

基于三维激光技术的路面坑槽多维度指标检测

惠冰^{1,2}, 郭牧¹, 王洲¹, 蔡宜长^{1,3}

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 中交通力建设股份有限公司, 陕西西安 710075;
3. 佐治亚理工学院土木环境工程系, 佐治亚州亚特兰大 30314, 美国)

摘要: 为实现沥青路面坑槽深度、面积和体积等多维度指标的自动、准确检测, 利用三维激光技术对室内坑槽模型进行扫描, 基于 Matlab 软件对激光点云数据采用不规则三角网(TIN)平面插值法重构了坑槽三维模型, 进而结合等高线提取确定了坑槽边界, 实现了坑槽多维度指标自动计算; 对比了不同坑槽多维度指标计算误差, 研究了激光线纵向间距对计算误差影响规律。研究表明: 坑槽深度、面积和体积指标的最大相对误差分别为 3.96%、4.58% 和 4.74%; 当激光线纵向间距从 1 mm 逐渐增大至 20 mm 时, 坑槽多维度指标计算相对误差逐渐增加; 当间距为 5 mm 时, 坑槽深度、面积和体积指标的最大相对误差分别为 4.65%、6.32% 和 7.17%; 当间距大于 5 mm 后, 坑槽三维重构模型逐渐失真并出现了部分缺失, 从而导致多维度指标检测误差的增大; 因此, 为保证坑槽多维度指标检测准确度建议激光线纵向间距应不大于 5 mm; 坑槽多维度指标准确获取将为路面破损层位判定、严重程度评价和修补材料估算提供依据。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 三维激光技术; 坑槽; 多维度指标

中图分类号: U418.2

文献标志码: A

Multi-dimensional Index Detection of Potholes Based on 3D Laser Technology

HUI Bing^{1,2}, GUO Mu¹, WANG Zhou¹, Tsai Yichang^{1,3}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Communications Tongli Construction Co. Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Georgia Institute of Technology School of Civil and Environmental Engineering, Georgia, Atlanta, 30314, America)

Abstract: In order to automatically and accurately achieve multi-dimensional indexes such as depth, area and volume of the asphalt pavement pothole, the advanced three-dimensional line laser technology was used to scan indoor potholes with different sizes. The laser point cloud data collected was

processed using the triangulated irregular network (TIN) plane interpolation method by Matlab software and was used to reconstruct the three-dimensional pothole model. Combined with contour extraction method, the pothole border was identified and multi-dimensional indexes of pothole were automatically calculated. The relative error of different pothole multi-dimensional indexes was compared and the effect of laser's longitudinal spacing on relative error was studied. The results show that the maximum relative error of the pothole depth, area and volume are 3.96%, 4.58% and 4.74%, respectively. The relative error of pothole multi-dimensional index decreases with the increases of pothole size. When laser's longitudinal spacing increases from 5 mm to 20 mm, the relative error of pothole multi-dimensional index increases by degrees. The maximum relative error of pothole depth, area and volume are 4.65%, 6.32% and 7.17%, respectively, when spacing is 5 mm. The relative error of pothole multi-dimensional indexes increases significantly when spacing becomes larger than 5 mm. Therefore, to insure the accuracy of multi-dimensional index detection, it is suggested that laser's longitudinal spacing is less than 5 mm. The method of pothole multi-dimensional index accurately provides foundation for the pavement structural layers identification of damage distribution, evaluation of distress severity and estimation of materials rehabilitation.

Key words: road engineering; asphalt pavement; three-dimensional line laser technology; pothole; multi-dimensional index

沥青路面坑槽不仅直接影响行车的舒适性和安全性, 还严重影响路面使用寿命^[1-3]。快速、准确的坑槽检测结果是路面破损状况科学评价的基础, 是确定养护措施与时机的重要依据^[4-6]。国省干线路面破

收稿日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51508034); 陕西省交通运输科技项目(12-15K); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM5130); 内蒙古自治区交通运输科技项目(NJ-2015-31)

第一作者: 惠冰(1982—), 男, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为道路检测与养护管理。E-mail: huibing323@qq.com

损定期检测主要采用视频或图像识别技术进行路面坑槽检测与评价,通过对像素点处理后的灰度差异识别坑槽面积,但路表颜色、像素、天气光线等因素均会影响自动识别速度与准确度^[7-10].因此,为保证检测的准确性,目前普遍由技术人员依据经验或病害手册,对路面图像中的坑槽范围进行人工描绘,这种方法的识别效率低^[11-12],并且仅能获取坑槽的面积指标,无法准确掌握深度或体积等多维度信息.

为了实现路面坑槽多维度指标的自动、准确提取,Zhang等^[13]和Chan等^[14]分别采用立体视觉相机获取路表面的视差值,通过表面拟合实现三维重构,进而计算坑槽面积和体积指标;Jog等^[15]利用密集重建算法进行坑槽三维重构,通过计算坑槽宽度与深度指标进行严重程度识别;He等^[16]提出了一种通过三维投影变换原理计算坑槽纵断面最大深度的方法.但是,受路表面不规则纹理和颜色的影响,基于立体图像的坑槽多维度指标计算的准确性和可靠性有待进一步提高.随着激光检测技术逐步应用于路面检测,Chang等^[17]采用静态激光设备提取路表纹理结构特征,结合聚类算法计算坑槽面积;Li等^[18]采用三维激光技术获取的坑槽横断面数据,计算最大隆起与凹陷点高差用以确定坑槽最大深度;Li Feng^[19]利用三维激光设备对碗状光滑模具进行检测,计算了模具的深度、宽度和体积指标.上述研究表明三维激光技术具有获取坑槽面积、深度、宽度或体积等多维度指标的可行性,但现有成果未解决坑槽三维模型建立过程中沥青混合料表面纹理所导致的激光点云数据不完整或不均匀问题,同时未提出准确、有效的坑槽多维度指标自动提取算法.

本文针对坑槽三维模型的建立与多维度指标的自动计算等问题,利用三维激光检测技术获取的室内坑槽模型表面激光点云数据,提出了不规则三角

网(triangulated irregular network, TIN)表面插值法结合等高线提取方法建立坑槽三维模型并编译程序自动计算深度、面积和体积等多维度指标,在此基础上分析了激光线纵向间距对坑槽多维度指标检测精度的影响.研究结果可为路面坑槽损伤层位判定、严重程度判别和修补材料估算提供依据.

1 三维激光检测原理与设备

1.1 检测原理

三维激光检测技术基于三角法原理,由一个激光发射器和一个包含电耦合装置(charge coupled device, CDD)传感器的数字照相机组成.采集数据时,激光发射器向扫描对象表面发出激光线,照相机以图像的方式获取激光线.然后,应用次像素峰值检测算法来分析激光图像,找到激光次像素的位置,将激光的形变转化为物体表面的形变.根据三角测量原理,凹槽的深度 h 可以通过下式计算:

$$h = \frac{ah'}{b \sin \theta - h' \cos \theta}$$

式中: a 为激光器与被测物体表面虚拟交点至透镜的距离; b 为透镜至CCD感光面间的距离; θ 为激光束法线与成像镜头光轴的夹角; h' 为像点在成像面上的位移; h 为被测物体表面凹槽深度.

1.2 检测设备

本文采用的室内三维激光检测系统由两部分组成:①是Gocator 2380型三维激光发射器,其性能参数见表1;②是长宽高为2.5 m×1.5 m×2.0 m的铝合金架,三维激光发射器可沿横梁进行往复运动,且横梁的高度可在1.0~2.0 m内调节.为了保证室内三维激光检测精度,试验设备架设高度为1.5 m,有效视场约为900 mm,见图1.

表1 Gocator 2380 智能传感器性能参数

Tab.1 Specification of Gocator 2380 intelligent sensor

产品型号	轮廓线点数	Z方向线性度/%	Z方向分辨率/mm	X方向分辨率/mm	Z方向重复性/ μm	测量范围/mm	视场范围/mm	扫描触发频率/Hz
Gocator 2380	1 280	0.04	0.092~0.488	0.375~1.100	12	800	390~1 260	170~5 000

1.3 坑槽多维度指标计算方法

通过三维激光检测系统扫描室内坑槽模型,获取激光点云数据,采用Matlab软件对点云数据TIN插值和均值滤波处理,再基于Sobel边缘检测算法识别病害区域,分割点云并提取病害区域数据,生成网格化的坑槽三维重构模型;利用高程二值化识别坑槽上、下闭合轮廓线,计算坑槽的深度,面积,体积

指标,各指标具体计算步骤如下:

(1)等高线提取坑槽三维重构模型中的数据,提取间距为5 mm,受沥青混合料表面纹理影响,同一高程平面可能得到若干相邻数据点连成的闭合轮廓线,提取高程平面中闭合面积最大的等高线为该高程平面的坑槽边界线,对上下边界线间的点云数据等间距提取等高线边界.

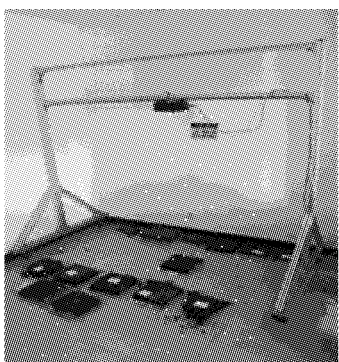


图 1 室内三维激光检测系统

Fig.1 Indoor 3D laser detection system

(2)将高程最大的坑槽边界线所在平面称为坑槽上表面,同理将高程最低的坑槽边界线所在平面称为坑槽下表面,见图 2. 上下表面的高差,即为坑槽的最大深度:

$$\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$$

式中: H_{\max} 为坑槽上表面的高程; H_{\min} 为坑槽下表面的高程; ΔH 为坑槽最大深度.

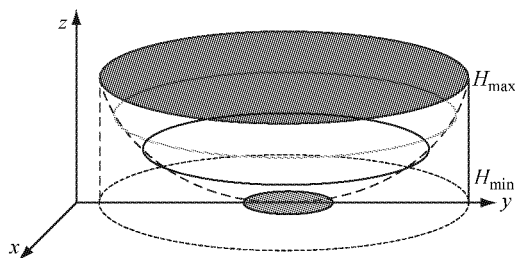


图 2 坑槽深度计算示意

Fig.2 Depth of potholes computation

(3)映射各坑槽边界线到 XOY 平面,图 3 中虚线为坑槽边界线,所围成的面积即为坑槽面积.沿 X 轴划分图形为 n 个高度相同的近似梯形,积分计算坑槽面积 S :

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta X (Y_i + Y_{i-1})$$

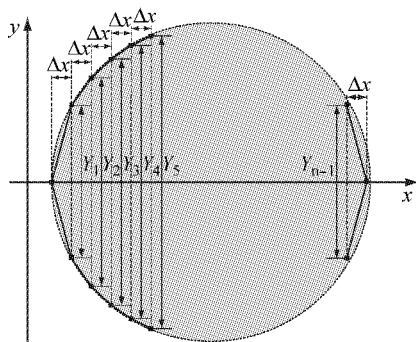


图 3 坑槽面积计算示意

Fig.3 Area of potholes computation

式中: ΔX 为梯形的高度; Y_{i-1}, Y_i 分别为梯形的上底与下底; ΔS_i 为每个梯形的面积.

(4)如图 4 所示,各高程平面下的坑槽面积沿 Z 方向积分计算坑槽体积 V :

$$V = \sum_{j=1}^m \Delta V_j = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \Delta Z (S_j + S_{j-1})$$

式中: ΔZ 为相邻两平面间的距离; S_j, S_{j-1} 分别为相邻上、下平面的面积; ΔV_j 为相邻两平面间的体积.

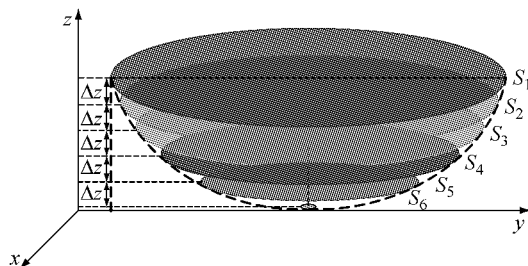


图 4 坑槽体积计算示意

Fig.4 Volume of potholes computation

通过上述的步骤(1)~(4)即可由三维激光检测点云数据构建的坑槽三维重构模型,计算坑槽病害的深度、面积、体积多维度指标.

2 试验结果与分析

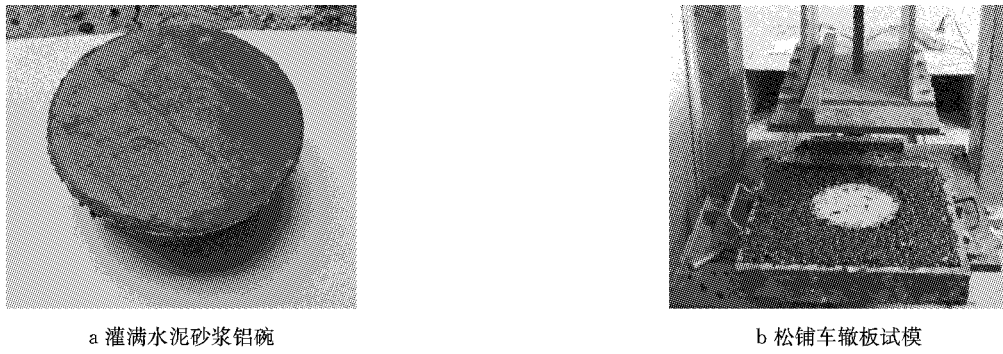
2.1 室内坑槽模型制作

室内坑槽模型参照《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的轮碾法制作:①在铝碗中灌满水泥砂浆模拟坑槽,见图 5a 所示;②将最佳油石比为 4.3% 的 AC-13 级配充分拌合均匀后松铺在 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的车辙板试模中,待铝碗中水泥砂浆凝固后,以开口向上的方向埋入沥青混合料松铺试模中,见图 5b 所示;③将埋入铝碗的松铺车辙板试模放入预热后的轮碾成型机中进行往返压实成型;④将成型试模中的铝碗取出后得到沥青路面室内坑槽模型.

本文制作了两个不同尺寸的室内坑槽模型,分别采用 0.01 mm 精度游标卡尺、标准计算纸拓印坑槽上表面轮廓、铺沙法等人工方法量测坑槽的深度、面积和体积指标,如图 6 所示,用以验证三维激光技术与多维度指标提取算法的精度.

2.2 试验结果与误差分析

将坑槽模型放置三维激光发射器下方,设定仪器参数的移动速度为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,曝光值为 1 200 us,发射频率为最大值 788. 289 Hz;设定基准平面后开始检测,待完成一个行程的检测后,复位系统准备

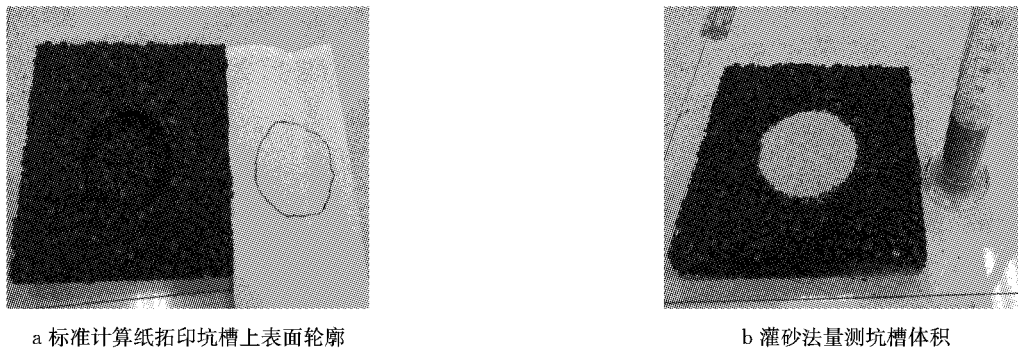


a 灌满水泥砂浆铝碗

b 松铺车辙板试模

图 5 室内坑槽模型制作

Fig.5 Procedure of forming potholes indoor model



a 标准计算纸拓印坑槽上表面轮廓

b 灌砂法量测坑槽体积

图 6 室内坑槽模型多维度指标人工量测

Fig.6 Manual measurement of the potholes indoor model

下一次检测. 为防止激光点缺失导致的重构坑槽三维模型失真, 本文采用缺失点验算激光点云数据有效性, 即当激光点云数据缺失率小于 1% 时, 即可认为进行了一次有效检测^[19].

三维激光发射器输出的室内坑槽部分原始数据, 如表 2 所示. 第一行为激光各点的横坐标, 从表中可以看出激光左、右端点的坐标分别为 -296.17

和 300.57, 即有效检测宽度约 600 mm, 激光点与点之间间距约为 0.5 mm; 第一列为激光线沿检测前进方向的纵向间距, 可以看出纵坐标起、终点分别为 0 和 998.29, 表明有效检测长度为 998.29 mm, 激光线的纵向间距约为 1 mm; 其余部分表示相对应的 (x, y) 点的 Z 坐标, 即高程数据.

表 2 室内坑槽检测部分原始数据

Tab.2 Original data of the pothole model

Y/mm	X/mm							
	-296.17	-295.62	...	-0.27	0.27	...	300.02	300.57
0	-9.23	-9.33	...	-9.76	-9.64	...	-0.37	-0.24
1.04	-8.95	-8.99	...	-9.95	-9.88	...	0.12	0.09
...
997.24	-6.44	-6.54	...	-8.95	-8.95	...	-2.38	-2.13
998.29	-6.85	-6.91	...	-8.64	-8.71	...	-2.17	-2.01

基于 Matlab2015a 软件平台开发的坑槽多维度指标计算程序中, 将激光点云数据输入经 TIN 平面插值后重构坑槽三维模型, 检测结果见图 7. 在此基础上, 采用 contour3(X, Y, Z) 提取等高线后进行坑槽多维度指标计算, 分别见图 8 和图 9.

为排除三维激光设备受光照强度、温湿度等环境因素的影响, 保证试验的可重复性与准确性, 采用室内三维激光检测系统(图 2), 激光线纵向间距设定

为 1 mm, 在早、中和晚三个时间段分别对相同架设高度、曝光值的室内坑槽模型进行 3 次重复检测, 重构坑槽三维模型并计算多维度指标, 检测结果见表 3.

由表 3 可知, 对于坑槽 1#, 其深度、面积、体积检测的标准差分别为 0.03、1.30、1.25, 相比于坑槽 2#, 其深度、面积、体积检测的标准差分别为 0.05、1.35、1.20, 表明坑槽检测结构离散程度非常小, 三

表 3 坑槽多维度指标检测结果

Tab.3 Results of the pothole multi-dimensional index detection

	坑槽 1#			坑槽 2#			
	深度/cm	面积/cm ²	体积/cm ³	深度/cm	面积/cm ²	体积/cm ³	
人工量测	2.44	128.35	308.53	4.05	182.14	537.82	
三维激光检测	1	2.35	124.13	295.65	3.96	172.49	513.54
	2	2.31	122.74	293.19	3.87	173.80	511.12
	3	2.37	121.53	294.32	3.88	175.14	512.45
标准差	0.03	1.30	1.25	0.05	1.35	1.20	
平均值	2.34	122.77	294.33	3.90	173.77	512.33	
绝对误差	0.10	5.53	14.17	0.15	8.33	25.47	
相对误差/%	3.96	4.31	4.59	3.62	4.58	4.74	

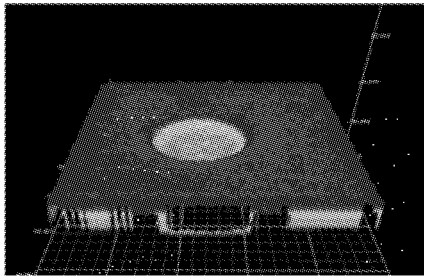


图 7 坑槽激光点云数据

Fig.7 Laser points data of potholes

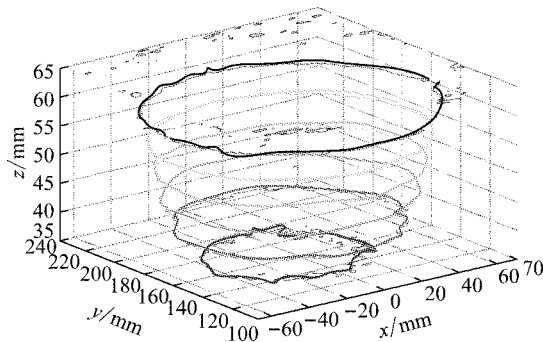


图 8 等高线提取

Fig.8 Contour lines extraction

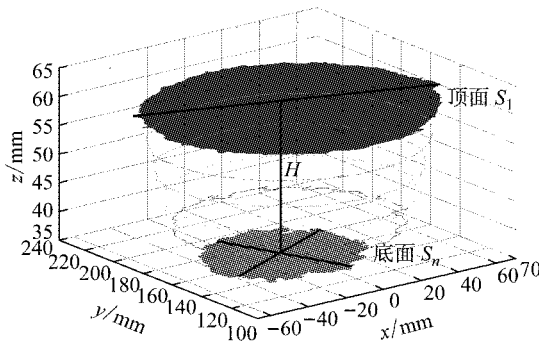


图 9 多维度指标计算

Fig.9 Multi-dimensional value computation

维激光技术对坑槽多维度指标检测的重复性高;与室内人工检测结果相比,对于坑槽 1# 和 2#,其深度检测绝对误差分别为 0.1 cm 和 0.15 cm,相对误差分别为 3.96%和 3.62%,这是由于三维激光具有高

精度、高密度技术特性,其误差主要是沥青混合料构造深度导致;坑槽面积检测绝对误差分别为 5.53 cm² 和 8.33 cm²,相对误差分别为 4.31%和4.58%;坑槽体积绝对误差分别为 14.17 cm³ 和 25.47 cm³,相对误差分别为 4.59%和 4.74%;面积和体积相对误差大于深度指标,这是由于采用近似梯形积分方法,将小单元结果累加计算所产生的误差累积.检测结果表明了三维激光技术对坑槽多维度指标检测具有较高的准确性和可重复性;上述结果将为有效指导路面坑槽养护的修补面积、最大深度和修补体积指标的准确计算提供参考.

2.3 激光线纵向间距影响分析

激光线纵向间距是通过动态发射器根据车轮转动控制的重要可调节参数之一,纵向间距越小所获取的单位面积内路表点云数据量越大,病害描述越细密;若激光线纵向间距过小,不仅会增加数据存储空间,还会影响后续数据处理效率;因此,合理的激光线纵向间距是提高检测效率的重要参数.

本文为研究不同激光线纵向间距对坑槽三维模型重构与指标计算精度影响,在图 7 坑槽三维模型重构时采用 1 mm 间距基础上,分别增加了 5、10 和 20 mm 三个不同纵向间距参数,重复扫描并构建了不同激光线纵向间距下坑槽的三维模型,见图 10.

从图 10 可以看出,当激光线间距为 1 mm 时,坑槽三维模型较细密,具有近乎真实的坑槽形态;当激光线间距为 20 mm 时,坑槽三维模型出现部分缺失.随着激光线纵向间距不断增大,坑槽三维模型逐渐失真并出现了部分缺失,从而导致多维度指标检测误差的增大.不同激光线纵向间距对坑槽多维度指标检测误差影响,见图 11.

从图 11 可以看出,随着激光线纵向间距的不断增大,坑槽的深度、面积和体积指标的检测相对误差均逐渐增大.当激光线间距为 1 mm 时,坑槽 1 和 2 的深度相对误差分别为 3.96%和 3.62%,面积误差分别为 4.31%和 4.58%,体积误差分别 4.59%和

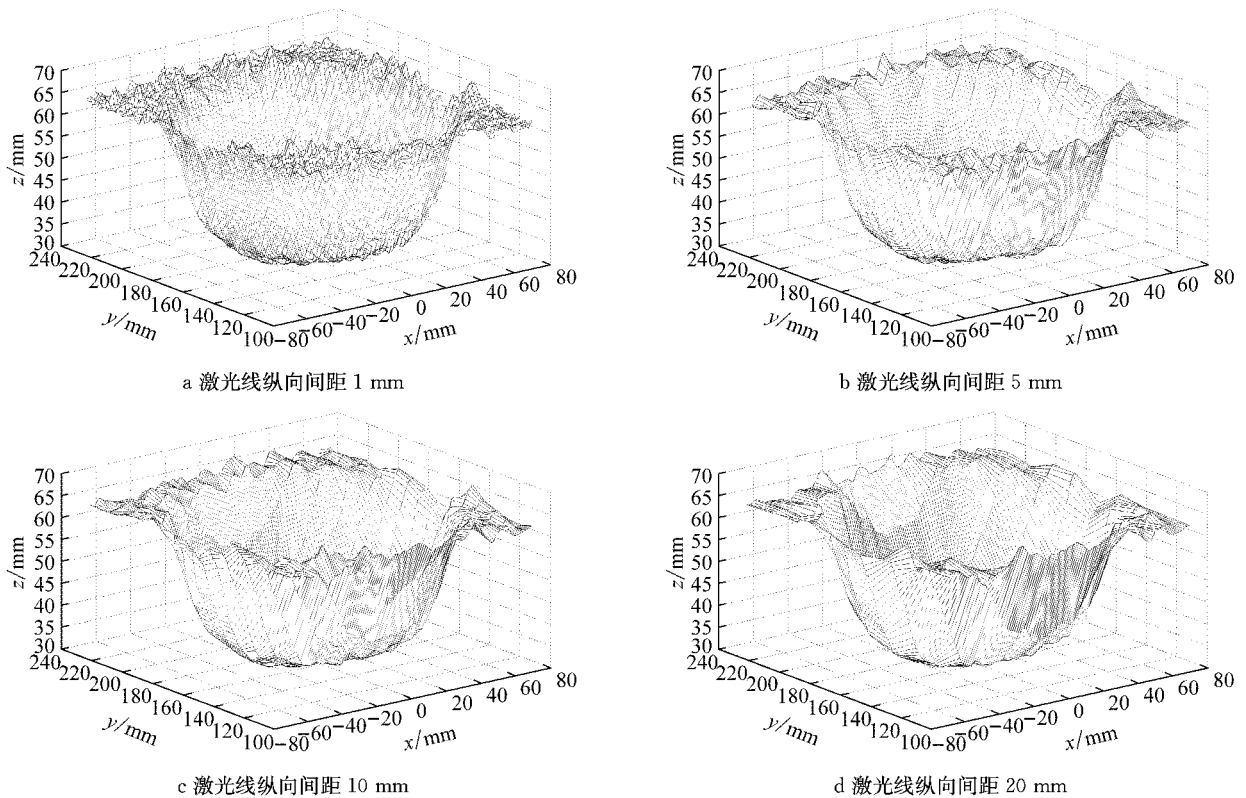


图 10 不同激光线纵向间距下的坑槽三维重构模型

Fig.10 3D Reconstruction of the potholes with different longitudinal spacing

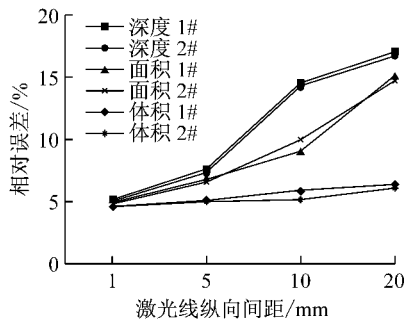


图 11 纵向间距对坑槽指标检测相对误差的影响

Fig.11 Effect of longitudinal spacing on relative error of potholes indexes detection

4.74%；当激光线间距增大为 5 mm 时，两个坑槽的深度、面积和体积相对误差最大分别为 4.65%、6.32%和 7.17%；当间距增大为 10 mm 时，三个指标相对误差最大为 5.80%、10.26%和 14.41%，虽然深度指标相对误差较小，但面积和体积误差均超过 10%；当激光线间距增大至 20 mm 时，两个坑槽的面积和体积相对误差均超过 15%，已无法满足检测精度要求。

进一步分析表明，随着激光线间距不断增大，坑槽深度指标的误差增速较小，这是由于室内坑槽模型采用碗状模具，底部较平整；而面积和体积指标的

相对误差增长较大，这是由于坑槽三维重构模型出现部分缺失，导致闭合等高线不完整，导致据此计算的面积和体积指标误差较大。因此，为保证坑槽多维度指标检测准确度建议激光线纵向间距小于 5 mm。

3 结论

(1)利用三维激光检测技术所获取动态的高精度、高密度激光点云数据，基于 TIN 平面插值和等高线提取法建立了坑槽三维模型重构与多维度指标计算方法；对两个不同尺寸室内坑槽模型检测表明，坑槽深度、面积和体积指标的最大相对误差分别为 3.96%、4.58%和 4.74%，表明三维激光技术对坑槽多维度指标检测具有较高的准确性和可重复性。

(2)当激光线纵向间距从 1 mm 逐渐增加至 20 mm 时，坑槽三维模型逐渐失真并出现了部分缺失，导致坑槽多维度指标的相对误差均不断增大；当激光线间距为 5 mm 时，坑槽深度、面积和体积指标的最大相对误差分别为 4.65%、6.32%和 7.17%；当激光线纵向间距大于 10 mm 后，部分指标的相对误差大于 10%；因此，为保证检测精度，三维激光检测坑槽时的激光线纵向间距应不大于 5 mm。

(3)利用三维激光技术获取的坑槽多维度指标

可以为路面结构层损伤判别、坑槽严重程度评价以及修补材料用量预估提供参考,进一步的为研究坑槽演化与成因、科学合理的养护决策奠定基础。但是本文采用的坑槽形状与严重程度单一,目前成果仍需大量现场试验研究才能达到实际应用的目标。

参考文献:

- [1] 孙立军,张宏超,刘黎萍,等. 沥青路面初期损坏特点和机理分析——重交通沥青路设计方法之一[J]. 同济大学学报(自然科学版),2002,30(4):416.
SUN Lijun, ZHANG Hongchao, LIU Liping, *et al.* Characteristics and mechanism of initial failures on asphalt pavement—design method for heavy-duty road (part1)[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(4):416.
- [2] Federal Highway Administration. Variability of pavement distress data from manual surveys[R]. Washington D C: F H A, 2000.
- [3] BOGUS S M, Migliaccio G C, Cordova A A. Assessment of data quality for evaluations of manual pavement distress [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2170(1):1.
- [4] 邹群,虞安军,邹国平. 高速公路路面养护决策混合遗传优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2007,7(4):63.
ZOU Qun, YU Anjun, ZOU Guoping. Hybrid genetic optimization method of pavement maintenance decision-making for expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4):63.
- [5] 姚玉玲,李学红,张毕超. 沥青路面预防性养护时机综合评价指标体系[J]. 交通运输工程学报, 2007,7(5):48.
YAO Yuling, LI Xuehong, ZHANG Bichao. Integrative evaluation index system for preventive maintenance timing of asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5):48.
- [6] CHOU J, O' NEILL W A, CHENG H. Pavement distress evaluation using fuzzy logic and moment invariants [J]. Transportation Research Record, 1995,1505:39.
- [7] LEUNG T, MALIK J. Representing and recognizing the visual appearance of materials using three-dimensional textons[J]. International Journal of Computer Vision, 2001,43(1): 29.
- [8] KOCH C, BRILAKIS I. Pothole detection in asphalt pavement images[J]. Advanced Engineering Inf., 2011,25(3): 507.
- [9] 侯相深,王哲人,刘振鹏. 路面损坏图像的自动采集与处理设备的技术探究[J]. 公路,2003(2):66.
HOU Xiangshen, WANG Zheren, LIU Zhenpeng. Technology research of automatic acquisition and processing equipment for damaged pavement image [J]. Highway,2003(2):66.
- [10] KOCH C, JOG G M, BRILAKIS I. Automated pothole distress assessment using asphalt pavement video data[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2013, 27(4):370.
- [11] BIANCHINI A, BANDINI P, SMITH D W. Interrater reliability of manual pavement distress evaluations[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(2):165.
- [12] Huang Y, Copenhaver T, Hempel P. Texas department of transportation 3D profiling system for high-speed rut measurement[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2013, 19(2):221.
- [13] ZHANG Z, AI X, CHAN C K, *et al.* An efficient algorithm for pothole detection using stereo vision[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). New York: IEEE,2014: 564-568.
- [14] CHAN C K, GAO Y, ZHANG Z, *et al.* Implementation and evaluation of a pothole detection system on TI C6678 digital signal processor [C]// Education and Research Conference. Clifton. New York: IEEE, 2014:297-301.
- [15] JOG G M, KOCH C, GOLPAVAR-FARD M, *et al.* Pothole properties measurement through visual 2D recognition and 3D reconstruction[C]// Proc. of the 2012 ASCE International Conference on Computing in Engineering. [S. l.]: ASCE, 2012:553-560.
- [16] HE Youquan, WANG Jian, QIU Hanxing, *et al.* A research of pavement potholes detection based on three-dimensional projection transformation [C] // The 4th International Congress on Image and Signal Processing. Shanghai: [s. n.], 2011: 1805-1808.
- [17] CHANG K T, CHANG J R, LIU J K. Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology [C] // International Conference on Computing in Civil Engineering. Cancun: [s. n.], 2005:1-11.
- [18] LI Q, YAO M, YAO X, *et al.* A real-time 3D scanning system for pavement distortion inspection[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 21(1):015702.
- [19] LI Feng. A methodology for characterizing pavement rutting condition using emerging 3D line laser imaging technology [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2012.