

赵新,李杰,岳丹丹,等.三维激光雷达果园路面不平度采集试验与分析[J].华中农业大学学报,2022,41(2):227-236.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.027

## 三维激光雷达果园路面不平度采集试验与分析

赵新<sup>1,2</sup>,李杰<sup>1</sup>,岳丹丹<sup>1</sup>,韩重阳<sup>1</sup>,唐婷<sup>1</sup>,吴伟斌<sup>1,2</sup>

1. 华南农业大学工程学院,广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点研究室/国家柑橘产业体系机械化研究室/广东省山地果园机械创新工程技术研究中心,广州 510642

**摘要** 以果园典型路面不平度的采集为研究对象,建立基于激光雷达点云处理的路面不平度采集方法,搭建了基于三维激光雷达的路面不平度采集系统平台,结合点云处理技术完成路面高程信息的提取;采用AR(auto regressive,自回归)模型依据比例分析法对路面功率谱密度进行计算,确定不平度等级,并通过加速度振动记录仪进行系统验证,利用系统开展典型果园路面不平度数据信息采集试验。试验结果显示,果园路面不平度结果为水泥路面主要集中在B级,B级占比82.33%;砂石路面主要集中在C级,C级占比84.00%;泥土路面主要集中在D、E等级,D级路面占比48.67%,E级占比31.00%,表明基于三维激光雷达采集系统与数据处理方法在果园路面不平度采集和评价上是可行的。最终不平度评价结果显示,三维激光雷达果园路面不平度采集系统应用可靠,评价结果准确,适合于山地林、果、茶园路面不平度的采集。

**关键词** 果园路面;路面不平度;三维激光雷达;点云处理;功率谱密度;精准农业

**中图分类号** S237 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0227-10

路面不平度作为车辆行驶时振动的主要激励来源,对车辆行驶平顺性、乘坐舒适性、操纵稳定性、零部件疲劳寿命、运输效率、油耗等均有影响,对路面结构本身也有较大的影响<sup>[1]</sup>。农用机械在果园非结构化路面上工作时,受到的冲击载荷会大于在普通路面上受到的冲击。因此,对于农用机械而言,果园路面不平度的研究对农用机械的设计有重要意义。采集真实果园路面不平度信息,可以提高农业机械农田地面功率谱室内模拟试验准确度<sup>[2-3]</sup>,但是传统的路面不平度采集装置存在使用范围局限性的问题,不能满足果园道路路面不平度的测量。随着激光雷达和三维点云处理技术的应用<sup>[4-5]</sup>,为路面不平度的测量提供了新思路<sup>[6]</sup>。

结构化路面的不平度测量装置目前相对成熟,但3 m直尺、水平仪-标杆、多轮仪等直接测量路面不平度的装置由于效率低而逐渐被淘汰<sup>[7-9]</sup>。BPR拖车式颠簸累积仪以及车载式路面平整度测试仪<sup>[10-11]</sup>由于应用场景的限制,不适用于路面状况较差的非结构化路面不平度测量。三维激光雷达及点云处理

技术应用日益广泛,国内外研究者对激光雷达技术的运用做了大量的研究工作。如李永强等<sup>[12]</sup>利用激光雷达点云的处理方法对道路旁路灯的数据采集提取进行了研究;武鹏<sup>[13]</sup>依据三维激光雷达点云平面特征,完成了点云的配准。还有应用在路面高程信息的研究报道,如邬佳琪<sup>[14]</sup>采用激光雷达与相机两种传感器对路面数据进行了采集,研究了全地面起重机械路面高程信息;梁冠群等<sup>[15]</sup>提出利用长短期记忆网络和时序轮心加速度的方法进行实时路面不平度等级辨识。Liu等<sup>[16]</sup>提出利用指定功率谱密度和相干函数的左右轮路径的路面不平度的构造方法。Yu等<sup>[17]</sup>提出一种有效的纹理映射方法来重构路面模型,利用激光扫描仪获取被测物体的数据从而得到路面的细节信息,通过对重构后的路面研究得到路面不平度;Kumar等<sup>[18]</sup>采用固定激光扫描仪对道路进行扫描以获取路表信息,采用point cloud library对采集的点云进行运算处理,构建了路面不平度。

随着精准农业布局的展开,路面不平度对智能

收稿日期:2021-11-03

基金项目:广东省科技计划重点研发项目(2019B020223001);广东省农业科研项目和农业技术推广项目(2020-440000-02100200-8418; 2020-440000-02160100-8583)

赵新,E-mail:xinxin@scau.edu.cn

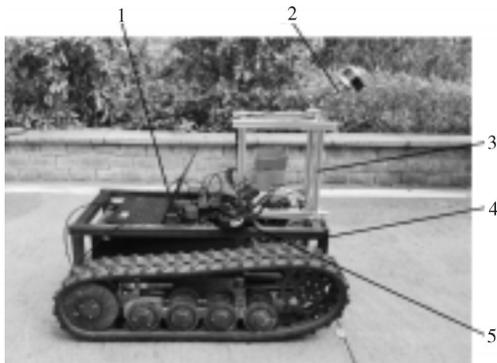
通信作者:吴伟斌,E-mail:wuweibin@scau.edu.cn

农业装备的精准作业<sup>[19]</sup>、无人农场的平稳构建有着重要影响,基于激光雷达的点云数据采集的方式精度比传统方法更高,但是在农业机械的研发过程中较少的研究者采取激光雷达的方式对山地果园的路面不平度进行研究。本研究采用三维激光雷达测量与点云处理算法相结合的方法进行路面不平度采集,旨在为山地林果茶园农用机械的优化设计提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 系统组成

路面不平度采集系统主要由履带运输车、三维激光雷达、计算机、移动电源和安装架组成(图1)。三维激光雷达由安装架固定在履带运输车上,三维激光雷达可以调节相应角度进行采集点云数据,采集到的点云数据保存至计算机中的VeloView软件。对比不同测量原理、不同维数、不同工作介质的激光雷达,选择了精度测量更高、适合于三维空间测量的VLP-16型激光雷达。



1. 计算机 Computer; 2. 三维激光雷达 3D lidar; 3. 激光雷达安装架 Lidar mounting frame; 4. 履带运输车 Crawler transporter; 5. 雷达用移动电源 Power bank for radar.

图1 不平度采集系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of unevenness acquisition system

### 1.2 路面选择

测试路面需满足以下要求:①覆盖果园中常见的农机行驶路面,如水泥路面、泥土路面、植被覆盖路面以及砂石路面;②路面尽量不出现积水,路况良好。依据农用车辆经常行走的果园路面,选择果园路面中常见的水泥路面、泥土路面以及砂石路面进行试验(图2)。在实地考察后,分别在广东省现代农业装备研究所黄埔基地以及华南农业大学树木园选择了满足本次试验要求的路面。

开始测试前首先安装激光雷达,如图2B所示,使激光雷达与地面成45°。然后打开上位机,选择通讯接口配置菜单,正确设置各参数,观察激光雷达是否正常,记录数据。一切正常之后,遥控启动履带运输车,在不同路面运行采集数据,再停止运输车,利用VeloView软件记录保存数据,即单次测量结束。路面分别选择20 m的水泥、泥土和砂石路段,重复10次对该20 m路段进行测试。计算平均速度,保留3组最接近2 km/h的结果。



A: 水泥路面 Cement pavement; B: 泥土路面 Soil road; C: 砂石路面 Sand and gravel road.

图2 3种果园模拟路况

Fig.2 Three kinds of orchards to simulate road conditions

### 1.3 坐标标定与转换

坐标系的建立主要分为激光雷达坐标系 $C_L$ 、车辆坐标系 $C_V$ 和地面坐标系 $C_G$ 的建立。由于 $C_L$ 与 $C_V$ 均为空间直角坐标系,而且激光雷达与车身是固连的,其位置关系并不会随着车辆的行驶而产生变化。标定时,标定物采用一种带有直杆的纸板,选用直杆与纸板的交点作为被测量点。首先测量得出车体坐标系下标定点的测量值。然后通过三维激光雷达测得标定点在三维激光雷达坐标系下的坐标值,再根据转换公式计算得出标定点在车体坐标系下的计算值。激光雷达坐标 $C_L$ 与车辆坐标 $C_V$ 转换关系如公式1所示。

$$\begin{bmatrix} X_{C_V} \\ Y_{C_V} \\ Z_{C_V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{xy2 \times 4} \\ T_{z1 \times 4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{C_L} \\ Y_{C_L} \\ Z_{C_L} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用Matlab求解超定方程组,求得结果:

$$T_{xy2 \times 4} = \begin{bmatrix} 1.7113 & 0.3519 & 0.0017 & 0.0792 \\ 0.0071 & 1.3215 & -0.2177 & -1.0174 \end{bmatrix}$$

$$T_{z1 \times 4} = [0.0052 \quad -0.0035 \quad 0.8601 \quad 2.2710]$$

车体坐标系下标定点的测量值与计算值以及误差如表1所示。通过表1可以看出,最大误差小于0.03 m,这样的标定误差在激光雷达系统误差0.03 m内,即可认定标定结果产生的误差不影响路面不平度装置的测量。

表 1 标定误差  
Table 1 Calibration error m

位置 Position	车体坐标系测量值 Measured value of car body coordi- nate system	车体坐标系计算值 Calculated value of car body coordi- nate system	误差 Error
点 1 Point 1	(1.684 7, 0.987 3, 2.362 8)	(1.669 7, 0.967 3, 2.349 8)	(0.015, 0.020, 0.013)
点 2 Point 2	(-0.402 8, 0.863 6, 2.350 9)	(-0.429 8, 0.848 6, 2.350 6)	(0.027, 0.015, 0.003)
点 3 Point 3	(1.640 5, 1.770 9, 2.368 4)	(1.629 5, 1.747 9, 2.344 4)	(0.011, 0.023, 0.024)
点 4 Point 4	(-0.329 1, 1.680 2, 2.354 4)	(-0.358 1, 1.675 2, 2.327 4)	(0.029, 0.005, 0.027)
点 5 Point 5	(1.895 8, 3.043 0, 2.536 7)	(1.886 8, 3.040 0, 2.517 7)	(0.009, 0.003, 0.019)
点 6 Point 6	(-0.241 0, 3.228 9, 2.472 8)	(-0.269 0, 3.212 9, 2.459 8)	(0.028, 0.016, 0.013)

## 2 结果与分析

### 2.1 点云数据去噪

采用 VLP-16 激光雷达进行数据采集时, 雷达每秒可获得数十万原始点云数据。但是得到的原始点云数据会含有噪声和异常数据, 需要从原始点云数据中将噪声和异常数据剔除, 只保留关键特征。

果园路面不平度采集装置在有植被覆盖的路面进行数据采集时, 为获取路面高程信息, 需先将路面覆盖的植被(非地面点)剔除。为去除这部分多余的植被噪声点, 选用 CloudCompare 中的布模拟滤波(cloth simulation filter, CSF)对每帧采集的点云上植被数据进行滤波(图 3), 首先对激光雷达点云进行反向处理, 然后设置合适的布的柔软程度和网格分辨率生成布网。通过分析布节点与相应激光雷达点之间的相互作用, 可以确定布节点的位置, 从而生成地面的近似。最后, 通过对比原始激光雷达点和生成的表面, 从激光雷达点云中提取出地面点, 迭代完成所有的布粒子, 如果雷达点云与布模拟粒子的距离小于阈值, 则判断为地面点, 否则即是非地面点。经布模拟滤波处理后地表覆盖的植被即被去除, 处理后地面点云图如图 4C 所示, 被去除的植被等非地面点则如图 4D 所示。

果园路面中部分被杂草树木覆盖的路面经过布模拟滤波处理得到了无植被覆盖的点云数据。当路面不平度采集装置在采集无植被覆盖的路面点云信息时, 激光雷达同样采集了大量离群地面点云信息, 为了对此部分无植被覆盖的果园路面进行精简化处

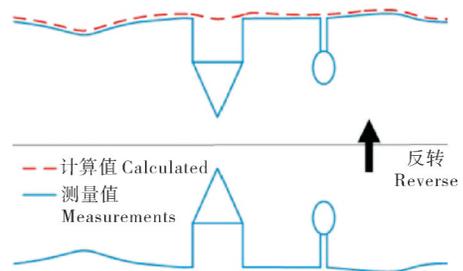
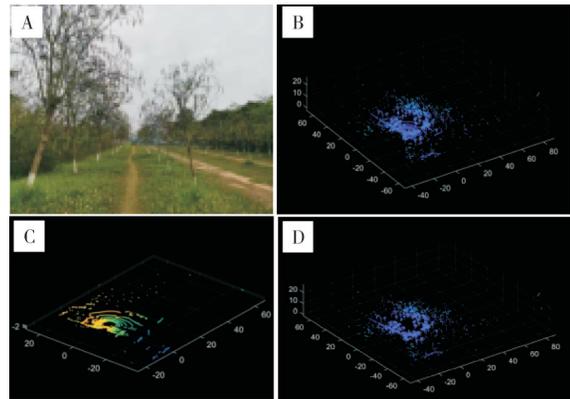


图 3 布模拟滤波算法示意图  
Fig.3 Schematic diagram of the cloth simulation algorithm



A: 实物图 Physical picture; B: 点云数据 Point cloud data; C: 路面点 Pavement point; D: 非地面点 Non-ground point.

图 4 植被覆盖路面布模拟滤波结果

Fig.4 Simulation filtering result map of vegetation covered pavement

理, 以及对布模拟滤波处理后的数据进行离群点去除, 选用统计滤波对每帧点云进行滤波处理。

结合 CloudCompare 中的统计分析滤波器(statistical outlier removal filter), 依据点到邻近点的距离分布对点云进行滤波处理。计算每个点与所有邻近点的平均距离, 通过分析, 该结果满足高斯分布, 其均值和标准差决定高斯分布的形状, 若计算的平均距离在给定标准范围之外, 该点即为离群点, 计算公式为:

$$P^0 = \{p_q \in P | (\mu_k - \alpha \cdot \sigma_k) \leq \bar{d}^* \leq (\mu_k + \alpha \cdot \sigma_k)\} \quad (2)$$

式(2)中,  $\mu_k$  代表距离平均值,  $\sigma_k$  为标准差,  $\alpha$  为常数, 取为 1,  $\bar{d}^*$  为每个点跟它邻近点的平均距离。植被覆盖路面经布模拟滤波处理后继续采用统计分析滤波处理可得图 4D 数据图。相较于图 4C, 此时数据得到了进一步精简, 去除了一部分点云密度低的离群值。植被覆盖的路面经布模拟滤波与统计分析滤波处理后得到图 5, 此时的点云数为 10 415 个, 相比较图 4C, 部分离散的点云数据被滤除。

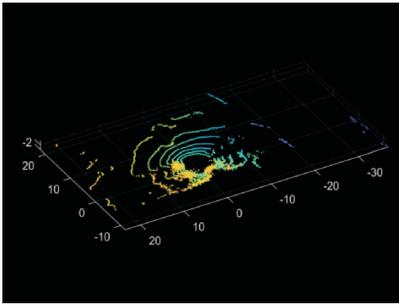


图5 布模拟滤波结合统计分析滤波处理结果

Fig.5 Distributed simulation filtering combined with statistical analysis of filtering processing results

## 2.2 点云数据配准

通过激光雷达获取大量的点云数据,对点云数据进行配准处理,使之拼接为三维激光雷达点云数据是获取路面高程信息的前提。利用激光雷达扫描过程中多帧点云数据重叠的信息进行特征融合,从而提高激光雷达的数据量,进而提高最终的识别效果。

三维点云配准最常用的匹配算法为ICP算法,该算法主要是不断进行迭代优化矩阵,在迭代过程中,对于目标集中点,ICP算法会将其最邻近参考点的集合计算出来,同时计算对应点相应的平移矩阵与旋转矩阵,以此获得1个新的目标点集,开始下次迭代,最终获得1个较为精准的变换矩阵,从而实现两点集的精确配准。ICP算法主要步骤:①计算距离最近点云集:在 $P$ 中取任意点集 $P_i$ ,满足 $P_i \in P$ ,找到 $Q$ 中对应点云集 $Q_i^k$ ,满足 $Q_i^k \in Q$ ,使得 $\|Q_i^k - P_i^k\| = \min$ ;②计算 $P$ 与 $Q_k$ 之间的变换矩阵:计算旋转矩阵 $R^k$ 和平移矩阵 $T^k$ ,得 $\sum_{i=1}^N \|R^k P_i^k + T^k - Q_i^k\| = \min$ ;③计算 $P^{k+1} = \{P_i^{k+1} | P_i^{k+1} = R^k P_i^k + T^k, P_i^k \in P\}$ ;④计算 $d^{k+1} = \sum_{i=1}^N \|P_i^{k+1} - Q_i^k\|^2$ ;⑤如果 $d^{k+1}$ 不小于 $\tau$ 的给定值或大于预设得最大迭代次数,则停止迭代,否则返回第一步,直到收敛。

采用ICP算法对所采集的激光雷达点云数据进行运算处理。图6为采用ICP算法配准后的点云图,点云数据为23 170,理论迭代率为100%,变换矩阵为:

$$(R, t) = \begin{bmatrix} 1.000 & -0.002 & 0.000 & -0.015 \\ 0.002 & 1.000 & 0.000 & 0.068 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.001 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$$

通过CloudCompare中ICP模块对2帧点云进行配准,配准后的路面点云信息量得到了倍增,提高了

信息密度,有利于下一步进行路面高程信息提取和计算路面功率谱密度。

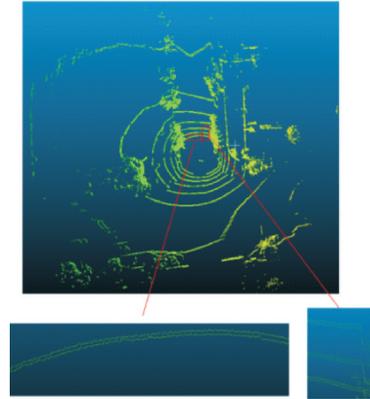


图6 ICP配准后的点云

Fig.6 Point cloud after ICP registration

## 2.3 点云数据分割

搭载激光雷达的路面不平度采集装置工作时,雷达测量到的点云数据包含360°范围内的点云信息。针对路面点云进行了研究,图7为多帧点云数据经过滤波与配准得到的道路配准示意图。采用CloudCompare中分割模块对试验路面进行分割,即可分割出满足要求的点云数据组。在得到的多帧路面配准点云图中,保留车辆行驶前方宽度为4 m、长20 m的矩形范围内的部分点云用于路面高程研究。此时分割算法的设计,考察每个激光测量点的坐标值,当其坐标值在公式(3)所示的范围外时,将其滤除。留下的区域即为后续路面识别的区域,后续的路面高程信息的提取以及路面不平度的计算均在此区域内进行。

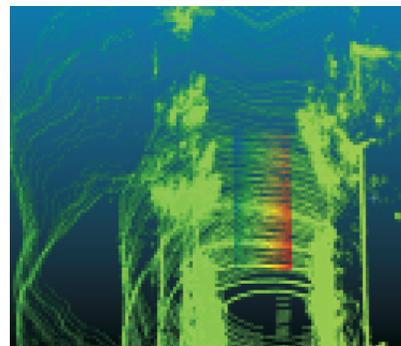


图7 多帧点云配准图

Fig.7 Multi-frame point cloud registration map

$$\begin{cases} -2 < X < 2 \\ 0 < Y < 20 \end{cases} \quad (3)$$

经过了直通滤波分割后的点云如图8所示。用一种较为理想的直通滤波的方法,直接留下车辆最有可能驶过4 m×20 m的路面,进行后续的路面高程信息提取。

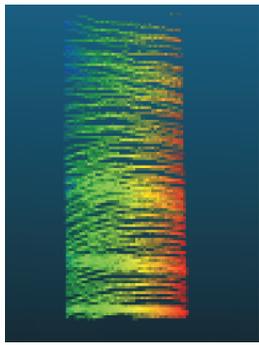


图8 点云分割后路面

Fig.8 Pavement after point cloud segmentation

### 2.4 基于点云数据的路面高程提取

通过点云去噪、点云配准与点云分割提取了  $4\text{ m} \times 20\text{ m}$  的车辆可能行驶路面如图9所示。采用数字高程模型(DEM)对路面功率谱进一步进行计算,该模型按照一定的结构,采用数字形式来表示地面高程。克里金(Kriging)算法能够较好反映出各地形的变化,故为保证路面识别的准确性,采用克里金模型提取路面的高程序列。

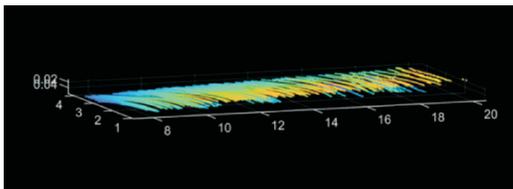


图9  $4\text{ m} \times 20\text{ m}$  路面分割图

Fig.9  $4\text{ m} \times 20\text{ m}$  road segmentation map

对路面不平度进行计算,从而提高对路面不平度判断的准确度。如图10所示,履带车辆前进时,提取左轮前进方向与地面点云相交序列  $q(l)$ 、右轮前进方向与地面点云相交序列  $q(r)$  以及车辆左右对称中心线处与地面点云相交序列  $q(z)$ ,得到的水泥路面二维高程序列如图11所示。

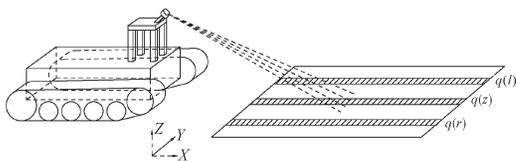
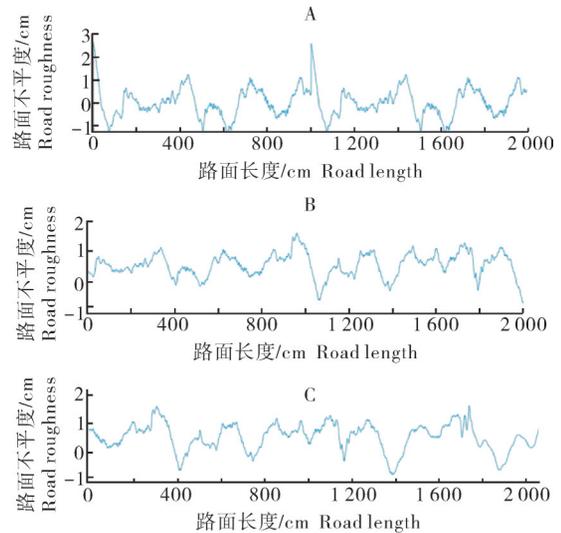


图10 点云数据提取示意图

Fig.10 Schematic diagram of point cloud data extraction

### 2.5 路面不平度计算

路面不平度是典型的平稳随机过程,可通过建立AR模型来表征其统计特性。其中AR模型中AR(P)功率谱密度估计方法如式(4)所示。



A:  $q(l)$ 方向  $q(l)$  direction; B:  $q(r)$ 方向  $q(r)$  direction; C:  $q(z)$ 方向  $q(z)$  direction.

图11 二维路面高程序列

Fig.11 Two-dimensional road height program sequence

$$P_q = \frac{\sigma_a^2}{\left| 1 - \sum_{k=1}^p \phi_k e^{-jk\omega} \right|^2} \quad (4)$$

根据自相关函数性质,可得AR模型中AR(P)的Yule-Walker方程:

$$\begin{bmatrix} R_q(0) & R_q(1) & R_q(2) & \cdots & R_q(p) \\ R_q(1) & R_q(0) & R_q(1) & \cdots & R_q(p-1) \\ R_q(2) & R_q(1) & R_q(0) & \cdots & R_q(p-2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_q(p) & R_q(p-1) & R_q(p-2) & \cdots & R_q(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \varphi_1 \\ \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过求解Yule-Walker方程可得AR模型中AR(P)的参数  $\phi_k$  和  $\sigma_a^2$ ,从而求解路面不平度  $q(n)$  序列的功率谱密度估计。采用Matlab中的基于AR模型的功率谱密度估计函数Pyulear求解试验路面的功率谱,果园水泥路面3条纵向序列数据的路面不平度功率谱密度曲线如图12所示。

由图12可看出,水泥路面在高频区出现了丰富的频率分量,这是由于采用定带宽分析来计算功率谱密度,突出了所谓真实功率谱分布或由噪声引起的功率谱密度的起伏变化。根据国家标准GB/T 7031—2005的要求,为了得到可观测和可分类的数据,应将谱值分解到各倍频程中进行平滑处理。以水泥路面为例,在Matlab中将原始功率谱密度分解到各倍频程中进行平滑处理,处理后的平滑功率谱密度和空间频率在对数坐标下的关系如图13A所示。根据上述方法对泥土路面(图13B)以及砂石路面(图13C)高程信号进行处理得到位移功率谱

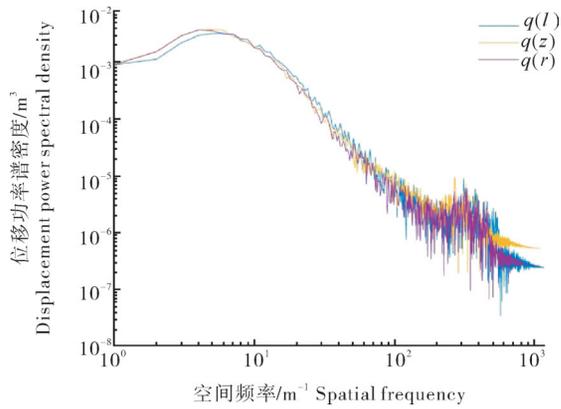
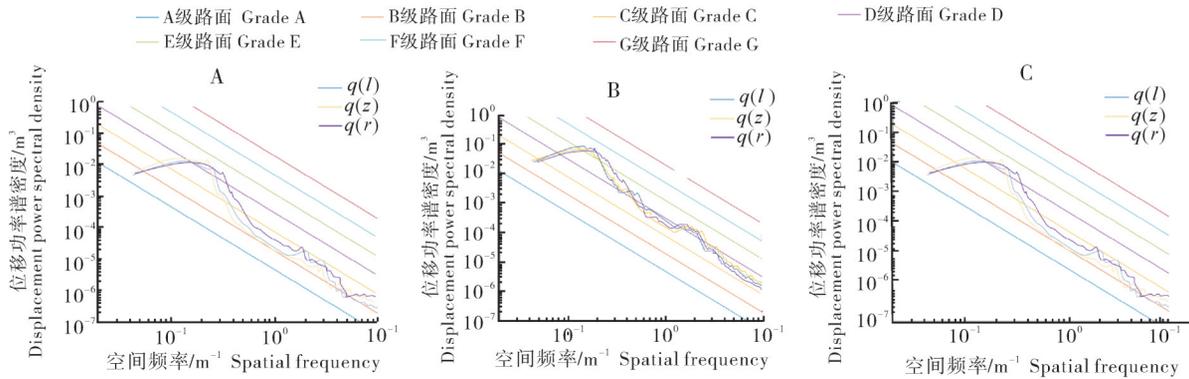


图12 水泥路面功率谱密度

Fig.12 Power spectral density of cement pavement

密度。

根据比例分析法对果园水泥路面、泥土路面以及砂石路面试验结果进行评价,计算  $q(l)$ 、 $q(r)$ 、 $q(z)$  3个方向路面不平度各自占比的平均值(表2)。



A:水泥路面 Cement pavement; B:泥土路面 Soil road; C:砂石路面 Sand and gravel road.

图13 平滑后位移功率谱密度图

Fig.13 Smoothed power spectral density map

表2 不同路面不平度计算值

Table 2 Calculated value of different road roughness

等级 Grade	水泥路面 Cement pavement				泥土路面 Soil road				砂石路面 Sand and gravel road			
	$q(l)$	$q(r)$	$q(z)$	平均值 Average	$q(l)$	$q(r)$	$q(z)$	平均值 Average	$q(l)$	$q(r)$	$q(z)$	平均值 Average
A级 Grade A	3	2	3	2.67	0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
B级 Grade B	75	84	88	82.33	0	0	0	0.00	6	3	4	4.33
C级 Grade C	22	14	9	15.00	4	6	3	4.33	83	87	82	84.00
D级 Grade D	0	0	0	0.00	42	47	57	48.67	8	7	11	8.67
E级 Grade E	0	0	0	0.00	35	32	26	31.00	3	3	3	3.00
F级 Grade F	0	0	0	0.00	19	15	14	16.00	0	0	0	0.00

由平滑后的功率谱密度值(图13)可知,同一路况下不同方向路面不平度曲线走势大致相似。由表2可知,水泥路面主要集中在B级,B级占比82.33%;泥土路面主要集中在D、E两个等级,D级路面占比48.67%,E级占比31.00%;砂石路面主要集中在C级,C级占比84.00%。

### 2.6 路面功率谱密度测试与验证

履带车辆行驶道路路面谱测试原理是将加速度传感器放置于履带车辆的负重轮处,测量相应轮轴的振动加速度信号,采用傅里叶变换以及积分运算得路面功率谱密度,其原理流程如图14所示。

本研究采用Dytran4400B3加速度振动记录仪对路面针对车辆的振动进行采集,其横向灵敏度为5%,加速度振动记录仪安装图如图15所示,框线标识处为传感器。将Dytran4400B3加速度振动记录仪依靠4个磁体吸附安装在负重轮轴支撑梁上。

为了验证激光雷达果园路面不平度采集装置的

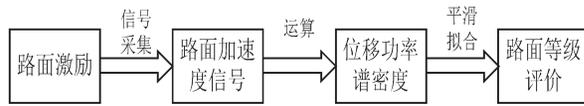


图14 测试原理流程图

Fig.14 Test principle flow chart

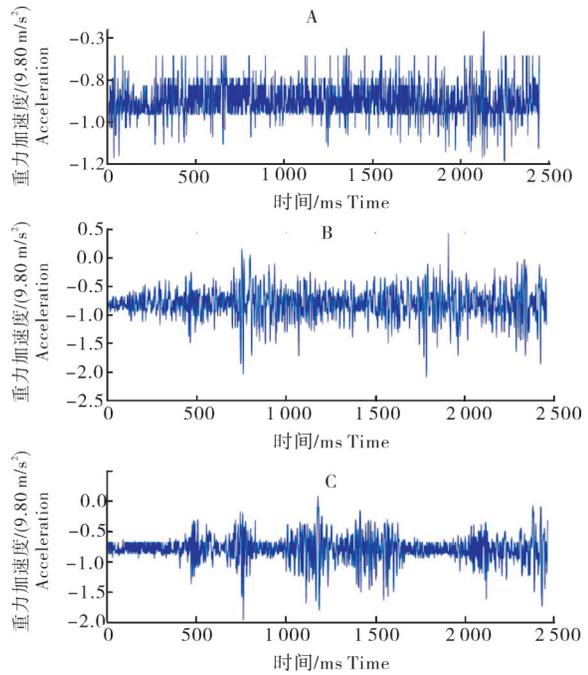


图15 加速度传感器安装位置

Fig.15 Acceleration sensor installation location

可行性,选用加速度振动仪采集相同试验路面不平度信息进行对比验证。各路面加速度测量结果以时间为横坐标进行绘图,即得到加速度时域曲线,可以直观的比较振幅大小,而疏密程度也从一定程度上反映了频率高低(图16)。试验对加速度传感器采集的振动数据进行功率谱密度计算,采用DytranVibrocoder以及Matlab对采集的数据进行分析处理,可得3个路面功率谱密度,确定路面不平度等级。依据AR模型参数估计法,应用Matlab软件对插值后的幅值谱序列进行处理并以对数坐标进行绘图,参考国标GB/T7031—2005中给出的不同倍频程带宽的平滑处理方法对功率谱密度进行平滑处理,得到处理后的平滑曲线(图17)。按照路面等级比例分析法,对路面等级进行评价,可得3种路面等级(表3)。

比较激光雷达与加速度振动法测试的路面不平度等级,结果显示,激光雷达的检测结果为水泥路面主要集中在B级,B级路面占比82.33%;泥土路面主要集中在D、E两个等级,D级路面占比48.67%,E级占比31.00%;砂石路面主要集中在C级,C级占比



A: 水泥路 Cement pavement; B: 泥土路面 Soil road; C: 砂石路 Sand and gravel road.

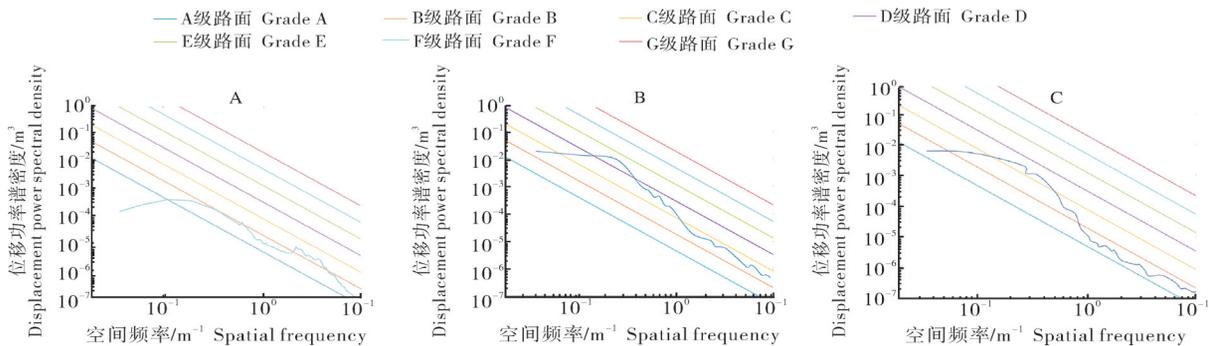
图16 加速度测量结果

Fig.16 Acceleration measurement result

表3 不同路面不平度等级占比

Table 3 Proportion of different road

等级 Grade	roughness levels			%
	水泥路面 Cement pavement	泥土路面 Soil road	砂石路面 Sand and gravel road	
A级 Grade A	7.00	0.00	0.00	
B级 Grade B	70.00	0.00	0.00	
C级 Grade C	23.00	0.00	79.00	
D级 Grade D	0.00	51.00	13.00	
E级 Grade E	0.00	35.00	8.00	
F级 Grade F	0.00	14.00	0.00	



A: 水泥路面 Cement pavement; B: 泥土路面 Soil road; C: 砂石路面 Sand and gravel road.

图17 平滑后路面功率谱密度图

Fig.17 Smoothed road power spectrum density map

84.00%。加速度振动法的检测结果为水泥路面主要集中在B级,B级占比70.00%;泥土路面主要集中在D、E两个等级,D级路面占比51.00%,E级路面占比35.00%;砂石路面主要集中在C级,C级路面占比79.00%。结果表明,2种方法对同一试验路面的测试的路面不平度等级一致。

2种方法的测量结果对比如图18所示,水泥路面位于B级,两者误差为15%,水泥砂石路面集中在C级,两者误差为6%,泥土路面集中在D、E级,D级两者误差为5%,E级两者误差为13%,由此可见,2种方法的误差控制在15%以内。其误差来源大致如下:①在多次试验的过程中,虽然尽量保持的相同路面,但是在车辆行驶过程中难以保证路面的完全一致。②基于3D激光雷达和加速度振动传感器的试验精度的差别也会导致出现一定的误差。虽然两者存在一定误差,但是误差较小且路面评级一致可以验证基于激光雷达的对果园路面不平度采集具有可行性。因此,基于激光雷达的果园路面不平度采集系统可以用于果园路面不平度的采集。

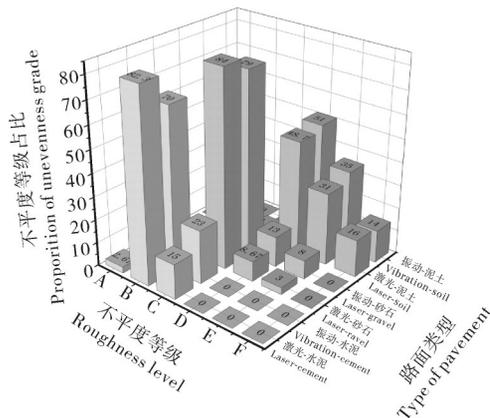


图18 2种方法路面不平度分级对比图

Fig.18 Comparison chart of road roughness classification between two methods

### 3 讨论

本研究针对果园典型路面,采取基于三维激光雷达结合点云处理技术,搭建了基于三维激光雷达果园路面不平度信息采集系统平台。通过提取果园路面的高程信息,计算果园路面的功率谱密度,采用比例分析法确定了路面不平度等级评定,通过加速度振动记录仪开展了采集系统验证试验,试验结果显示所测水泥路面中A级路面占比2.67%,B级路面

占比82.33%,C级路面占比15.00%;泥土路面中C级路面占比4.33%,D级路面占比48.67%,E级路面占比31.00%,F级路面占比16.00%;砂石路面中B级路面占比4.33%,C级路面占比84.00%,D级路面占比8.67%,E级路面占比3.00%。试验结果表明,基于激光雷达果园路面不平度的采集系统的测试结果与加速度振动记录仪测试结果一致。同时,本研究采用单个VLP-16激光雷达采集路面点云信息,对采集到的点云信息只能一帧一帧手动进行迭代完成点云构图,当数据量过大时,会导致三维点云配准失真,测量误差增大的情形。今后可以采用多传感器融合技术来进行测量,以提高路面不平度信息采集的精度。

### 参考文献 References

- [1] 段虎明,石峰,谢飞,等.道路谱测量检测技术研究综述[J].电子测量与仪器学报,2010,24(1):72-79.DUAN H M, SHI F, XIE F, et al. Summary of research on road spectrum measurement [J]. Journal of electronic measurements and instruments, 2010, 24(1): 72-79(in Chinese with English abstract).
- [2] 徐竹凤,薛新宇,崔龙飞.农田地面不平度测量与分析[J].农机化研究,2017,39(1):171-176.XU Z F, XUE X Y, CUI L F. Measurement and analysis of farmland surface roughness [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2017, 39(1): 171-176(in Chinese with English abstract).
- [3] 唐灿,宗望远,黄小毛,等.农用无人机多机多田块作业路径规划算法[J].华中农业大学学报,2021,40(5):187-194. TANG C, ZONG W Y, HUANG X M, et al. Path planning algorithm for cooperative operation of multiple agricultural UAVs in multiple fields [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 187-194(in Chinese with English abstract).
- [4] 孙庆科,何云涛,陈瑞强,等.基于结构光的三维点云重建方法研究[J].计算机应用研究,2016,33(9):2873-2877.SUN Q K, HE Y T, CHEN R Q, et al. Research of three-dimensional point cloud reconstruction based on structured light [J]. Application research of computers, 2016, 33(9): 2873-2877(in Chinese with English abstract).
- [5] 李晶,车英,宋暖,等.三维激光雷达共光路液体透镜变焦光学系统设计[J].红外与激光工程,2019,48(4):184-192.LI J, CHE Y, SONG N, et al. Design of common path zoom optical system with liquid lens for 3D laser radar [J]. Infrared and laser engineering, 2019, 48(4): 184-192(in Chinese with English abstract).

- [6] 牛润新,夏静霆,汪小华,等.智能车辆路径巡航和自主避障的触须算法[J].交通运输工程学报,2010,10(6):53-58.NIU R X, XIA J T, WANG X H, et al. Tentacle algorithm of obstacle avoidance and autonomous driving for intelligent vehicle [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2010, 10 (6):53-58(in Chinese with English abstract).
- [7] 王建锋,李平,韩毅.基于多传感器综合的路面不平度测量[J].武汉大学学报(工学版),2012,45(3):361-365.WANG J F, LI P, HAN Y. Road roughness measurement based on multi-sensor data comprehension [J]. Engineering journal of Wuhan University, 2012, 45(3):361-365(in Chinese with English abstract).
- [8] 王望良,刘汉光,孟东阁,等.车辆道路模拟试验道路谱获取方法研究[J].工程机械,2013,44(8):18-24,42.WANG W L, LIU H G, MENG D G, et al. Research of method to acquire spectrums for vehicle simulation tests roadway on roads [J]. Construction machinery and equipment, 2013, 44(8):18-24, 42 (in Chinese with English abstract).
- [9] 滕瑞品,宋晓琳.改进过滤泊松路面模型激励下汽车疲劳载荷的研究[J].机械科学与技术,2018,37(10):1573-1580. TENG R P, SONG X L. Research on fatigue load of automobile under excitation of improved filtered Poisson road model [J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2018, 37 (10) : 1573-1580 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张明,叶巧玲,冯晓.路面平整度检测技术现状与发展[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007,26(4):112-114,127. ZHANG M, YE Q L, FENG X. Actuality and development of the detection technology for road surface roughness [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science edition), 2007, 26(4):112-114, 127(in Chinese with English abstract).
- [11] 李鹏飞,刘中华,刘如飞.车载移动测量系统在路面平整度评价中的应用[J].北京测绘,2019,33(1):67-70. LI P F, LIU Z H, LIU R F. Application of vehicle mounted mobile measurement system in pavement evenness evaluation [J]. Beijing surveying and mapping, 2019, 33(1):67-70(in Chinese with English abstract).
- [12] 李永强,董亚涵,张西童,等.车载LiDAR点云路灯提取方法[J].测绘学报,2018,47(2):247-259. LI Y Q, DONG Y H, ZHANG X T, et al. Point cloud information extraction for streetlights with vehicle-borne LiDAR [J]. Acta geodaetica et cartographica sinica, 2018, 47 (2) : 247-259 (in Chinese with English abstract).
- [13] 武鹏.平面特征的多站地面激光雷达点云配准[J].测绘科学,2016,41(9):108-111. WU P. Plane-based registration of terrestrial LiDAR point clouds acquired by multiple scans [J]. Science of surveying and mapping, 2016, 41 (9) : 108-111 (in Chinese with English abstract).
- [14] 邹佳琪.基于数据融合的全地面起重机路面信息识别技术研究[D].长春:吉林大学,2020. WU J Q. Study on road information identification technology of all terrain crane based on data fusion [D]. Changchun: Jilin University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [15] 梁冠群,赵通,王岩,等.基于LSTM网络的路面不平度辨识方法[J].汽车工程,2021,43(4):509-517,628. LIANG G Q, ZHAO T, WANG Y, et al. Road unevenness identification based on LSTM network [J]. Automotive engineering, 2021, 43(4):509-517, 628(in Chinese with English abstract).
- [16] LIU X D, WANG H X, SHAN Y C, et al. Construction of road roughness in left and right wheel paths based on PSD and coherence function [J]. Mechanical systems and signal processing, 2015, 60/61:668-677.
- [17] YU C P, LIN Y, CHANG C C. An effective crack-identification approach for impact echo signals using MWT spectrograms and scaled FFT spectra [J]. Materials and structures, 2021, 54(1):1-21.
- [18] KUMAR P, LEWIS P, MCELHINNEY C P, et al. An algorithm for automated estimation of road roughness from mobile laser scanning data [J]. The photogrammetric record, 2015, 30 (149):30-45.
- [19] 吴伟斌,韩重阳,梁荣轩,等.基于轮毂电机驱动的山地林果茶园轮式运输车设计与试验[J].华中农业大学学报,2021,40(3):286-294. WU W B, HAN C Y, LIANG R X et al. Design and test of a wheeled transporter driven by hub motor for hilly orchard and tea garden. [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40 (3) : 286-294 (in Chinese with English abstract).

## The road roughness acquisition test and analysis of three-dimensional lidar orchard pavement

ZHAO Xin<sup>1,2</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, YUE Dandan<sup>1</sup>, HAN Chongyang<sup>1</sup>, TANG Ting<sup>1</sup>, WU Weibin<sup>1,2</sup>

1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment/  
Division of Citrus Machinery, China Agriculture Research System/ Guangdong Engineering Technology  
Research Center for Creative Hilly Orchard Machinery, Guangzhou 510642, China

**Abstract** Take the collection of typical road unevenness in the orchard as the research object, establish a road roughness acquisition method based on lidar point cloud processing, built a road roughness acquisition system platform based on 3D lidar, combine point cloud processing technology to complete the extraction of road elevation information. By using AR (autoregressive) model to calculate the road power spectral density based on the proportional analysis method to determine the roughness level, and through the acceleration vibration recorder for system verification, using the system to carry out a typical orchard road unevenness data collection test. The test results show that the roughness of the orchard road surface showed that the cement pavement is mainly concentrated in the B grade, and the B grade accounts for 82.33%. The sand and gravel pavement is mainly concentrated in the C grade, and the C grade accounts for 84.00%. The mud pavement is mainly concentrated in the D, E grade, with D grade accounting for 48.67% and E grade accounting for 31.00%. The results of roughness evaluation indicated that the application of the three-dimensional lidar orchard road roughness acquisition system is reliable and the results of evaluation are accurate. It is suitable for collecting level of road roughness in mountain forests, fruit, and tea gardens.

**Keywords** orchard pavement; road roughness; 3D lidar; point cloud processing; power spectral density; precision agriculture

(责任编辑:陆文昌)