

沥青路面构造深度分区域平面拟合算法

朱峰¹,冯兴乐^{2*},伍川³,林小勇³

(1.中铁十局集团第一工程有限公司,山东 济南 250000;2.长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064;
3.中铁城市发展投资集团有限公司,四川 成都 610000)

摘要:针对现有沥青路面构造深度计算方法易受外界和人为因素影响的问题,该文提出基于线激光三维数据的构造深度分区域平面拟合算法。该算法对采集的路面三维高度数据矩阵进行预处理,并提出一种基于斜率的点云数据自适应滤波算法。然后进行分块、确定中心点的局部极值,最后以三点一面的平面拟合算法为核心,计算沥青路面的构造深度。试验结果表明:该算法与电动铺砂法的相关性超过94%,计算复杂度为立体拟合法的1/3,并实现了采集样本由点到面的跨越。

关键词:道路工程;沥青路面;构造深度;平面拟合;三维数据;线激光

中图分类号:U416

文献标志码:A

Multi-Region Plane Fitting Algorithm for Texture Depth of Asphalt Pavements

ZHU Feng¹, FENG Xingle^{2*}, WU Chuan³, LIN Xiaoyong³

(1.China Railway 10th Bureau Engineering Group First Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China;2.School of information engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;3.China Railway City Development and Investment Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: The existing calculation methods for texture depth of asphalt pavements are easily affected by external and human factors. Therefore, a multi-region plane fitting algorithm for the texture depth based on three-dimensional (3D) linear laser data was proposed. The algorithm preprocessed the collected 3D height data matrix of the pavement and derived a slope-based adaptive filtering algorithm for point cloud data. Then, the 3D height matrix was divided into multiple regions, and the local extremum of the center point was determined. Finally, with the three-point and one-surface plane fitting algorithm as the core, the texture depth of asphalt pavements was calculated. The experimental results show that the correlation between this algorithm and the electric sanding method exceeds 94%, and the complexity is 1/3 of the 3D fitting algorithm. The sample acquisition from point to surface is realized.

Keyword: road engineering; asphalt pavement; texture depth; plane fitting; 3D data; linear laser

0 引言

随着中国高等级公路里程数的增加以及车速的普遍提升,部分高寒雨雪路段的路面抗滑性能成为影响交通安全的重要指标,构造深度(Texture Depth, H_{TD})作为表征路表抗滑性能的重要指标^[1-2],

是指一定面积的路表区域,凹凸不平开口空隙的平均深度。然而在中国现行的道路检测标准中,并不将反映路面抗滑性能的构造深度作为一项强制检测指标,致使对该项指标的检测手段明显落后于实际需求。随着公众对交通安全的关注度与日俱增,将构造深度检测列入行业检测标准,为道路建设和养

收稿日期:2023-10-05

基金资助:陕西省地方标准项目(编号:SDBXM 67-2020)

作者简介:朱峰,男,大学本科,高级工程师.E-mail:zhufeng_zt@163.com

*通信作者:冯兴乐,男,博士,教授.E-mail:xfeng@chd.edu.cn

护部门提供技术支持,将是未来的发展方向^[3-4]。

近年来,国内外学者围绕快速无损检测路表构造深度问题,已经取得了部分研究成果,其中最具代表性的为 PSD 法^[5]、数字灰度图像法^[6]、双目相机法^[7]。在这些研究中,普遍的思路是先利用诸如激光、图像、微波等信息技术得到路面的构造高度信息,然后通过数学模型实现高度数据到体积的映射,再推算其构造深度。因此,构建科学合理的数学模型是提高检测精度的关键所在。在众多计算方法中,传统的体积法是用标准砂的已知体积除以摊铺面积得到构造深度^[8],尽管该方法从原理上是科学的,但由于摊铺过程中人为因素的影响,致使精度较低^[9-10]。另一种基于数字灰度图像的数学模型,根据数码相机采集的二维图像像素灰度值,映射为每一个像素点的高度值,从而计算路表的构造深度^[6,11],尽管此法中参与计算的像素点众多,但由于基于自然光的图像采集模式易受背景光强、路面颜色等外部环境的影响,造成图像灰度值不能真实反映路面的高度信息,例如路面的油渍会造成灰度值虚高,影响从灰度值到高度值的转换精度。

目前在路面检测领域,基于激光测距原理的路面激光检测车在测量平整度、车辙、弯沉等路面宏观参数时效果较好^[12],然而在测量构造深度等微观参数时,采用单点激光器随车辆纵向运动,得到较为稀疏的一条离散线激光,根据激光测距原理计算纵向线激光上部分点的高度信息^[13],由于样本点稀少且间隔较远,不能很好地刻画构造深度等微观信息。随着 3D 面阵相机的出现,尤其是相机采样频率的提高,得到某一区域(而非某一线段)密集的高度信息已成为现实。因此,研究基于激光三维面阵高度数据矩阵的构造深度计算方法,是实现高精度三维激光构造深度检测的关键技术。

本文提出的激光三维数据平面拟合算法是在激光三角法的基础上,采用 3D 相机获取路表的三维高度信息数据矩阵,然后对该矩阵进行分块、拟合、求极值等操作,拟合一个虚拟平面,计算被测区域的构造深度。该方法具有激光测距精度高的优点,同时又采用面阵相机,可以改进路面构造信息间断不连续的缺点,对采集样本点实现由点到面的突破,在提高检测效率的同时,又保证了检测精度,还不易受人

数据不仅包含路表点信息,同时也包含路面异物点数据信息^[14]。如果直接利用得到的原始数据点集进行平面拟合,势必会与实际路面存在较大误差。因此,需在数据预处理阶段提出一种基于斜率的数据自适应过滤算法,对数据中的异常点进行滤波,以确保数据的精准度。

1 分区域平面拟合算法

采用激光光源和相机为核心部件的路面微观构造图像采集流程如图 1 所示。通过红外线激光垂直照射待测路面,3D 相机以 45° 倾角斜向捕获反射激光在路表形成的微观构造信息,将激光光源和相机封装为检测模块,并由机械传动装置带动该模块沿路面纵向移动,检测模块每移动 1 mm,就通过编码器触发相机,采集一幅包含横断面的轮廓图像,随着检测模块在滑轨上横向移动,即可得到若干横断面的轮廓图像,将所有时刻的横断面轮廓图像拼接起来,就得到刻画该检测区域全部路面轮廓信息的连续采集图像,即由高度数据矩阵组成的三维点云数据^[15],进而利用相关的计算公式得到该区域的构造深度,并实现路面的三维重构^[16]。需要说明的是,在采集路面微观构造图像时,检测车辆应保持静止状态,否则,车辆振动会导致采集基准面上下抖动。

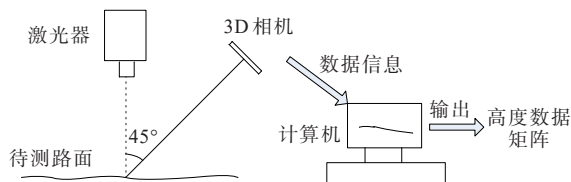


图 1 路面微观构造采集流程示意图

Figure 1 Acquisition process of pavement micro texture

计算机生成 .dat 格式文件的高度数据矩阵如图 2 所示。矩阵内容为待测区域路表测量点与预定基准面的高度差,矩阵数值单位为 mm,其中,横行序号对应于车辆行驶的纵向方向,纵列序号对应车辆行驶的横向方向,根据测试系统设计以及测量前对系统的标定,相邻序号对应路面测量点之间的水平间距为 1 mm。根据激光器和 3D 相机之间的几何关系,去除线激光两端非线性区域,在地面 500 mm×500 mm 的有效视场,对应 3D 相机中 1 000×1 536 的像素点矩阵。

在工程应用中,拟合是通过构建数学模型,建立

若干离散数据和连续函数之间的映射关系,使拟合后的曲线或曲面与已知离散数据相吻合的数据处理过程。其中,线性拟合是将出现间断的线段进行趋势判断后,通过线性方程进行拟合,该方法简便易行,但不适用于集料颗粒表面的非线性特征;如果采

用先横后纵或先纵后横的立体拟合,会割裂路表纹理图像中横行与纵列之间的相关性,失去反映路表三维整体变化趋势的边信息;使用全部像素的数据信息进行三维立体拟合是最理想的拟合方式,但算法在迭代过程中易造成局部收敛,且复杂度较高。

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	154.688 6	154.625 5	154.737 0	154.785 3	154.673 9	154.722 2	154.796 5	154.733 4
2	154.614 3	154.737 0	154.737 0	154.748 2	154.748 2	154.759 4	154.685 1	154.733 4
3	154.651 4	154.699 8	154.662 7	154.636 7	154.748 2	154.759 4	154.685 1	154.733 4
4	154.725 7	154.737 0	154.774 1	154.673 9	154.711 0	154.685 1	154.685 1	154.659 1
5	154.577 1	154.551 2	154.774 1	154.673 9	154.785 3	154.722 2	154.685 1	154.659 1
6	154.651 4	154.662 7	154.737 0	154.748 2	154.636 7	154.647 9	154.685 1	154.696 3
7	154.614 3	154.737 0	154.699 8	154.711 0	154.711 0	154.647 9	154.722 2	154.696 3
8	154.614 3	154.662 7	154.699 8	154.673 9	154.711 0	154.796 5	154.796 5	154.770 6
9	154.577 1	154.625 5	154.625 5	154.636 7	154.599 6	154.722 2	154.722 2	154.659 1
10	154.465 7	154.476 9	154.588 3	154.488 1	154.636 7	154.685 1	154.685 1	154.696 3
11	154.317 1	154.402 6	154.439 7	154.488 1	154.599 6	154.722 2	154.685 1	154.733 4
12	154.391 4	154.439 7	154.402 6	154.562 4	154.599 6	154.722 2	154.722 2	154.622 0
13	154.391 4	154.402 6	154.365 4	154.525 3	154.525 3	154.610 8	154.796 5	154.733 4
14	154.614 3	154.514 1	154.439 7	154.488 1	154.636 7	154.647 9	154.722 2	154.696 3
15	154.800 0	154.551 2	154.588 3	154.673 9	154.711 0	154.647 9	154.685 1	154.733 4
16	154.800 0	154.588 3	154.514 1	154.525 3	154.525 3	154.647 9	154.685 1	154.733 4
17	154.911 5	154.848 4	154.588 3	154.413 8	154.488 1	154.685 1	154.685 1	154.733 4
18	155.022 9	154.848 4	154.588 3	154.525 3	154.599 6	154.685 1	154.685 1	154.733 4

图2 高度数据矩阵(单位:mm)

Figure 2 Height data matrix(unit:mm)

1.1 数据矩阵的预处理

为了提高平面拟合算法的精确性,同时滤除数字图像中的噪声,在将高度信息输入到构造深度数学模型前,对高度数据矩阵进行裁剪和滤波的预处理。

(1) 裁剪

首先,由于激光器发射端为一点,而照射到路面后为一条线,因此路面的线激光光条在边缘部位的线性较差,且由于路表集料颗粒的不规则构造特性,在线激光的两端更容易出现集料颗粒遮挡而导致阴影盲区。为了消除上述外部条件对图像的影响,在处理采集图像时,需要截取激光光条的中心区域。

其次,计算构造深度的目的是定量刻画路表的抗滑性能,即轮胎胎面与路表接触面之间的摩擦系数。在实际车路条件下,胎面与路表之间的接触面积大致为 $50\text{ cm} \times 55\text{ cm}$,对应到成像面的像素点区

域约为 600×700 。因此将 $1\,000 \times 1\,536$ 的像素点数据矩阵裁剪为 600×700 ,以接触面范围作为计算构造深度的样本区域既是可行的,也可以降低复杂度。

(2) 滤波

在实际图像采集过程中,由于沥青路面自身的构造特性,当线激光垂直照射路表时,易发生漫反射、散射现象,加之周围背景光的随机干扰,采集图像会出现光强分布不均、线条间断以及孤点噪声等现象^[13-14],故应对裁剪后的数据矩阵进行滤波处理,以减少上述因素对于计算精度的影响。因此本节提出一种基于斜率的点云数据自适应滤波算法。

1.1.1 滤波思想

对于相邻的地表点,两点之间连线的斜率一般都很小(在阈值范围内)。但当路面存在异常点时,路表点与路面异物点连线的斜率就会出现逐渐变大

再变小的基本趋势,此时,若该点与前一点的高度差超过事先设定的阈值,就将该点的高度值用阈值来代替。图3为斜率判断异常点示意。

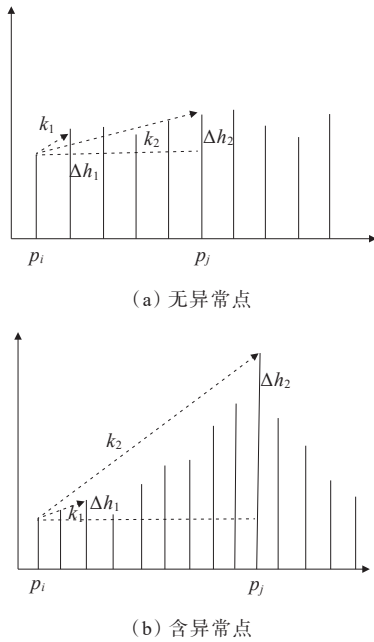


图3 斜率判断异常点

Figure 3 Slope-based outlier determination

由图3(a)可知: p_i 点与比较范围内的其他点连线的斜率 k_1, k_2 相差很小,且均在一定阈值范围内,因此图3(a)中的数据无需进行处理。从图3(b)可以看出:基准点与异常点连线的斜率 k_2 相比正常数据连线的斜率 k_1 大很多,这时就要将 p_j 处的高度值用阈值进行代替。

1.1.2 阈值与比较范围的确定

假设异常点的坐标值为 (i, j) ,则阈值 T 由公式(1)确定:

$$T = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j f(x, y) \quad (1)$$

此处采用行和列方向逐点滤波的方法,所以该点左右以及左上角三个位置的坐标已经过滤波处理,再对上式求平均值,即可用其作为阈值 T 进行处理。这样选取的好处是每次比较时选取的阈值均随基准点改变,实现了自适应滤波,能够保证计算精度。

沥青混合料的最大公称粒径越大,集料之间支点(接触点)相对较多,易形成骨架,沥青混合料预留的空隙较多,混合料表面易形成较大的构造深度。由此根据该区域所用集料的粒径大小设定比较范

围,主要处理小于粒径大小的异常点。设置比较范围如式(2)所示,其中筛分粒径大小为16.0 mm、13.2 mm、9.5 mm、4.75 mm、2.36 mm、1.18 mm、0.6 mm、0.3 mm、0.15 mm、0.075 mm,而激光扫描得到的三维数据点集中,相邻路面测量点之间的水平间距为1 mm。

$$\text{比较点数} = \frac{\text{路面集料筛分粒径(mm)}}{\text{相邻测量点水平间距(mm)}} + \Delta n \quad (2)$$

式中: Δn 为10以内的任意整数,其目的是放大比较范围,提高精度。例如,路面所用集料粒径为16.0 mm,可将比较范围定为20个点,以减少分类误差、保证精度、降低数据运算量。

1.1.3 滤波算法

滤波算法的基本流程如图4所示。

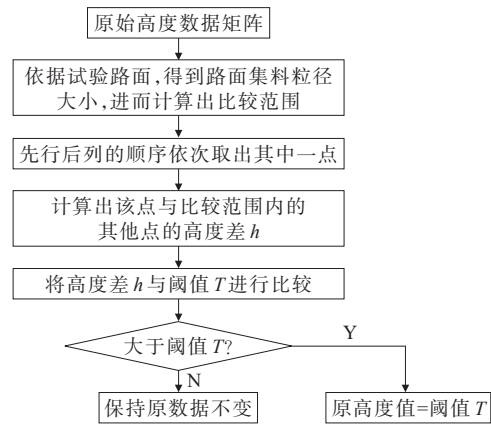


图4 滤波算法流程图

Figure 4 Flow of filtering algorithm

具体的处理步骤为:

(1) 扫描得到的高度数据矩阵是 1000×1536 大小的三维坐标值,根据测量结果,轮胎与路面的接触面积为 $15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 。实验室扫描的路面面积约为 $50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,可将待测路面分为4块 $O_k, k \in [1, 2, 3, 4]$ 进行处理^[17]。

(2) 取 O_k 的第一行(或第一列)数据,利用莱茵达准则^[15]判断点 $(1, 1)$ 的高度值是否为异常数据,如是,则用中位数代替,否则保持不变。

(3) 分别计算点 (i, j) 与点 $(i, j+1), (i, j+2)$ 连线斜率的大小;具体的比较点数由沥青路面所用粒径大小决定,故需提前清楚路面的构造情况。如出现斜率大于阈值的情况,则记下该点的列标号 m ,继续计算该点与该行后边点的斜率,直到出现斜率值再次小于阈值为止,同时记下此时的列号 n 。列方向

也进行类似操作。

(4) 将点 (i, m) 与点 (i, n) 之间的所有点的高度数据用阈值代替。

(5) 对点 $(i, j+1)$ 进行相同方式处理,直到该块区域内的所有数据均处理完毕。

1.2 数据矩阵的拟合与计算

对高度数据矩阵进行裁剪和滤波预处理后,根据分区域拟合数学模型计算构造深度,算法流程图见图5。

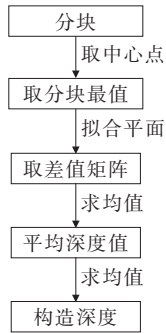


图5 构造深度算法流程图

Figure 5 Flow of algorithm for texture depth

(1) 将预处理后的数据矩阵 I 导入 Matlab 中,将对应的检测视场区域分为大小均匀的4小块 $O_k, k \in [1, 2, 3, 4]$,依次确定四小块的中心点及其坐标位置,其三维重构示意图如图6所示。其中水平两个方向为像素点编号;垂直方向为测量点与基准面的高度差。

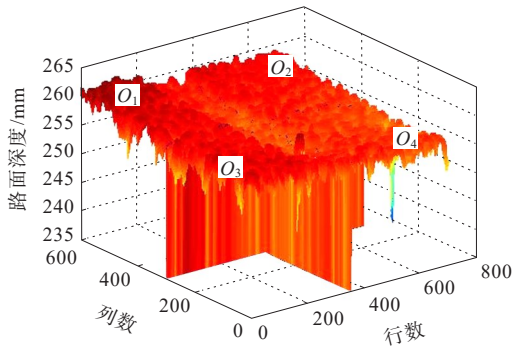


图6 分块模拟示意图

Figure 6 Multi-region simulation

(2) 分别将4小块矩阵 O_k 的数据赋值给临时矩阵 Z ,通过矩阵极值函数 $\max(\max(Z))$ 可得数据矩阵 O_k 小块的最大值 $M[k]$ 。

for(int $k=1$; $k \leq 5$; $k++$) //将数据矩阵分为4块

```

{
    Z=O[round(k/4)*300+1:(round(k/4)+1)*
    300,mod(k,2)*350+1:mod(k,2)*350+350]
    M[k]=max(max(Z)) //矩阵极值
}

```

上述代码中 $\text{round}()$ 函数表示执行四舍五入运算。

(3) 通过“三点确定一个平面”的原理,在 $M[k]$ 中任意选取3个极值点,利用 fitting_plane 函数构建由3个散点拟合后的空间任意平面 S_k 。

$$[A, B, C] = \text{fitting_plane}(\text{points}) \quad (3)$$

式中: A, B, C 为空间任意平面 S_k 的一般表达式 $Ax + By + Cz + 1 = 0$ 中的各项系数; points 为从 $M[k]$ 中任选3个极值点组成的 3×3 维矩阵。

(4) 用拟合平面 S_k 对应的数值减去原始高度数据矩阵 I ,求得绝对值,可得相对深度数据矩阵 η_k ,即: $|\text{拟合平面} S_k - \text{原始矩阵} I| = \text{相对矩阵} \eta_k$ 。

η_k 矩阵中的各元素值的实质是原始矩阵 I 中的各测量点绝对高度值相对于拟合基准面 S_k 中对应坐标位置的相对距离, η_k 的维数仍然为 600×700 。

(5) 对 η_k 按行和按列取均值后,可得测量区域相对于本次拟合基准面 S_k 的平均深度值 $\gamma_k = \text{mean}(\text{mean}(\eta_k))$,此处 γ_k 为标量。当 k 在 $[1, 2, 3, 4]$ 集合中取值时,可以得到平均深度值。

(6) 进一步,对同一个测量区域,相对于4个不同拟合立体拟合 S_k 得到的4个平均深度值 γ_k 求平均值,可得检测区域的构造深度值,即: $H_{TD} = \text{mean}(\gamma_k)$ 。

2 数据分析

2.1 相关性分析

为了验证算法的有效性和普适性,分别采用电动铺砂仪(简称:铺砂仪)和本算法的激光构造深度检测仪(简称:激光仪),对同一沥青试件在平放和倾斜两种条件下测定构造深度,计算两种算法的离散方差以及两种方法的相关系数,以确定本算法的测量离散度。由于在测量构造深度过程中,没有绝对标准值,因此,基于不同测试原理的测量结果必然存在差异,且难以认定真实值,本文假定铺砂仪测量结果为真实值,激光仪测量结果为测量值。

试验对象为5块沥青试件,试验手段为铺砂仪和

激光仪两种方法,在试件水平放置或倾斜 15°条件下测量其构造深度结果,如表 1 所示。

由于铺砂仪在试验后不能完全将缝隙中的标准砂清除,故只能进行 3 次试验获得平均值;而激光仪

可以重复试验,本文以矩形试件的中心点为中心,分别进行 0°、45°、90°、135°顺时针旋转,每个角度测量 3 次构造深度,对同一试件进行 12 次测试,取其平均值,再计算多次测量值的标准差。

表 1 试件水平与倾斜放置测量结果

Table 1 Measurement results of horizontal and inclined samples

试件 编号	铺砂仪构造深度/mm		铺砂仪测量标准差/mm		激光仪构造深度/mm		激光仪测量标准差/mm	
	水平	倾斜	水平	倾斜	水平	倾斜	水平	倾斜
1	2.42	2.42	0.162 8	0.189 8	2.812 8	2.994 7	0.112 8	0.120 2
2	2.38	2.38	0.137 7	0.151 7	2.156 1	2.413 4	0.104 9	0.108 8
3	1.73	1.73	0.126 5	0.143 5	1.954 2	2.105 8	0.102 4	0.110 5
4	2.36	2.36	0.194 2	0.193 3	2.467 0	2.753 8	0.122 7	0.121 3
5	0.93	0.93	0.117 7	0.123 7	1.012 7	1.194 2	0.078 3	0.083 6
平均标准差	—	—	0.147 8	0.160 4	—	—	0.104 2	0.108 9

为验证算法精确性,利用数理统计学原理,对两种方法测得的结果进行相关性分析^[18]。

表 1 中试件平放条件下两种方法所得测量结果的相关系数为 0.942 9;试件倾斜 15°时,相关系数为 0.960 1,因此,通过激光仪与铺砂仪测得的结果呈现明显的正相关性。此外,相较于铺砂仪,激光仪得到的平均标准差更小,可进一步减少铺砂仪在人工操作过程中带来的主观因素的影响。

2.2 复杂度分析

本节通过算法的运算时间来比较并衡量实现复杂度。尽管分区域平面拟合的复杂度明显高于线性拟合,但线性拟合并不适合横纵纹理交错的待测沥青路面构造区域,因此本节重点比较分区域平面拟合和立体拟合。

假设数据矩阵尺寸 $C=600 \times 700$,每一处理矩形区域为 3×3 区域。在三维立体拟合中,复杂度取决于数据矩阵尺寸与每一处理矩形区域处理时间的乘积,数据矩阵 600×700 个像素点均为拟合对象,计算复杂度为 $T_1=600 \times 700 \times 3 \times 3=3.78 \times 10^6$ 次。而本文提出的分区域平面拟合算法只需确定 4 个最大值,复杂度为 $T_2=300 \times 350 \times 4 \times 3=1.26 \times 10^6$ 次。复杂度为立体拟合的 $1/3$ 。更重要的是,本算法基本保留了沥青路面横纵纹理交错的数据属性,计算结果和立体拟合基本持平。

3 结语

本文将平面拟合的数据处理方式应用于沥青路

面构造深度的计算中,并提出分区域拟合算法。通过裁剪、自适应滤波对路表采集图像进行预处理,进而利用分区域计算降低算法复杂度。经试验数据分析,采用本算法的激光检测仪与电动铺砂仪在计算沥青路面构造深度的数据具有 94% 以上的关联性,且具有更低的数值标准差,算法复杂度为立体拟合的 $1/3$ 。本算法适合于车载激光检测仪在静止状态下对路表构造深度的测量计算,也可供其他三维激光路面检测的参数计算。对于车辆行驶过程中的测量,可采用差分测量消除车辆震动对测量基准面的影响。

参考文献:

References:

- [1] 李伟,孙朝云,呼延菊,等.基于激光 3D 数据的沥青路面构造深度检测方法[J].中外公路,2016,36(5):9-12.
LI Wei,SUN Zhaoyun,HUYAN Ju,et al.Detection method of asphalt pavement structure depth based on laser 3D data [J].Journal of China & Foreign Highway,2016,36(5):9-12.
- [2] 周兴林,蒋难得,肖旺新,等.基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法[J].中国公路学报,2014,27(3):11-16.
ZHOU Xinglin,JIANG Nande,XIAO Wangxin,et al.Measurement method for mean texture depth of asphalt pavement based on laser vision[J].China Journal of Highway and Transport,2014,27(3):11-16.
- [3] 窦光武.基于断面高程的路面构造深度计算模型研究[J].公路交通科技,2015,32(1):50-56.
DOU Guangwu. Research of calculation model of pavement texture depth based on profile elevation[J].

- Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(1): 50-56.
- [4] 贾国杰, 杨碧宇, 王俊喆, 等. 我国与发达国家公路路面技术状况评价指标体系比较研究[J]. 交通运输研究, 2021, 7(4): 105-113.
- JIA Guojie, YANG Biyu, WANG Junzhe, et al. Comparative study on evaluation index system of highway pavement condition between China and developed countries[J]. Transport Research, 2021, 7(4): 105-113.
- [5] 赵祥模, 马荣贵, 施维颖. 基于PSD的路面粗糙度快速检测方法研究[J]. 光电子技术与信息, 2004(2): 58-60.
- ZHAO Xiangmo, MA Ronggui, SHI Weiyang. A study of the fast-testing method for road surface roughness with PSD[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2004(2): 58-60.
- [6] 王端宜, 李维杰, 张肖宁. 用数字图像技术评价和测量沥青路面构造深度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 42-45.
- WANG Duanyi, LI Weijie, ZHANG Xiaoning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2004, 32(2): 42-45.
- [7] CIGADA A, MANCOSU F, MANZONI S, et al. Laser-triangulation device for in-line measurement of road texture at medium and high speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(7): 2225-2234.
- [8] 文静. 数字化技术评价沥青路面构造深度研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- WEN Jing. Study on evaluating texture depth of asphalt pavement with digital technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [9] 丁世海, 阳恩慧, 王彬平, 等. 沥青路面表面纹理三维高精度激光非接触式检测[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 758-764.
- DING Shihai, YANG Enhui, WANG Chenping, et al. Three-dimensional high-precision laser non-contact detection of asphalt pavement surface texture[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 758-764.
- [10] 黄志勇, 陈搏, 李伟雄, 等. 沥青路面的线激光测量方法及构造深度[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 252-258.
- HUANG Zhiyong, CHEN Bo, LI Weixiong, et al. Line laser measurement method and texture depth of asphalt pavement[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 252-258.
- [11] THOMAS F. Statistical approach to road segmentation[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(3): 300-308.
- [12] 张向阳, 钟棉卿. 车载激光扫描技术在路况检测中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2021(15): 66-67.
- ZHANG Xiangyang, ZHONG Mianqing. Application of vehicle-mounted laser scanning technology in road condition detection[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(15): 66-67.
- [13] TAKEDA H, FARSIU S, MILANFAR P. Kernel regression for image processing and reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2007, 16(2): 349-366.
- [14] 杨三强, 孙爽, 李倩, 等. 胶粉改性沥青混合料动荷载力学响应分析[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 227-233.
- YANG Sanqiang, SUN Shuang, LI Qian, et al. Dynamic load response analysis of rubber powder modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 227-233.
- [15] 冯兴乐, 孙瑞宁, 李伟, 等. 斜率渐变的图像断点插值算法[J]. 激光杂志, 2013, 34(4): 28-30.
- FENG Xingle, SUN Ruining, LI Wei, et al. Image breakpoint interpolation algorithm based on the smooth gradient[J]. Laser Journal, 2013, 34(4): 28-30.
- [16] 冯兴乐, 徐花艳, 李伟, 等. 沥青路面结构光条质心定位算法[J]. 光电子激光, 2014, 25(3): 514-520.
- FENG Xingle, XU Huayan, LI Wei, et al. Centroid position algorithm of structure optical stripe in asphalt pavement test [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(3): 514-520.
- [17] 赵毅, 杨旋, 郝增恒, 等. 沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23): 23088-23099.
- ZHAO Yi, YANG Xuan, HAO Zengheng, et al. Research progress on digital image evaluation method of homogeneity of asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2020, 34(23): 23088-23099.
- [18] 何平. 剔除测量数据中异常值的若干方法[J]. 航空计量技术, 1995, 15(1): 19-22.
- HE Ping. Some methods of deleting inordinate values from measuring data[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1995, 15(1): 19-22.