米级或毫米级,高精度扫描仪达 5 mm;轨迹位姿态误差与 GNSS 信号有关,信号良好时,实时定位精度优于 5 cm,定姿精度优于 0.05°,实测点位精度为厘米级;受树木遮挡和多路径效应影响,GNSS 信号往往存在失锁,定位精度和可靠性将会降低。

2 基于点云的平整度计算

世界银行在 1986 年的报告中规定以 1/4 车模型在规定速度(80 km/h)行驶时,行驶距离内动态反应悬挂系统的累积竖向位移作为 IRI 值。点云数据能够实现路面细小坑槽、石子间隙、细微突起等变化的精细化表达,能够准确获取高程变化值。因此,基于点云数据的 IRI 计算具有一定的可行性。

针对三维激光点云的数据特性,结合实际需求,本文采用如下方案进行平整度的计算,算法流程见图 1。

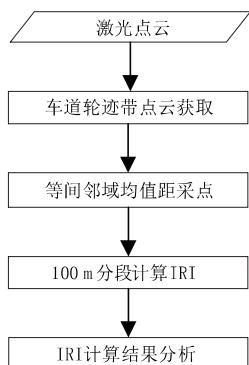


图 1 道路三维点云平整度计算流程

(1) 车道轮迹带点云获取

三维激光扫描系统获取的原始道路点云数据中除路面点之外还包含大量的点是对平整度计算无效的,如道路两侧的地物、车辆、行人等,因此需要对原始点云数据进行预处理。首先使用布料模拟算法提取路面点,统计滤波算法剔除噪点;然后沿车道轮迹带方向创建出轮迹矢量线,取两侧 3.5 m 范围内的路面点作为待计算的点云数据。经预处理之后的点云

数据已具备路面平整度计算的条件,轮迹带点云提取见图 2。



(a) 原始点云及矢量线

(b) 待计算点云数据

图 2 轮迹带点云提取

(2) 等间距邻域均值采点

路面点云的高程值能够反映路段准确坐标位置下的路面高程变化情况,但是由于偶然误差的存在,导致点云数据的高程值与真实值存在偏差。由偶然误差的特性知,偶然误差的数学期望为零。

$$E(\Delta) = 0 \text{ 或 } \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 0 \quad (1)$$

即偶然误差的理论平均值为零。

假设任一路面点高程值的真值为 $\tilde{Z}_i$, 点云数据中测得的高程值为 Z_i , 误差为 ΔZ_i , 则有:

$$\tilde{Z}_i = Z_i - \Delta Z_i \quad (2)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta Z_i \quad (3)$$

联立式(1)可得:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Z}_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (4)$$

因此,对点云数据中轮迹带上的任一路面点,用其邻域内高程的均值作为该点的高程值能够有效消除偶然误差的影响。

根据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)要求,计算 IRI 值的采样间距应小于 50 cm, 本文根据实际应用需求,在车道行驶轮迹上以 10 cm 作为高程均值的计算邻域、25 cm 作为采样间隔获取路面高程值,并对采样点进行编码附上相应的桩号。

(3) 100 m 分段计算 IRI

《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)规定以 100 m 为计算区间长度用 IRI 标准计算程序计算国际平整度指数 IRI,以 m/km 计,保留 2 位小数。

利用上述均匀采点的数据,每 100 m 进行分段,按照 IRI 值的计算方法计算路面平整度,其中包括以下 5 个步骤:

a. 计算分段数。统计用于计算 IRI 的有效点数 n , 根据采样间隔 I (本文中 $I = 0.25 \text{ m}$), 计算 100 m 分

段区间内点的个数 p , 进而计算有效分段数 N 。计算公式如下:

$$p = \frac{100}{l} \quad (5)$$

$$N = \left\lceil \frac{n}{p} \right\rceil \quad (6)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

b. 初始值的设定。1/4 车模型中弹簧体和非弹簧体在纵断面上位移量的速度及加速度为 4 个动态反应量, 分别为 $Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}$, 根据 IRI 计算标准的规定, 采用前 11 m 的路面斜率为初始值, 即

$$\begin{cases} Z_{01} = Z_{03} = (Y_a - Y_1)/11 \\ Z_{02} = Z_{04} = 0 \\ a = 11/dX + 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Y_1 为第 1 个样本点的高程值, 其他同。

c. 迭代法求解所有采样点的动态反应量即

$$\begin{cases} Z_{j1} = S_{11}Z_{(j-1)1} + S_{12}Z_{(j-1)2} + S_{13}Z_{(j-1)3} + S_{14}Z_{(j-1)4} + P_1 Y' \\ Z_{j2} = S_{21}Z_{(j-1)1} + S_{22}Z_{(j-1)2} + S_{23}Z_{(j-1)3} + S_{24}Z_{(j-1)4} + P_2 Y' \\ Z_{j3} = S_{31}Z_{(j-1)1} + S_{32}Z_{(j-1)2} + S_{33}Z_{(j-1)3} + S_{34}Z_{(j-1)4} + P_3 Y' \\ Z_{j4} = S_{41}Z_{(j-1)1} + S_{42}Z_{(j-1)2} + S_{43}Z_{(j-1)3} + S_{44}Z_{(j-1)4} + P_4 Y' \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Y' = (Y_i - Y_{j-1})/dX$, 表示斜率输出; S_{pq} 和 P_p 均为计算参数矩阵, 其系数值与 dX 的取值有关。

当 $dX = 250$ mm 时,

$$\begin{aligned} S_{ij} = & \begin{bmatrix} 0.996 & 607 & 1 & 0.019 & 151 & 4 & -0.002 & 083 & 274 & 0.000 & 319 & 014 & 5 \\ -0.556 & 304 & 4 & 0.943 & 876 & 8 & -0.832 & 471 & 8 & 0.050 & 647 & 01 & \\ 0.021 & 537 & 6 & 0.002 & 126 & 763 & 0.750 & 871 & 4 & 0.008 & 221 & 888 & \\ 3.335 & 013 & & 0.337 & 646 & 7 & -39.127 & 62 & & 0.434 & 756 & 4 & \end{bmatrix} \\ P_j = & [0.005 \ 476 \ 107 \ 1.388 \ 776 \ 0.022 \ 759 \ 68 \ 35.792 \ 62] \end{aligned} \quad (9)$$

d. 计算调整坡度。每个采样点的调整坡度值 R_{RSj} 可表示为:

$$R_{RSj} = |Z_{j3} - Z_{j1}| \quad (10)$$

e. IRI 值 I_{IRI} 可表示为

$$I_{IRI} = \frac{1}{p-1} \sum_{j=2}^p R_{RSj} \quad (11)$$

式中: p 为 100 m 计算区间内采样点总数。

(4) IRI 计算结果分析

重复步骤(4)计算该路段的 IRI 值, 与水准测量计算出的标定 IRI 值进行对比, 统计分析基于点云的 IRI 计算结果与标定 IRI 的系统偏差, 减去偏差作为最终的 IRI 计算结果。

根据公路路面等级及平整度规定, 判断检测路段的 IRI 是否符合该级别公路路面平整度要求, 对

于不合格的路面, 利用其高程值对应的桩号, 查找突变位置, 进而确定平整度缺陷位置。

3 实验分析

为了验证三维激光点云进行平整度计算方法的可行性, 选取某城市长度为 400 m 的无铺面道路作为实验场地, 利用高精度电子水准仪和车载移动测量设备进行数据采集。

电子水准仪型号为 DL-2007, 测量标准为三等水准测量, 采样间隔为 50 cm, 高程测量精度为 0.7 mm, 获取路面高程值作为基准参考值。对测量的水准数据进行插值, 获取每 25 cm 一个采样点的有效计算数据, 采用 25 cm 采样间隔的 IRI 计算公式进行计算, 最终得到国际平整度指标的参考基准值, 单位为 m/km。

车载移动测量系统所搭载的激光扫描仪型号为 Z+F FROFILER 9012, 测距精度为 0.1 mm; 惯性导航系统的型号为 SPAN-ISA-100C, 在后处理测量模式下的垂直位置精度为 2 cm+1 ppm。分别在架设 CORS 基站和不架设 CORS 基站的情况下进行 3 次数据采集, 用于分析验证点云数据精度对平整度计算的影响。为方便描述, 架设基站的情况下采集的数据记为: 基站 1、基站 2、基站 3, 不架设基站采集的数据记为: Cors1、Cors2、Cors3; 其中 Cors1 的数据是在路面存在积水的情况下获取的, 受激光折射的影响, 数据质量较差。试验场地点云数据见图 3。

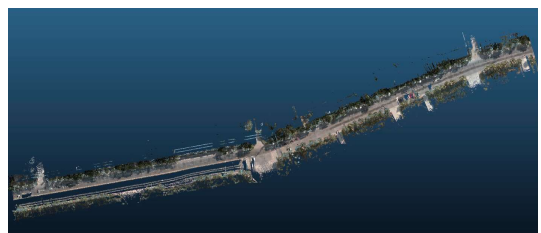


图 3 实验场地点云数据

采用第 3 节描述的方法对车载点云进行 IRI 的计算, 路面车载点云高程分布见图 4, 路面车载点 IRI 计算结果见图 5。

从图 5 可以看出, 基站 1、基站 2 和基站 3 计算出的国际平整度指数 IRI 分布趋势完全相同, 不同数据计算出的 IRI 最大偏差为 0.09; Cors2 和 Cors3 计算出的 IRI 分布趋势也完全一致, IRI 的最大偏差为 0.05, Cors1 由于数据质量较差, 与其他 5 次数据采集的计算结果偏差较大, 但整体趋势仍然趋近一致。该路段国际平整度指数 IRI 分布在 2.62~8.07 之间, 与水准数据计算出的 IRI 结果基本一致。表 1

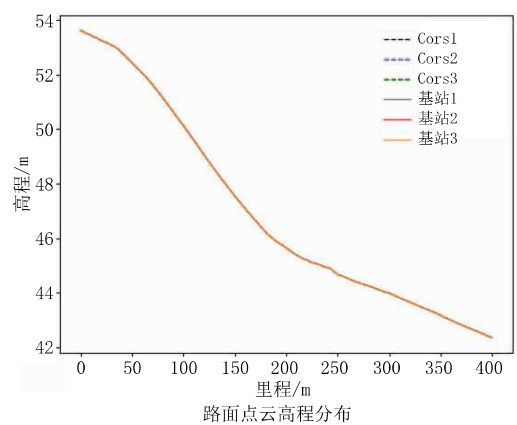


图 4 路面车载点云高程分布

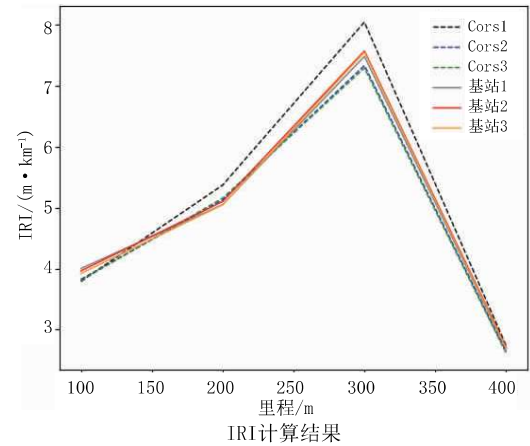


图 5 路面车载点 IRI 计算结果

为世界银行对于国际平整度指数 IRI 的标准规范,参照表 1 可以得知,该段公路属于经常养护的无铺面道路,该路段路面工程质量较好,无需进行养护处理。

4 结 语

本文以某道路高精度电子水准仪数据计算的国

表 1 世界银行对于国际平整度 IRI 的标准规范

IRI/(m·km ⁻¹)	路面状况
0.25 ~ 1.75	机场跑道、高速公路
1.25 ~ 3.50	新路面
2.25 ~ 5.75	老旧路面
3.25 ~ 10.00	经常养护的无铺面道路
4.00 ~ 12.00	已有损坏的道路
大于 7.75	不平整的无铺面的道路

际平整度指数 IRI 值作为参考基准,通过分析车载移动测量系统的数据精度特点,并依据该系统在不同状态下所采集的激光点云数据完成路面平整度的计算;结果表明基于车载点云的 IRI 计算与水准标定结果基本一致,为路面平整度检测提供了一种快速、有效的方法。但是本文方法仍然存在不足,例如在点云预处理和路面高程获取方面未充分考虑细小坑槽、凸起等异常值对计算结果的影响,今后的研究中将对其进行完善。

参考文献:

[1] 交通运输部.2020 年我国交通运输行业发展统计公报发布[J].隧道建设(中英文),2021,41(6):963.
[2] 何华阳,苏文英,王蕊.路面平整度对标线逆反射测试的静态影响[J/OL].中国公路学报:1-18[2021-11-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20210623.1426.008.html>.
[3] 侯青.沥青路面激光三维构造深度检测技术研究[D].西安:长安大学,2013.
[4] 王飞,刘如飞,任红伟,等.利用道路目标特征的多期车载激光点云配准[J].测绘科学技术学报,2020,37(5):496-502.
[5] 李晓丽,刘如飞,汤玉兵,等.高精度矢量数据的路面三维自动建模方法[J].测绘通报,2021(7):70-73.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com