

## 基于点云分水岭算法的路面车辙三维轮廓提取方法

赵帅<sup>1</sup>, 刘如飞<sup>1\*</sup>, 马召恒<sup>2</sup>, 马新江<sup>3</sup><sup>1</sup>山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;<sup>2</sup>河北省地理信息集团有限公司, 河北 石家庄 050000;<sup>3</sup>河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100

**摘要** 针对道路养护管理中缺乏车辙精确边界自动分析提取的问题, 提出一种基于点云分水岭算法的路面车辙三维轮廓提取方法。首先对单车道路面激光点云数据进行高程归一化处理, 消除路面横向设计坡度影响; 利用包络线算法计算路面横断面的相对深度, 生成路面点云相对深度模型, 用于增强车辙辙槽的凹陷特征, 并消除路面纵向坡度对点云分水岭算法的影响; 然后, 通过计算车辙边界曲率特征获取车辙粗略分界线, 据此将路面划分为 5 个区域, 选择每条横断面在对应区域相对深度最大的点作为点云分水岭算法的注水点集; 最后, 根据分水岭算法积水浸没的原理精确获取车辙的纵向轮廓。利用青岛平度市内 S218 省道的路面车辙激光点云数据进行实验分析。结果表明: 所提方法可准确提取多类型的车辙边界, 获取的车辙轮廓纵向边界均方根误差小于 5 cm; 同时, 基于车辙边界获得的车辙深度均方根误差均小于 1.5 mm, 包络线法计算的车辙深度均方根误差均大于 1.5 mm, 所提方法具有更高的精度。所提方法为道路养护管理提供了一种有效的车辙三维轮廓提取方法。

**关键词** 遥感; 路面激光点云; 车辙; 分水岭算法; 三维轮廓

中图分类号 P237 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231255

### Three-Dimensional Contour Extraction Method for Road Rut Based on Point Cloud Watershed Algorithm

Zhao Shuai<sup>1</sup>, Liu Rufeif<sup>1\*</sup>, Ma Zhaoheng<sup>2</sup>, Ma Xinjiang<sup>3</sup><sup>1</sup>College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;<sup>2</sup>Hebei Geographic Information Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China;<sup>3</sup>School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China

**Abstract** This study aims at the lack of automatic analysis and extraction of precise road rut boundaries in road maintenance and management and proposes a method of a three-dimensional (3D) rut-contour extraction based on a point cloud watershed algorithm to address the issue. The method first operated the elevation normalization processing for the laser point cloud data of single-lane pavement to eliminate the influence of the transverse slope. The envelope method was employed to estimate the relative depth of the pavement cross-section and generate the relative depth model of the pavement point cloud. This was further utilized to enhance the sag characteristics of rutting grooves and remove the influence of the longitudinal slope of pavement on the watershed algorithm of the point cloud. Then, the rough boundary line of the rut was obtained by calculating the curvature characteristics of the rut boundary. Besides, the road surface was divided into five regions. The point with the maximum relative depth of each cross-section in the corresponding region was selected as the water-injection point set of the point cloud watershed algorithm. Finally, the longitudinal contour of ruts was precisely obtained according to the principle of waterlogging in the watershed algorithm. An experimental analysis was conducted on the S218 provincial road in Pingdu city, Qingdao to verify the corresponding laser point cloud data of the road ruts. The results show that the proposed method can accurately extract the multitype rut boundary, and the root mean square error of the longitudinal boundary of the rutting contour obtained is less than 5 cm. Simultaneously, the root mean square error of the rut depth obtained based on the rut boundary is less than 1.5 mm, while that estimated using the envelope method is greater than 1.5 mm. This demonstrates the higher accuracy of the proposed method. Therefore, the proposed method provides an effective method to extract the 3D contour of ruts for road maintenance and management.

**Key words** remote sensing; laser point cloud on pavement; rut; watershed algorithm; three-dimensional contour

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-16; 录用日期: 2023-07-24; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(42001414)、山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1135)、“菁英计划”科研支持经费(0104060541613)、交通运输行业重点科技项目(2020-ZD3-021)

通信作者: liurufeif@sdust.edu.cn

# 1 引言

车辙作为一种路面病害会影响行车安全与道路使用寿命<sup>[1-2]</sup>。在雨雪天气下,车辙会造成路面大量积水、结冰,使车轮与路面的摩擦大大减弱,易造成交通事故<sup>[3-4]</sup>。另外车辙还会造成路面的破损和缺陷,进一步破坏路面结构层的质量<sup>[5]</sup>。因此,为减少行车意外,支撑道路路面的维修和养护,对车辙病害进行检测,获取车辙病害的三维特征信息并对车辙病害进行评估就变得至关重要。近年来,随着激光雷达技术获取空间三维信息的能力增强<sup>[6-8]</sup>,车载移动测量系统应运而生,利用车载移动测量系统取代人工对路面车辙进行检测已成为一种趋势。

针对车辙的特征提取与评价指标,很多学者做了相关研究。侯相深等<sup>[9]</sup>基于横断面提取车辙最大深度、车辙宽度、车辙辙槽侧壁倾角与平整度、车辙最大可能积水面积、车辙辙槽的平均曲率半径等多个指标描述车辙的特征,揭示了车辙与行车安全性之间的关系。李莉等<sup>[10]</sup>利用激光线结构光检测车辙并利用横断面包络线计算最大车辙深度和曲线填充面积。张德津等<sup>[11]</sup>采用线激光器和三维相机组合集成测量路面 3D 断面,通过 3D 断面解算车辙深度。洪梓铭等<sup>[12]</sup>利用非负特征值与峰值连续性提取路面车辙激光线,以检测车辙深度等相关信息。郭鑫鑫等<sup>[13]</sup>分别用三维线激光与 13 点激光检测车辙深度,结果表明 13 点激光检测设备对隆起类型车辙的检测误差和离散性均高于对无隆起车辙的检测结果。胡斯然等<sup>[14]</sup>针对有隆起和无隆起 2 类典型车辙横断面形态,分析了多点激光检测车的偏移方向与偏移距离对车辙深度测量的影响。惠冰等<sup>[15]</sup>利用三维激光点云数据模拟车辙横断面,分析多

点激光布设参数对车辙深度计算误差的影响。郎洪等<sup>[16]</sup>基于包络线计算车辙深度,并提出两种识别模型检测造成车辙检测异常的其他病害。李中铁等<sup>[17]</sup>根据激光点云数据提出一种结合路面水平轴和车道边缘线坐标的车辙定位方法,并在横断面的基础上测量车辙最大深度与宽度。燕皎等<sup>[18]</sup>基于横断面获取车辙积水深度的分布情况,结果表明车辙最大深度代替积水深度后过高地估计了安全风险。李清泉等<sup>[19]</sup>基于路面标准轮廓提取疑似损坏数据,形成深度图像,获取变形类损坏的位置、面积、深度分布及边缘等信息。

综上所述,部分学者提出了多种车辙评价指标,但未给出指标的自动提取方法。大多数学者针对车辙深度进行了相关研究,但深度指标单一,不能反映车辙对行车安全的影响程度。少数学者虽然涉及了车辙宽度、边缘等方面,但难以将它们作为道路养护管理的有效评价指标,目前关于车辙轮廓的定义和提取方法仍缺乏充分的研究。针对上述问题,本文提出一种基于点云分水岭算法的路面车辙三维轮廓提取方法,该方法以激光点云数据中车辙的曲率拐点为轮廓边界点,基于分水岭算法的基本原理提取车辙三维区域的纵向轮廓线,获取车辙的精细三维轮廓信息。

## 2 研究方法

基于单车道路面点云数据,首先对点云数据进行预处理,然后生成路面点云相对深度模型;在该模型的基础上根据车辙曲率特征获取点云分水岭算法的最优注水点,利用点云分水岭算法的浸没处理对车辙进行分割,获取车辙的纵向边界信息,从而精确提取车辙轮廓。单车道路面车辙病害的三维轮廓信息提取流程如图 1 所示。

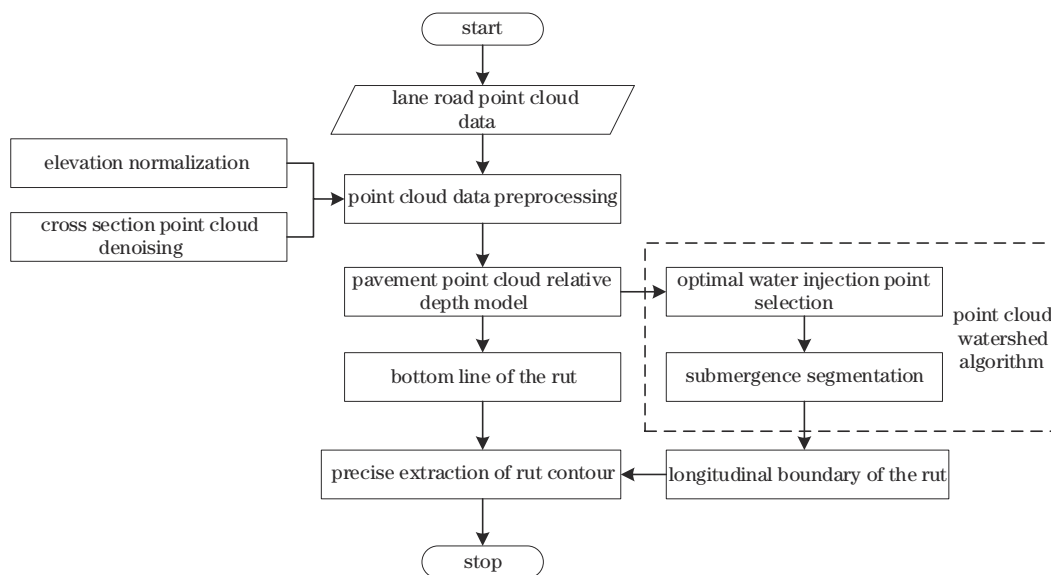


图 1 车辙三维轮廓信息提取流程

Fig. 1 Extraction process of rut 3D contour information

## 2.1 点云预处理

### 2.1.1 横断面高程归一化

考虑到路面排水问题,路面修建时有横向设计坡度。包络线算法计算车辙的深度时需要依据车辙横断面的斜率计算峰值点,路面横向设计坡度会影响峰值点的计算,因此需要对点云进行高程归一化,以消除路面横向设计坡度对车辙深度计算的影响。取横断面中心点与横断面左右两端点,取其 X 和 Z 坐标计算旋转角度  $\theta$ ,以中心点为原点分别旋转左右横断面,消除横向设计坡度。

### 2.1.2 横断面点云去噪

利用道路三维快速巡检系统对单车道路面进行点云采集,然而由于路面上存在石子、树枝等细小异物的干扰,以及扫描仪自身的波动误差,采集的点云数据存在噪声<sup>[20]</sup>。这些噪声在横断面中通常以异常孤立点的形式存在,对横断面进行腐蚀膨胀不仅可以消除横断面存在的异常孤立点,还可以保持非孤立点位置和横断面形状不改变。针对不同的点云密度,需选择大小合适的结构元素,本文以 3 个点元素为单位,取单位最小高程为中间点的高程,依次遍历整个横断面点云,完成腐蚀。膨胀同理,取 3 个点元素中的高程最大值代替中间点高程,遍历整个横断面。通过横断面点云去噪,可有效去除高于路面点云的异常孤立点噪声。

## 2.2 路面点云相对深度模型生成

《公路路基路面现场测试规程》中规定了 7 种车辙类型<sup>[21]</sup>。本文针对规程中 b) 型车辙与 d) 型车辙进行

研究,这两种车辙的边界都存在隆起。目前计算车辙深度常用的方法为包络线法,即计算车辙横断面到包络线的最大垂直距离,为车辙的深度。如图 2(a) 所示,路面车辙相对原本路面线的深度为  $d_1$ ,路面车辙相对包络线的深度为  $d_2$ ,明显  $d_1$  小于  $d_2$ 。为了增强车辙槽的凹陷特征,建立路面点云相对深度模型,如图 2(b) 所示,模型横断面与模型标准线的深度  $d_3$  与图 2(a) 中的  $d_2$  相等,在车辙深度不变的情况下,模型显著增强了车辙槽的凹陷特征。

路面点云相对深度模型采用微元化思想,将路面分割为很多横断面,计算每条横断面点到包络线的距离代替高程,从而在包络线基准下获得路面相对高程值  $Z_d$ 。此时车辙的辙槽部分表现为凸起形态,为符合车辙的真实形态特征,将  $Z_d$  取负数,将路面相对高程值转换为路面相对深度值,构成路面点云相对深度模型。在路面点云相对深度模型中每条包络线的峰值点全部位于相对深度为 0 mm 的平面,在模型的横断面上表现为该横断面所有峰值点构成一条直线,定义此直线为模型标准线,该横断面所有点皆不超过模型标准线。因此,建立一个模型相对深度坐标系,用于表示模型的相对深度信息。该坐标系的原点为模型横断面的左端点,即道路左边界点;X 轴为模型标准线所在的直线;Z 轴是从原点垂直于 X 轴向下的直线。X 轴表示与道路左边界的距离信息,Z 轴表示模型的相对深度信息,且相对深度值的负号只表示方向,不表示大小,如图 2(b) 所示。

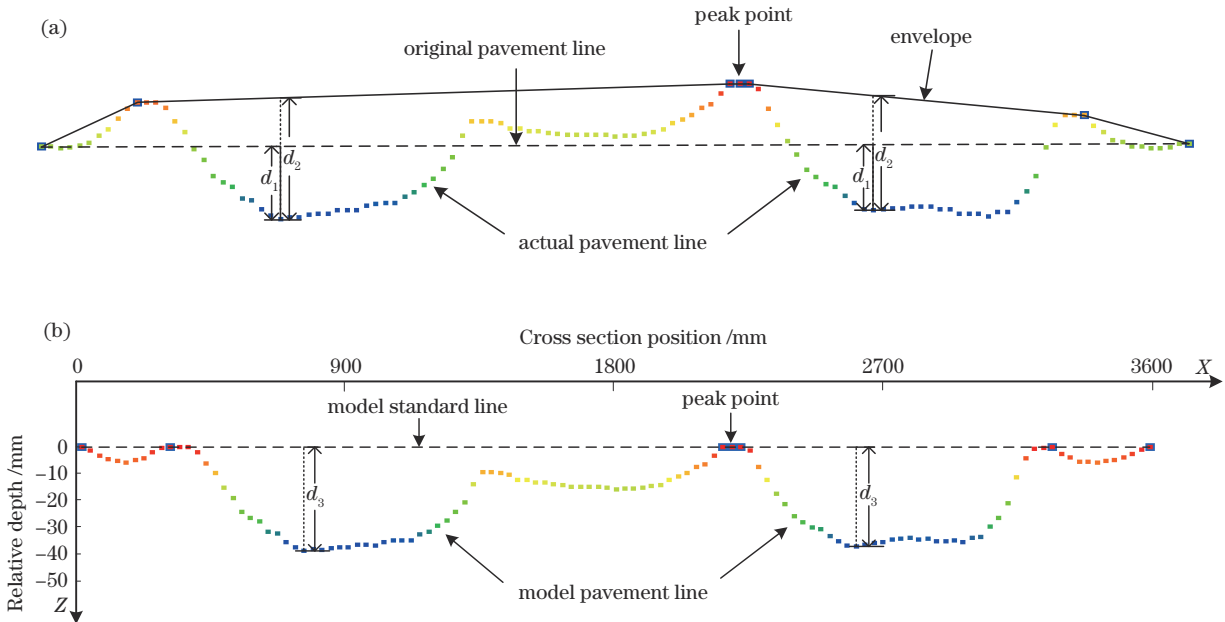


图 2 模型增强车辙辙槽凹陷特征的过程。(a) 预处理后的点云横断面;(b) 路面点云相对深度模型的横断面

Fig. 2 Model enhancing the grooving characteristic process of ruts. (a) Cross section of point cloud after pretreatment; (b) cross section of the relative depth model of road point cloud

原始点云经过点云预处理后还存在纵向坡度,如图 3(b) 所示,纵向坡度会影响点云分水岭算法中注水

点的确定与浸没过程。而路面点云相对深度模型则消除了车辙纵向坡度,如图 3(c) 所示。道路路面存在多

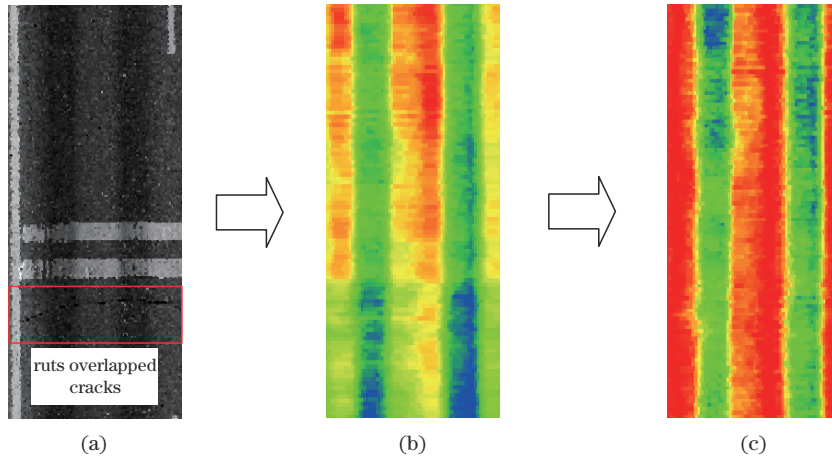


图 3 构建路面点云相对深度模型的过程。(a)原始点云;(b)预处理后的点云;(c)路面点云相对深度模型

Fig. 3 Process of building pavement point cloud relative depth model. (a) Primary point cloud; (b) point cloud after pretreatment; (c) pavement point cloud relative depth model

种病害,例如纵横裂缝、坑槽、塌陷、拥包等,这就出现车辙病害与其他病害叠加的情况,其中裂缝与车辙叠加情况如图 3(a)所示,会造成路面点云相对深度模型中存在深度突变的异常点。因此,对路面深度信息模型进行中值平滑处理,消除深度突变较大的点,以减小裂缝对车辙深度的影响。

### 2.3 路面点云分水岭算法

目前分水岭算法主要应用于图像处理,其基本思想是将图像比作地形图,像素值高的区域表示高山,像

素值低的区域表示低谷<sup>[22]</sup>。车辙形态类似于微观的高山低谷形态,与分水岭算法的基本思想相符合,因此本文提出一种点云数据适应于车辙分割的分水岭算法,提取车辙边界。定义车辙边界点为车辙侧壁与路面连接处一个曲率特征明显的拐点,如图 4 所示的点 b1、b2、b3、b4。车辙最深点为车辙谷底点<sup>[17]</sup>,如图 4 所示的点 e1、e2。点云分水岭算法主要包括 2 个步骤:选择适应于车辙形态的最优注水点;基于点云数据进行浸没分割。

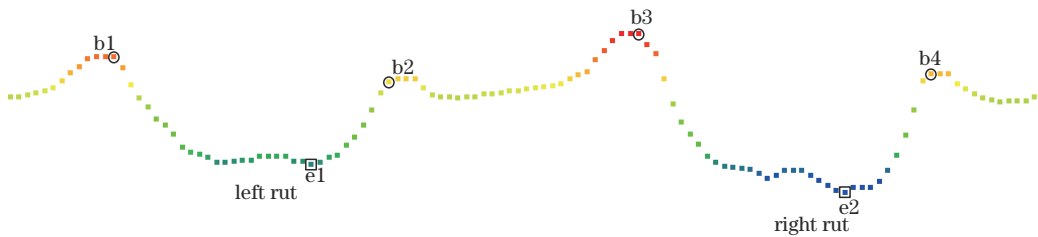


图 4 车辙边界点与谷底点

Fig. 4 Rut boundary point and bottom point

#### 2.3.1 最优注水点选择

传统分水岭算法用局部极小值点作为注水点的方法存在过分割的情况,为了解决算法过分割的问题,本文选择在点云分水岭算法分割之前依据路面车辙的形态特征确定注水点的位置和数量。由于路面车辙通常有 2 个凹槽,将单车道路面划分为 5 个区域,并在每个区域提取一个注水点集。由于车辙侧壁与路面连接处存在一个曲率特征明显的点,根据车辙的曲率特征初步将路面分为 5 个区域。将路面点云相对深度模型横断面各点连接成凹凸不平的光滑曲线,规定沿曲线方向凸曲线曲率为正,凹曲线曲率为负,计算点云横断面曲率,计算公式为

$$\tan \theta_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

$$\alpha_{i+1} = \theta_{i+1} - \theta_i, \quad (2)$$

$$k_{i+1} = \frac{\alpha_{i+1} \times 180}{\pi \times l_{AB}}, \quad (3)$$

式中: $x_i$ 为横断面第  $i$  个点的横坐标; $z_i$ 为横断面第  $i$  个点的相对深度值; $\theta_i$ 表示第  $i$  个点的倾角; $\alpha_{i+1}$ 表示第  $i+1$  个点的切线转动角; $l_{AB}$ 表示第  $i$  个点与第  $i+1$  个点的弦长; $k_{i+1}$ 表示第  $i+1$  个点的曲率。

选择曲率为正的点,计算其曲率均值,曲率大于均值的点为高曲率点,保留。分别计算高曲率点到模型标准线与下包络线的距离,将邻近模型标准线的高曲率点作为候选点进行保留,如图 5 所示。在候选点中,利用车辙相对深度特征筛选出最合适的候选点作为车辙的分界点。首先利用横断面左端点、左车辙谷底点、中点、右车辙谷底点和右端点将横断面分为 4 段,然后从每段选择最邻近模型标准线的候选点,并判断该候选点相对深度  $\pm 1$  mm 内有无其他候选点,若有,则将

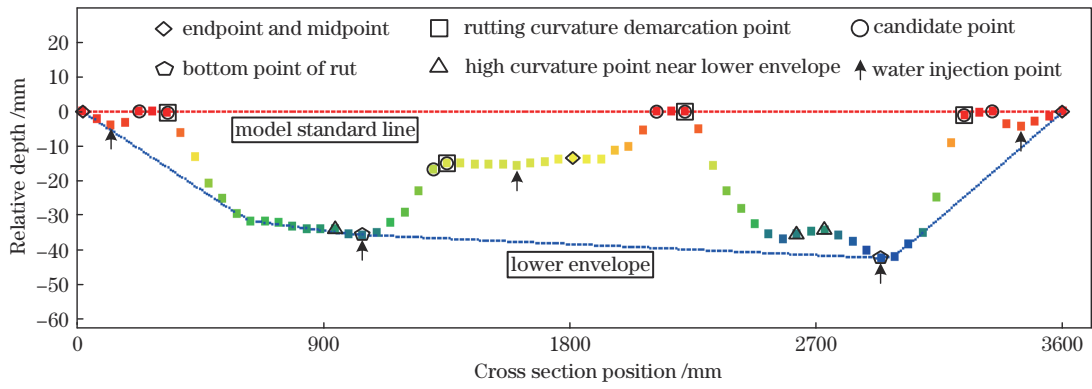


图 5 车辙曲率分界点

Fig. 5 Boundary point of rut curvature

最邻近车辙谷底点的候选点作为车辙凹槽的分界点，称为车辙曲率分界点。所有横断面的车辙曲率分界点构成纵向的车辙曲率分界线。以该方法计算的车辙曲率分界点存在离散性较大的误差点，不完全重合于定义的车辙边界点，因此该方法仅适合获取车辙粗略分界线。利用获取的车辙曲率分界线将路面初步分为 5 个区域，选择每条横断面在对应区域内相对深度最大的点作为注水点，每个区域内所有注水点构成一个小点集  $m_p$ ，5 个小点集构成一个大注水点集  $M_p = \{m_{p1}, m_{p2}, m_{p3}, m_{p4}, m_{p5}\}$ 。

### 2.3.2 点云分水岭算法浸没

传统分水岭算法浸没过程包括自上而下的模拟降水算法与自下而上的模拟泛洪算法<sup>[23]</sup>。本文基于自下而上的模拟泛洪算法的基本原理进行浸没，该算法浸没过程是一种递归迭代的过程。首先，对路面点云相对深度模型划网格，由于横断面是基于车道中心线等间隔获取的，并在横断面上等间隔取点，所以把横断面编号作为行号，横断面上点序号作为列号，如图 6 所示，则模型每个点相当于图像的一个像素，点的相对深度值相当于图像的灰度值。然后划分浸没区间，整个

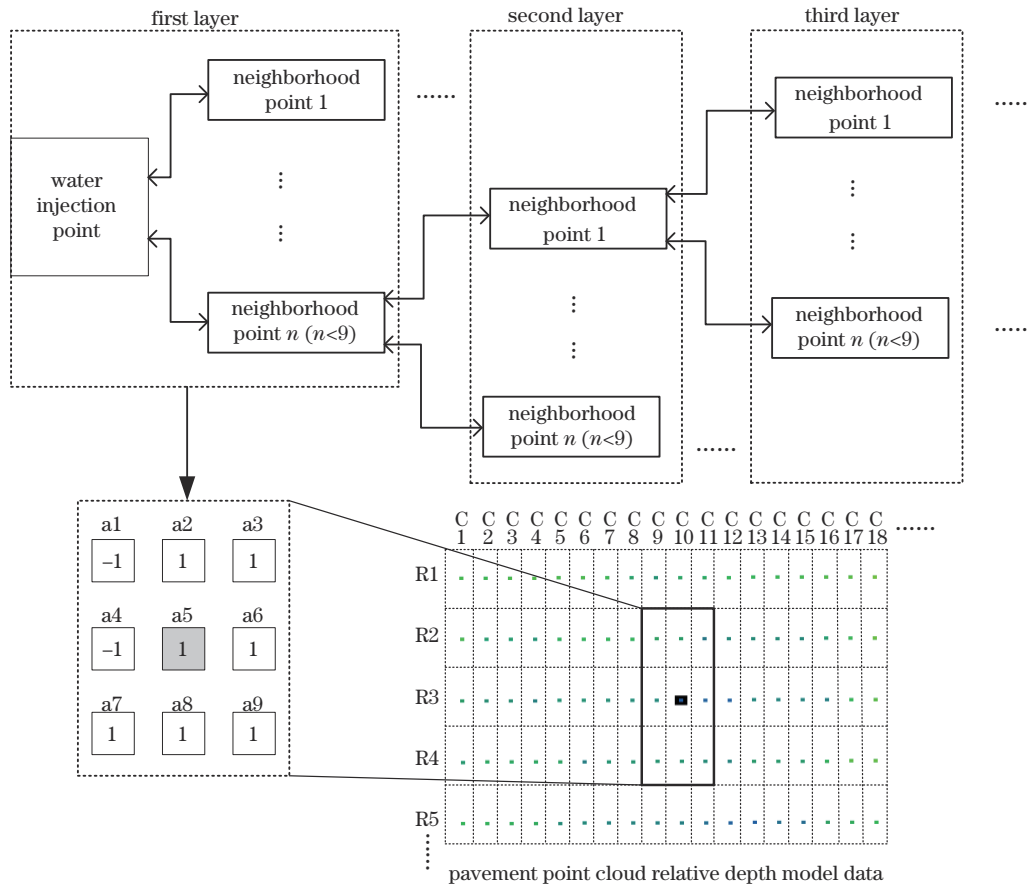


图 6 点云分水岭算法的浸没过程

Fig. 6 Immersion process of point cloud watershed algorithm

模型在  $Z$  维度分成 255 个区间。在每个小注水点集  $m_p$  中选出相对深度最大的注水点,将 5 个注水点按相对深度值  $Z_p$  从小到大进行排序,  $Z_{p1} < Z_{p2} < Z_{p3} < Z_{p4} < Z_{p5}$ , 相对深度为 0 的基准值  $Z_{p0}$  与 5 个注水点的相对深度值将整个模型分为 5 个大区间,每个大区间分为 51 个小区间,计算公式为

$$Z_{Hj} = |Z_{pj} - Z_{p_{j-1}}| / 51, \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (4)$$

式中:  $j$  表示第  $j$  个大区间;  $Z_{pj}$  为第  $j$  个大区间相对深度最大的注水点的相对深度值;  $Z_{Hj}$  为第  $j$  个大区间中每个小区间的间隔。

从 5 个注水点中相对深度最大的注水点开始浸没,每次浸没一个小区间,水面相对深度为当前小区间的最小相对深度,整个模型需浸没 255 次。水面相对深度 ( $D_{wsz}$ ) 的计算公式为

$$D_{wsz} = Z_{pj} + m \times Z_{Hj}, \quad j = 5, 4, 3, 2, 1$$

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots, 51, \quad (5)$$

式中:  $m$  表示当前大区间中从相对深度最大的注水点起,第  $m$  个小区间。当水面相对深度达到注水点集  $M_p$  中其他注水点的相对深度时,接触到水面的注水点也开始注水,不同小注水点集  $m_p$  中的注水点注入不同颜色的水,用标签 1、2、3、4、5 对点进行标记,表示被 5 种不同颜色的水漫过的点。

单次浸没过程如图 6 所示,注水点为图中灰色点 a5, 标签为 1, 未被浸没的点标签为 -1, 开始浸没前,除注水点外所有点的标签均为 -1。判断注水点的 8 邻域点是否满足标签为 -1 且相对深度是否大于水面相对深度,若满足,则将邻域点的标签赋值为 1, 表示

该点被浸没。图 6 中 a2、a3、a6、a7、a8、a9 被浸没为 1 层邻域点。从 1 层邻域点中选择被浸没的一个点作为新的注水点,如 a2, 遍历新注水点 a2 的 8 邻域点,判断其 8 邻域点中是否存在满足条件的点,若存在满足条件的点,则为 2 层邻域点,从 2 层邻域点中选择被浸没的一个点作为新的注水点,继续判断迭代;若 a2 的 8 邻域点中不存在满足条件的点,则返回 1 层邻域点,在 1 层邻域点中选择新的注水点,如 a3。重复上述过程,直至 1 层邻域点遍历完成,则完成该次的浸没过程。完成一次浸没后,下次浸没从水面边缘点开始浸没,若被浸没点的 8 邻域点中存在标签为 -1 的点,将该浸没点加入到对应的注水点集  $m_p$  中,每浸没一次注水点集更新一次。

## 2.4 轮廓边界提取

点云分水岭算法浸没完成后,利用标签将车辙部分的点云数据提取出来,并投影到相对深度为 0 的平面上;然后,利用 Alpha Shapes 算法,从投影后的点云数据中提取出车辙的边界点,并用 RANSAC 直线拟合方法得到车辙的纵向边界;最后,利用八叉树算法重新赋予其原始高程,得到车辙轮廓纵向边界。将所有车辙谷底点连成车辙谷底线,与车辙纵向边界共同构成车辙三维轮廓。所提方法能够有效地检测车辙的形态特征,并计算出车辙的深度。连接边界点作直线,车辙谷底点到该直线的垂直距离为车辙深度,如图 7 中  $d_{r1}$  所示。所提方法得到的车辙深度  $d_{r1}$  不大于包络线方法得到的车辙深度  $d_{r2}$ 。与传统的包络线方法相比,所提方法得到的车辙深度更加符合车辙实际情况。

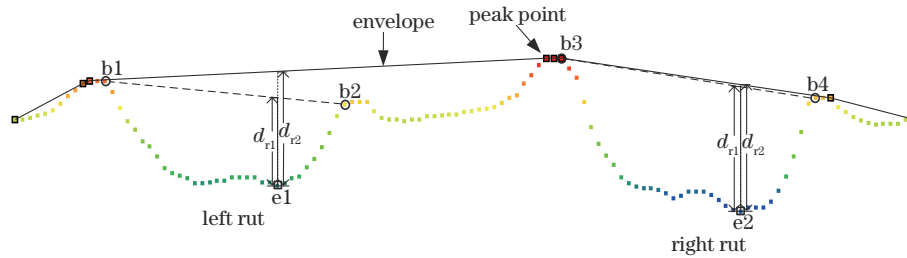


图 7 车辙深度计算

Fig. 7 Rut depth calculation

## 3 实验分析

### 3.1 实验数据

实验路段为青岛平度市内 S218 省道,起点桩号为 K96+484, 终点桩号为 K121+886, 全长 25.402 km, 路面宽度为 24 m, 单车道路面宽为 3.7 m, 为一级公路。道路两侧为乡镇、田地、工厂, 有大型重载车辆行驶, 路面车辙较为严重。该段道路修建时间较长, 需进行道路的评估与养护。利用道路三维快速巡检系统对测试道路进行扫描, 该系统包括汽车载体、GNSS 接收机、惯性导航系统、三维激光扫描仪和全景相机等传感

器。Z+F PROFILER 9012 型扫描仪通过专用的安装支架固定于车辆后侧顶部, 以  $45^\circ$  倾角对地面进行扫描, 其拥有  $360^\circ$  扫描视野, 因此测量时呈螺旋式扫描前进。扫描仪每秒采集 100 万个点, 扫描范围为 0.3~119 m, 测距精度达 1 mm, 测角精度达  $0.02^\circ$ 。作业时车速控制在 40~50 km/h, 三维激光扫描仪转速 200 Hz, 可以有效地覆盖路面和周围环境。系统输出 LAS 格式的点云数据。选取不同深度车辙类变形损坏的点云数据进行测试, 数据包含深度为 10~15 mm 的轻度车辙及大于 15 mm 的重度车辙。

### 3.2 结果与精度分析

#### 3.2.1 实验结果

本研究选择了两段带有车辙的点云数据,经预处理后生成路面相对深度模型。在此基础上,提取车辙谷底点,生成车辙谷底线,并利用车辙曲率特征获取车辙曲率分界线,将路面初步划分为5个区域。进一步获取对应区域的注水点集,并运用点云分水岭算法进行浸没分割,获取的测试结果如图8所示。图8中放大图展示了点云分水岭算法基于路面相对深度模型处理车辙的部分结果。其中,黑色的点表示车辙曲率分界点,这些点离散程度较大,适合作为初步划分车辙边界的依据。图8中①②③④⑤不同颜色的区域表示点云分水岭算法分割后得到的5个部分,这些区域的边界离散性相对较小。为了提取车辙辙槽②④的纵向边界,使用Alpha Shapes算法与RANSAC直线拟合方法提取车辙辙槽轮廓。在原有点云基础上将所提方法获取的车辙谷底线与车辙轮廓纵向边界分别用蓝色线与红色线进行标记。图8中I表示左、右车辙轮廓纵向边界,II表示左、右车辙谷底线,6条纵线表示车辙轮廓信息。

#### 3.2.2 精度分析

车辙曲率分界点存在离散性较大的误差点,因此利用车载三维激光点云数据生成标准横断面,基于标准横断面利用人工判读的方法对车辙曲率分界线进行修正,使其符合定义的真实车辙辙槽边界,作为车辙标

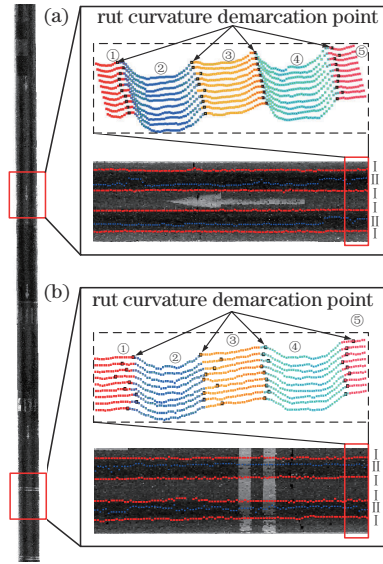


图8 车辙轮廓提取结果。(a)重度车辙;(b)轻度车辙  
Fig. 8 Results of rut contour extraction. (a) Heavy rut; (b) light rut

准轮廓边界。对点云分水岭算法提出的车辙轮廓边界与车辙标准轮廓边界进行对比,通过距离公式  $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$  分别计算两者到横断面左端点(道路左边界点)的平面距离,通过距离评估点云分水岭算法提取的车辙轮廓边界的位置精度。图9展示

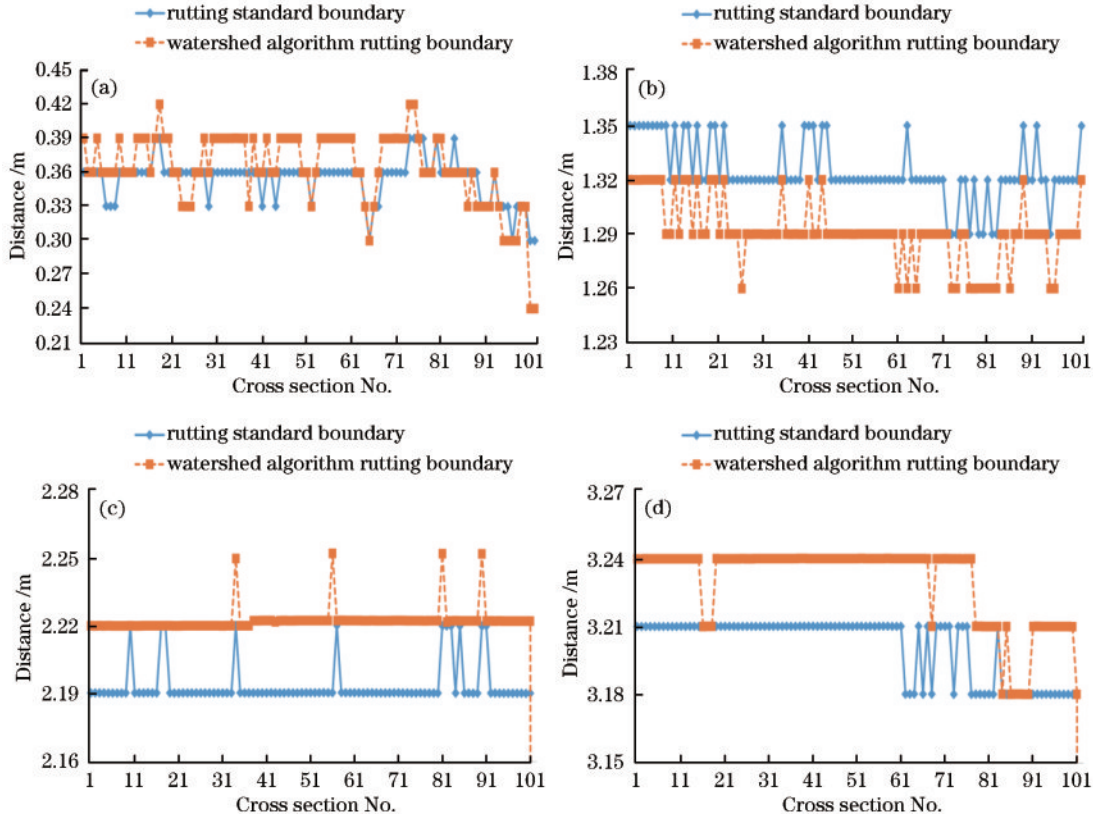


图9 边界精度。(a)左车辙左边界位置精度;(b)左车辙右边界位置精度;(c)右车辙左边界位置精度;(d)右车辙右边界位置精度  
Fig. 9 Boundary accuracy. (a) Precision of left edge position of left rut; (b) precision of right edge position of left rut; (c) precision of left edge position of right rut; (d) precision of right edge position of right rut

了图 8(a)对应的点云数据分析结果,其中图 9(a)和图 9(b)表示左车辙标准轮廓左、右边界与分水岭算法提取的左车辙轮廓左、右边界到横断面左端点的距离;图 9(c)和图 9(d)表示右车辙标准轮廓左、右边界与分水岭算法提取的右车辙轮廓左、右边界到横断面左端点的距离。

根据图 9 分析,车辙标准轮廓边界与点云分水岭算法提取的车辙边界之间的最大偏差为 9 cm,均方根误差均小于 4 cm,如表 1 所示。同样地,对图 8(b)对应的轻度车辙点云数据进行分析,得到车辙标准轮廓边界与点云分水岭算法提取的车辙边界之间的最大偏差为 12 cm,均方根误差均小于 5 cm,如表 1 所示。这些结果表明,分水岭算法提取的车辙轮廓边界具有 5 cm 以内的精度,算法适用于路面车辙检测。所提方法为目前缺乏车辙纵向轮廓信息提取方法的问题提供了一种新的解决方案。

采用包络线法与所提方法分别计算两组车辙深

表 1 车辙轮廓边界均方根误差

Table 1 Root mean square error of rut contour boundary

Data	Root mean square error / cm			
Data 1 (heavy rut)	2.4	3.6	3.1	3.1
Data 2 (light rut)	3.1	4.8	4.3	3.7

度,并以人工检测法作为对照。人工检测方法按照《公路路基路面现场测试规程》中沥青路面车辙的检测方法进行检测<sup>[21]</sup>,检测 10 条横断面的车辙深度。图 10 展示了两组不同程度的车辙深度的测量结果,其中图 10(a)和图 10(b)为重度车辙,图 10(c)和图 10(d)为轻度车辙。表 2 列出了包络线法、所提方法与人工检测得到的车辙深度均方根误差。从表 2 可以看出:包络线法计算的车辙深度与人工检测结果相比,均方根误差均大于 1.5 mm;所提方法计算的车辙深度与人工检测结果相比,均方根误差均小于 1.5 mm。因此,所提方法具有更高的准确性和可靠性。

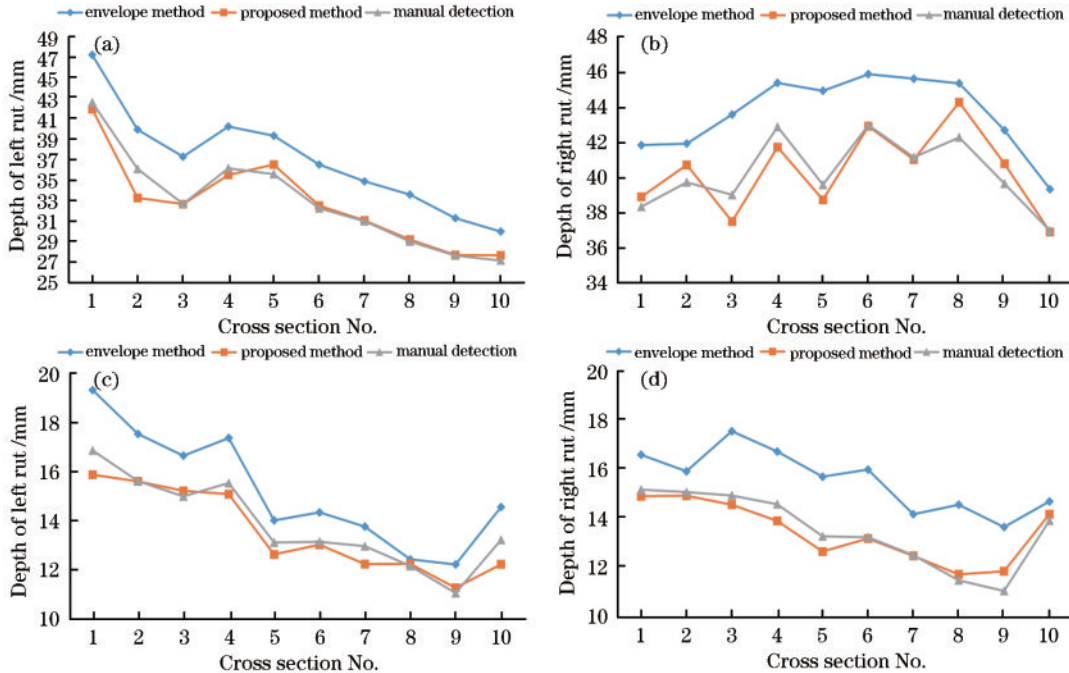


图 10 不同方法测量的车辙深度。(a)重度车辙左车辙深度;(b)重度车辙右车辙深度;(c)轻度车辙左车辙深度;(d)轻度车辙右车辙深度

Fig. 10 Measured rut depth using different methods. (a) Left rut depth of heavy rut; (b) right rut depth of heavy rut; (c) left rut depth of light rut; (d) right rut depth of light rut

表 2 车辙深度均方根误差

Table 2 Root mean square error of rut depth

Data	Position	Root mean square error / mm	
		Envelope method	Proposed method
Data 1 (heavy rut)	Left rut	4.0	1.0
	Right rut	3.6	1.1
Data 2 (light rut)	Left rut	1.5	0.6
	Right rut	2.2	0.4

## 4 结 论

为提取路面车辙病害的三维轮廓信息,利用路面激光点云数据,提出了一种基于点云分水岭算法的路面车辙三维轮廓提取方法。所提方法基于路面点云相对深度模型提取车辙谷底线,并充分结合车辙的形态特征,获取适应于车辙的最优注水点,然后采用分水岭算法的积水浸没原理进行分割处理,精确提取车辙的纵向边界,最终获得车辙的三维轮廓信息。利用 S218



省道的大量点云数据进行实验,提取的车辙轮廓纵向边界均方根误差均小于 5 cm,实现了精确提取出车辙三维轮廓的目标。所提方法可以有效计算出车辙深度,车辙深度均方根误差比包络线法的更小,更加符合车辙深度的实际情况。所提方法为道路车辙的三维轮廓提取和深度计算问题提供了一种有效的解决方案,为道路的维修和养护提供可靠的数据支撑。

### 参 考 文 献

- [1] 徐鹏,祝轩,姚丁,等. 沥青路面养护智能检测与决策综述[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2099-2117.  
Xu P, Zhu X, Yao D, et al. Review on intelligent detection and decision-making of asphalt pavement maintenance[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2099-2117.
- [2] 刘如飞,柴永宁,陈敏. 路面连续激光点云中车辙三维特征提取方法研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(6): 59-65.  
Liu R F, Chai Y N, Chen M. Study on method for extracting 3D feature of rutting in pavement by continuous laser point cloud[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(6): 59-65.
- [3] 燕姣. 基于网格的左右不对称积水车辙安全分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 1759-1767.  
Yan J. Safety analysis of left and right asymmetrical waterlogged rutting based on grid[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 1759-1767.
- [4] 张敏,郭鑫鑫,张弛. 积水条件下考虑行车安全的车辙长度仿真分析[J]. 系统仿真实报, 2015, 27(4): 747-754.  
Zhang M, Guo X X, Zhang C. Simulation analysis of rutting length based on driving safety under condition of road waterlogging[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(4): 747-754.
- [5] Serigos P A, Prozzi J A, de Fortier Smit A, et al. Evaluation of 3D automated systems for the measurement of pavement surface cracking[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(6): 05016003.
- [6] 胡杰,安永鹏,徐文才,等. 基于激光点云的深度语义和位置信息融合的三维目标检测[J]. 中国激光, 2023, 50(10): 1010003.  
Hu J, An Y P, Xu W C, et al. 3D object detection based on deep semantics and position information fusion of laser point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(10): 1010003.
- [7] 惠振阳,李娜,程朋根,等. 基于连通性标记优化的地基 LiDAR 点云单木分割方法[J]. 中国激光, 2023, 50(6): 0610002.  
Hui Z Y, Li N, Cheng P G, et al. Single tree segmentation method for terrestrial LiDAR point cloud based on connectivity marker optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(6): 0610002.
- [8] 许梦兵,刘先林,仲雪婷,等. 结合地面点和杆状物的车载激光点云自动配准方法[J]. 中国激光, 2023, 50(2): 0210002.  
Xu M B, Liu X L, Zhong X T, et al. Automatic registration method of vehicle-mounted laser point cloud combining ground points and rods[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(2): 0210002.
- [9] 侯相深,马松林,王彩霞. 基于行车安全的沥青路面车辙测量与评价指标的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(8): 14-17.  
Hou X S, Ma S L, Wang C X. Research on measurement and evaluation of asphalt pavement rutting based-on traffic safety[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(8): 14-17.
- [10] 李莉,孙立军,谭生光,等. 用于路面车辙检测的线结构光图像处理流程[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 710-715.  
Li L, Sun L J, Tan S G, et al. Line-structured light image processing procedure for pavement rut detection[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(5): 710-715.
- [11] 张德津,李清泉,何莉. 一种新的激光车辙深度测量方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112005.  
Zhang D J, Li Q Q, He L. A new method for laser rut depth measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112005.
- [12] 洪梓铭,陈昆,荆根强,等. 基于线激光的自然条件下路面车辙实时检测方法研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0617007.  
Hong Z M, Chen K, Jing G Q, et al. A real-time detection approach to pavement rutting based on line laser in nature condition[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6): 0617007.
- [13] 郭鑫鑫,惠冰. 基于三维线激光技术的多点激光车辙检测误差分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(9): 113-118.  
Guo X X, Hui B. Assessment of rut depth measurement accuracy of point-based rut bar systems using 3D line laser imaging technology[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(9): 113-118.
- [14] 胡斯然,周博闻,惠冰. 非均布 13 点激光路面车辙检测偏移误差分析[J]. 公路工程, 2020, 45(4): 85-91.  
Hu S R, Zhou B W, Hui B. Error analysis of pavement rutting detecting lateral offset of using non-uniformly distributed 13-point lasers[J]. Highway Engineering, 2020, 45(4): 85-91.
- [15] 惠冰,谢铁琼,郭牧. 多点激光布设参数对车辙深度计算误差的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 81-86, 123.  
Hui B, Xie Y Q, Guo M. Effect of multi-point laser-based configurations on calculation error of rut depth measurement[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(4): 81-86, 123.
- [16] 郎洪,陆键,陈圣迪,等. 考虑病害三维特征的沥青路面车辙异常检验方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 454-462.  
Lang H, Lu J, Chen S D, et al. Asphalt pavement

- rutting anomaly inspection method considering 3D characteristics of distress[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 454-462.
- [17] 李中铁, 罗文婷, 李林, 等. 基于路面 3D 激光点云数据的车辙自动测量与横向定位[J]. 传感技术学报, 2019, 32(4): 637-642.  
Li Z Y, Luo W T, Li L, et al. Automatic rutting measurement and horizontal positioning based on 3D laser point cloud data of pavement[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(4): 637-642.
- [18] 燕姣, 李岩, 惠冰. 车辙断面非均匀积水对车辆安全性影响的仿真分析[J]. 汽车技术, 2019(11): 47-51.  
Yan J, Li Y, Hui B. Simulation analysis of rutting section unevenness with respect to vehicle driving safety [J]. Automobile Technology, 2019(11): 47-51.
- [19] 李清泉, 邹勤, 张德津. 利用高精度三维测量技术进行路面破损检测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1549-1564.  
Li Q Q, Zou Q, Zhang D J. Using high-precision three-dimensional measurement technology to detect pavement damage[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1549-1564.
- [20] 刘如飞, 杨继奔, 任红伟, 等. 一种多特征约束的路面点云精简方法[J]. 遥感信息, 2021, 36(6): 1-8.  
Liu R F, Yang J B, Ren H W, et al. A pavement point cloud simplification method with multi-feature constraints [J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(6): 1-8.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基路面现场测试规程: JTG E60—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering: JTG E60—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [22] 张海涛, 李雅男. 阈值标记的分水岭彩色图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(12): 1602-1611.  
Zhang H T, Li Y N. Watershed algorithm with threshold mark for color image segmentation[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(12): 1602-1611.
- [23] 沈夏炯, 吴晓洋, 韩道军. 分水岭分割算法研究综述[J]. 计算机工程, 2015, 41(10): 26-30.  
Shen X J, Wu X Y, Han D J. Survey of research on watershed segmentation algorithms[J]. Computer Engineering, 2015, 41(10): 26-30.