

文章编号:1671-8879(2016)02-0001-08

水泥混凝土路面错台三维检测方法

孙朝云¹,郝雪丽¹,沙爱民²,李 伟¹

(1. 长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对水泥混凝土路面错台病害准确评价要求,设计了激光错台三维检测系统,基于激光三角法实现了路面三维信息的采集,利用数字图像处理技术对数据进行处理,对错台三维高程数据直方图的双峰特性进行分析,实现了阈值的自动确定和平均错台量的计算;同时为了验证三维检测方法的稳定性和可靠性,进行了实验室模拟试验和现场试验。研究表明:实验室模拟试验中,三维检测方法与水准仪测量方法绝对误差均在 1 mm 内,且三维检测方法得到的检测结果标准差小,分布更集中;现场试验中,三维检测方法与钢尺测量结果绝对误差的 83%集中在 2 mm 内,最大不超过 3 mm;试验证明水泥混凝土路面错台三维检测方法具有一定的稳定性、准确性和可靠性,可用于水泥混凝土路面错台自动检测。

关键词:道路工程;平均错台量;三维检测;水泥混凝土路面;双峰高度直方图;自动阈值法
中图分类号:U416.216 **文献标志码:**A

3D detection method of cement concrete joint faulting

SUN Zhao-yun¹, HAO Xue-li¹, SHA Ai-min², LI Wei¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: According to critical assessment requirements of concrete joint faulting, a laser-based 3D detection system of joint faulting was implemented. Acquisition of pavement 3D information was realized based on laser triangulation method. Data processing was done by use of digital image processing technique. Methods of automatic threshold determination and mean joint faulting value calculation were proposed based on analysis of the bimodal characteristics of joint faulting 3D height histogram. In order to testify the stability and reliability of the 3D detection system, laboratory and field experiments were designed and conducted. The results show that absolute errors of measure results using the level and 3D detection system are within 1 mm. Besides, measure results using 3D detection system had smaller standard deviation and more concentrated distribution. Eighty-three percent of absolute errors of measure results using the ruler and 3D detection system in field experiment are mostly less than 2 mm and the maximum is within 3 mm. It's proved that the concrete joint faulting 3D detection method has certain stability, accuracy and reliability, which can be used in automatic detection of concrete joint faulting. 2 tabs, 15 figs, 27 refs.

收稿日期:2015-09-20

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 490 750);国家自然科学基金项目(51408045);中央高校基本科研业务费专项资助项目(2013G3242007,310824152103)

作者简介:孙朝云(1962-),女,安徽太和人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhaoyunsun@126.com。

Key words: road engineering; mean joint faulting value; 3D detection; cement concrete pavement; bimodal height histogram; automatic threshold method

0 引言

水泥混凝土路面强度高、稳定性好,但由于长期承受车辆磨损、冲击,遭受各种自然因素的侵蚀、破坏,早期病害屡见不鲜^[1-4]。错台是影响其使用寿命、路面平整度以及加铺后反射裂缝的重要因素,也是对检测路段进行破坏程度评定的重要参考指标^[5-12]。国内外学者已陆续开展错台检测的相关研究。佐治亚电子错台仪和机械式错台仪分别以 mm 为单位数字化、刻度表式显示错台量^[13-14]。AASH-TTO 法是典型人工检测法,用直尺或水准仪对接缝进行检测。人工检测法速度慢,对交通造成的干扰大、精度低,且由于采样点数据的限制,无法得到精确错台量^[15]。2000 年,美国 LTPP 揭示了路面平均错台量与 IRI 的内在联系^[16];英红等采用双目摄像机实现了接缝位置定位和错台量的计算,但无法消除路面不一致性和多样性等带来的影响,在水泥面板变形或倾斜时,错台量计算将产生较大偏差^[17];马国民等提出利用加速度信号确定错台位置和错台量大小,但需事先对路面病害进行调研^[18-19];李海滨等开发了一种神经网络模型对接缝错台量进行预测,但建立预测模型时,需要该路段大量前期检测数据集,实际操作起来十分困难^[20]。

随着激光检测技术的发展,许多国家开始采用高速分析仪采集路面轮廓数据^[21]。2012 年, Tsai 等提出了一种用路面三维连续轮廓数据检测路面错台的方法,该方法原本是用于检测路面裂缝的,指出未来可设计基于信号处理的算法实现错台量的自动检测^[22];2014 年, Wang 等提出了一种基于特定峰值的试探算法,可从可能同时存在刻槽、裂缝和错台的数据中识别出錯台,但尚未提出自动计算错台量的特定算法^[23]。

综上,目前国内外尚未实现水泥混凝土路面错台的自动化检测,因此进行深入研究,提出检测速度快、精度高、实用性能好的水泥混凝土路面错台检测方法十分必要。为此,本文对水泥混凝土路面错台的三维检测进行了深入研究,设计基于激光三角法的错台三维检测系统,实现了水泥混凝土路面平均错台量的检测。

1 路面错台三维检测系统设计与实现

错台定义为水泥混凝土路面横向接缝或裂缝处相邻板之间的相对高差,2 个面板之间的相对位移量被定义为错台量。如图 1 所示,规定在汽车的行驶方向上 A 板高于 C 板的错台值为正值, B 板高于 C 板的错台值为负值。

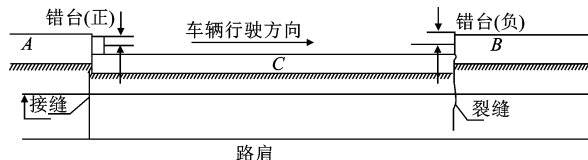


图1 水泥混凝土路面错台病害示意

Fig.1 Schematic of cement concrete joint faulting

1.1 激光三角法测量原理

本文研发的基于激光三角法的错台三维检测系统,实现了水泥混凝土路面平均错台量的检测^[24-27]。

激光三角法将被测物体、光源、相机放置在 3 个位置,形成三角形回路,激光器为光源照射在物体表面,散射的激光在探测元件上成像,若被测物体表面有位移变化,则在探测元件上也有相应像点发生位移变化,利用它们之间的物理位置关系推导出三角测距法公式,根据像点位移可求得实际位移。

激光三角测距法可分为直射式和斜射式 2 种。直射式激光三角法主要用于以散射或漫反射为主的表面粗糙的被测物体,其光路布局的激光器光束垂直照射于被测物体表面,具有结构尺寸小、安装调试方便、工作距离大、可测量柔软材料及粗糙工件表面形状位置变化等优点。由于本文测量对象是水泥混凝土路面的错台,形状一般不规则,路表面也较粗糙,因此本检测系统中的激光光源采用直射式布局。直射式激光三角测距系统原理如下页图 2 所示。

被测物体表面距离为 x (由 H 到 I), 反映到探测器光敏面上的像点位移为 x' , a 为激光束光轴和接收透镜前主面的距离, b 为接收透镜后主面到成像面中心点的距离, θ 为激光束光轴与接收透镜光轴之间的夹角, θ_x 为接收透镜中心点到被测物体表面距离 x 两端点之间的夹角, D 为透镜中心到激光束光轴的距离,接收透镜的焦距为 f ,接收透镜的中心为 C 。

在 $\triangle HIC$ 中,有

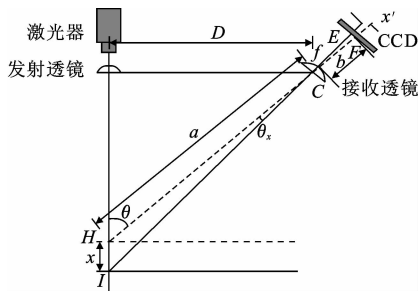


图 2 直射式激光三角法
Fig. 2 Direct laser triangulation

$$\frac{a}{\sin(\theta-\theta_x)} = \frac{x}{\sin(\theta_x)} \Rightarrow x = \frac{a \sin(\theta_x)}{\sin(\theta-\theta_x)} \quad (1)$$

由 $\sin(\theta-\theta_x) = \sin(\theta)\cos(\theta_x) - \cos(\theta)\sin(\theta_x)$, 则有

$$x = \frac{a}{\sin(\theta)\cot(\theta_x) - \cos(\theta)} \quad (2)$$

$\triangle CFE$ 中, $\angle CFE = 90^\circ$, $\cot(\theta_x) = \frac{b}{x'}$, 将其代入式(2), 有

$$x = \frac{a}{\sin(\theta)b/x' - \cos(\theta)} = \frac{ax'}{b\sin(\theta) - x'\cos(\theta)} \quad (3)$$

将 $\sin(\theta) = \frac{D}{a}$, $\cos(\theta) = \frac{\sqrt{a^2-D^2}}{a}$ 代入式(3), 有

$$x = \frac{a^2 x'}{bD - x' \sqrt{a^2 - D^2}} \quad (4)$$

由于 $bD \gg x' \sqrt{a^2 - D^2}$, 一般取 $b = f$, 因此式(4)可简化为

$$x = \frac{a^2 x'}{fD} \quad (5)$$

由于相机是斜置的, 当被测物体表面在垂直方向上发生位移变化 x 时, 显示到相机中为被测物体像元位移的变化 x' , 最终通过式(5)计算可由像元位移 x' 得到物体的真实位移变化。

1.2 路面错台三维检测硬件系统设计

错台三维检测硬件系统将红外线激光器与面阵相机结合, 实现了路面三维数据的采集, 硬件系统示意图见图 3。

激光器发出的结构光经透镜扩束后照射在被测路面上形成一条激光线, 路面的高低起伏使其发生形变, 由面阵 CCD 相机进行拍摄, 可获得路面轮廓的高度数据。依据激光三角法可得到路面实际三维深度信息, 利用特定的算法对数据进行处理即

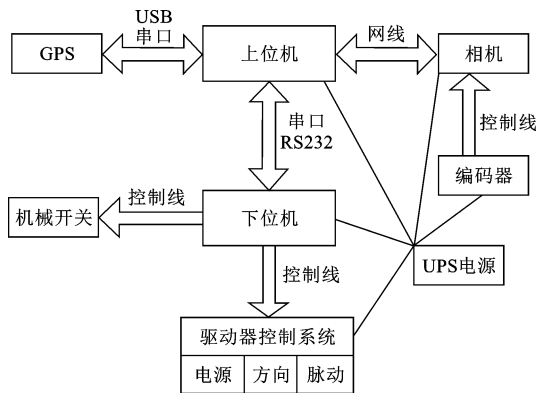


图 3 路面错台三维检测系统硬件示意
Fig. 3 Hardware system schematic of 3D detection system of concrete joint faulting

可得到被测错台的平均错台量。此外, 相机镜头前安装了滤光镜, 可以避免外界光线变化对检测结果的影响。将面阵相机与线激光器进行封装, 固定其相对位置以保证采集数据的准确性, 减小系统行进过程中机械振动对三维数据采集结果的影响, 同时可以为三维检测系统提供保护, 避免外力带来的损坏。

1.3 错台三维检测软件系统设计

依据检测原理并对错台检测实际需求进行分析, 设计实现了水泥混凝土路面错台检测的整套软件系统。系统以 Visual Studio 2008 为开发环境, 采用面向对象程序设计语言 C++ 进行开发, 数据库采用 SQL Server 2005。系统功能模块如图 4 所示。

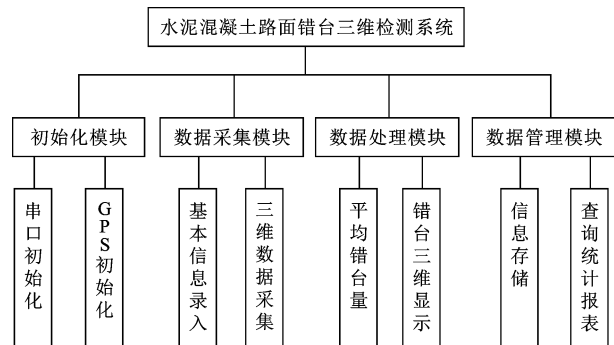


图 4 路面错台三维检测软件功能模块
Fig. 4 Software function modules of 3D detection system of concrete joint faulting

2 基于三维数据的平均错台量计算

组成错台的 2 个面板有较明显的高度差, 受图像处理中具有双峰特性灰度直方图启发, 创建路面错台三维高度数据的直方图, 错台三维重构图见图

5,其高程数据直方图见图 6,可见其有明显双峰特性。基于高程数据直方图的平均错台量计算方法总流程见图 7。

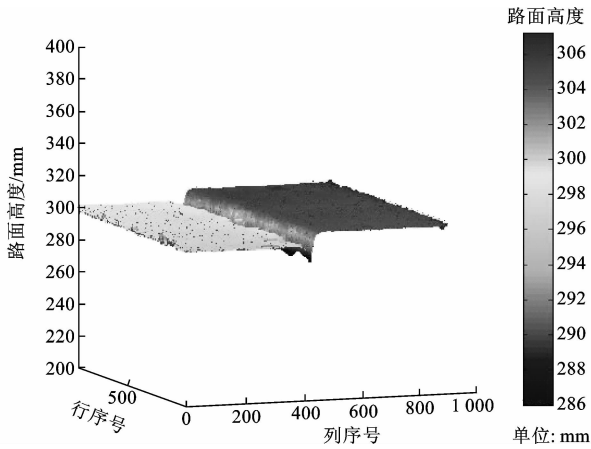


图 5 路面错台三维重构结果

Fig. 5 3D reconstruction results of concrete joint faulting

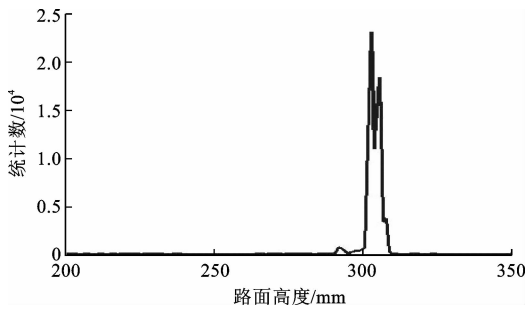


图 6 路面错台高度直方图

Fig. 6 Height histogram of concrete joint faulting

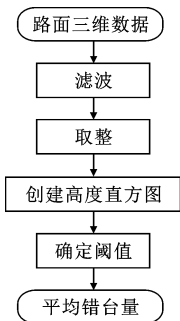


图 7 平均错台量计算方法总流程

Fig. 7 Calculation method flow of mean joint faulting value

系统中相机分辨率为 512×1536 。采集的路面三维高度数据精确度达到 0.01 mm ，若以 0.01 mm 作为统计错台高程数据直方图的步长，将使算法的时间复杂度明显增加，运算速度下降，因此，为了使算法效率和检测精度都达到最高，统计高程数据直方图时，将滤波后矩阵用 $M_{m \times n}$ 四舍五入方法取整。确定阈值后计算平均错台量时，用取整之前的矩阵。

取整后矩阵记为 $O_{m \times n}$ ，错台高程数据直方图创建流程如图 8 所示。

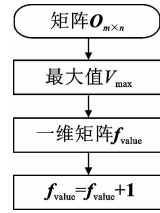


图 8 错台高程数据直方图创建流程

Fig. 8 Flow of height histogram creation of concrete joint faulting

图中, f_{value} 是长度为 $V_{\text{max}} + 1$ 的一维矩阵,用来存放矩阵中每个高度值出现的次数。逐行、逐列扫描 $O_{m \times n}$, 将每个高度值的个数进行累加 $f_{\text{value}} = f_{\text{value}} + 1$; 最后,以矩阵 $O_{m \times n}$ 中的数值为横坐标,对应 f_{value} 为纵坐标绘图,得到错台三维数据的高度直方图 Hist。

Hist 有明显双峰特性,找出阈值,按阈值将三维数据矩阵 $O_{m \times n}$ 分成两部分,分别计算平均值,再求其差值,即可得到平均错台量。确定阈值的流程如图 9 所示,确定阈值的具体步骤如下。

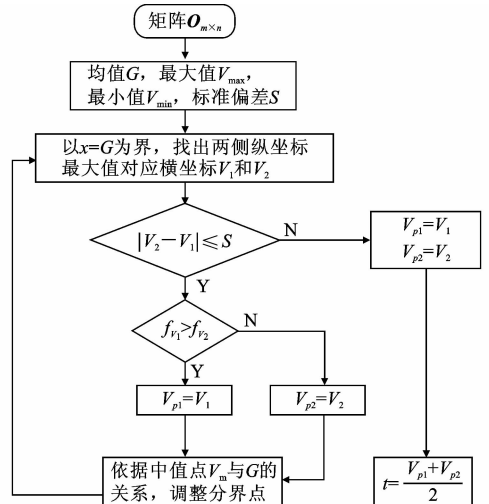


图 9 错台三维数据阈值确定流程

Fig. 9 Flow of threshold determination

(1) 计算矩阵 $O_{m \times n}$ 中数据的平均值 G , 最大值 V_{max} 、最小值 V_{min} 和标准偏差 S 。

$$G = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n O_{ij}}{mn} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (O_{ij} - G)^2}{mn - 1}} \quad (7)$$

(2) 在高度直方图上,以横坐标值等于 G 处为

分界点,分别找出其左、右两侧纵坐标,即高度值统计个数 f_{value} 的最大值对应的横坐标,分别记为 V_1 和 V_2 。

(3)若两峰位置相距较近, $|V_2 - V_1| \leq S$, 说明该错台数据的高度直方图双峰中有一个峰很低,需另寻低峰的位置;否则,令 $V_{p1} = V_1, V_{p2} = V_2$ (若 V_{p2} 已赋值,就不再重新赋值),至第(7)步。

(4)比较 f_{V_1} 和 f_{V_2} 的大小,若 $f_{V_1} > f_{V_2}$, 则 V_1 是其中一个有效峰值,记为 $V_{p1} = V_1$; 否则,若 $f_{V_2} > f_{V_1}$, 则 $V_{p1} = V_2$ 。

(5)将 f_{value} 从小到大排列,找出其中值点对应的横坐标,即路面高度值,记为 V_m 。

(6)若 $V_m > G$, 表明小峰在大峰左边(低面板数据较少); 否则,表明小峰在大峰右边(高面板数据较少),做以下处理:

(a)若 $V_m > G$, 小峰在左边,向左调节分界点,至第(2)步;

(b)若 $V_m < G$, 小峰在右边,向右调节分界点,至第(2)步。

(7)以两峰值位置的中点作为阈值 $t, t = \frac{V_{p1} + V_{p2}}{2}$; 得到阈值之后,计算平均错台量,具体步骤如下:

①以 t 为分界点,逐行逐列遍历滤波后取整前的矩阵 $M_{m \times n}$, 将满足 $M_{ij} \geq t$ 的元素存入一维矩阵 O_1 , 将满足 $M_{ij} < t$ 的元素存入一维矩阵 O_2 ;

②分别求矩阵 O_1 和 O_2 的平均值 G_1 和 G_2 ;

③计算 2 个平均值的差,并取绝对值,即为所求平均错台量。

3 路面错台三维检测试验结果对比

传统错台检测方法以 mm 为单位记录接近车轮轮迹带处的错台量,测量 3 个点,取平均值作为所测路段的错台量。由于水泥混凝土路面错台不一定只在轮迹带处出现,因此先选取有错台的路面部分,再进行平均错台量的精确测量。为了探讨错台三维检测系统测量结果的准确性和稳定性,在室内和室外分别进行了试验,并将其与钢尺和水准仪的测量结果进行比较分析。

3.1 平均错台量检测室内试验及结果分析

在实验室用 2 块水泥板进行拼接,模拟梯形错

台(图 10),用三维检测系统和水准仪分别进行测量。为了减小误差,采用 2 种方法对 5 个点分别进行 10 次测量。用水准仪分别测量组成错台的上、下面板对应的 5 个点差值的绝对值,取平均值作为结果,与三维检测系统测得的平均错台量进行比较。

用三维检测系统对水平错台进行扫描(图 11),要确保整个错台都在其视场范围内,生成的 dat 文件即原始三维数据。

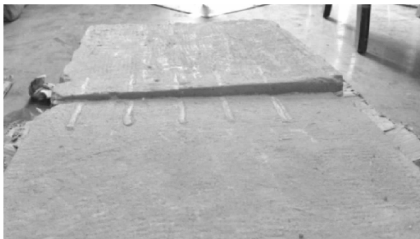


图 10 错台实验室模拟试验

Fig. 10 Laboratory simulation of joint faulting



图 11 错台三维检测系统实验室试验

Fig. 11 Laboratory experiment of 3D detection system

表 1 是模拟梯形错台上 5 个点用三维检测系统和水准仪分别进行 10 次测量的平均值、标准差和均值的绝对误差。5 个点用 2 种方法分别测量 10 次得到测量结果的绝对误差及正态分布如下页图 12、图 13 所示。

表 1 实验室模拟错台检测试验结果

Tab. 1 Results of laboratory simulation experiment

测点编号	方法	均值/mm	标准差	绝对误差/mm
1	三维检测	20.9	0.06	0.9
	水准仪检测	20.0	0.47	
2	三维检测	18.8	0.04	0.9
	水准仪检测	17.9	0.32	
3	三维检测	14.8	0.04	0.6
	水准仪检测	14.2	0.63	
4	三维检测	11.8	0.10	0.1
	水准仪检测	11.7	0.48	
5	三维检测	9.7	0.02	1.0
	水准仪检测	8.7	0.48	

表 2 现场错台检测试验结果

Tab. 2 Test results of field experiment detection			
错台样本编号	钢尺测量/mm	三维检测/mm	绝对误差/mm
1	1.4	1.5	0.1
2	1.5	3.7	2.2
3	1.9	3.0	1.1
4	2.0	3.2	1.2
5	2.4	1.6	0.8
6	2.5	2.7	0.2
7	3.0	2.2	0.8
8	3.1	1.7	1.4
9	3.3	2.9	0.4
10	3.7	2.9	0.8
11	4.1	4.6	0.5
12	4.7	7.3	2.6
13	4.8	6.6	1.8
14	5.6	4.7	0.9
15	6.1	6.7	0.6
16	6.3	7.4	1.1
17	6.9	7.7	0.8
18	7.1	5.9	1.2
19	7.6	9.1	1.5
20	8.6	10.1	1.5
21	8.7	7.1	1.6
22	9.2	7.9	1.3
23	11.3	14.0	2.7
24	14.3	16.1	1.8
25	15.1	17.0	1.9
26	19.8	12.6	2.8
27	25.7	24.5	1.2
28	28.5	26.1	2.4
29	31.8	30.1	1.7
30	36.7	37.5	0.8

由表 2 及图 15 可看出,由于实际路面上存在小坑洞,错台缝隙中有杂物填充等复杂性,2 种方法测量结果的绝对误差比实验室模拟数据稍大。绝对误差的 83% 以上均集中在 0~2 mm 之间,最大不超过 3 mm,可以满足养护管理单位对路面错台检测的需求,进一步验证了系统和算法的可行性、准确性。

传统的钢尺及水准仪测量错台量方法,都只能对错台 2 个截面上非常有限的采样点进行测量,再计算差值的平均值作为平均错台量;而错台三维检测系统可在错台截面方向进行非常密集的采样,再用本文提出的特定算法对采集得到的三维数据进行处理,得到平均错台量。

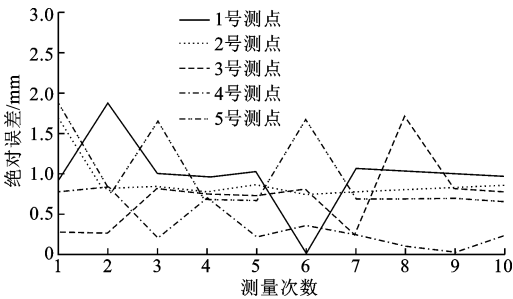


图 12 三维检测系统和水准仪测量绝对误差
Fig. 12 Absolute errors of 3D detection system and level

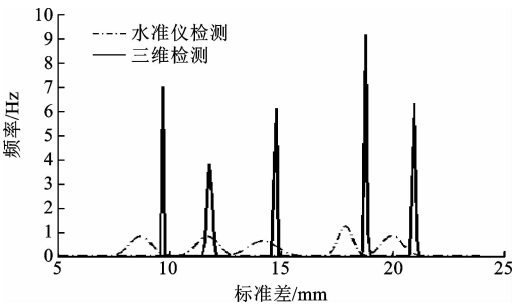
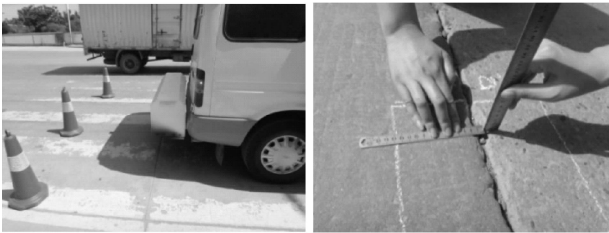


图 13 三维检测系统和水准仪测量结果的正态分布
Fig. 13 Normal distribution of 3D detection system and level

由表 1 及图 12、图 13 可看出,2 种方法测量结果的平均值的绝对误差都集中在 0~1 mm。三维检测系统测量得到的数据标准差小,分布更集中,因此,三维检测系统波动性小,可重现性好,精确度高,对水泥混凝土路面平均错台量的测量,三维检测系统比水准仪测量更稳定、有效。

3.2 平均错台量检测现场试验及结果分析

现场试验在错台病害较为集中的路段进行。为了尽量减小对交通的妨碍并保证试验人员的人身安全,考虑到水准仪调试、测量耗时较长,故在现场试验中未使用水准仪,而是随机选取 30 组错台样本作为试验对象,分别用三维检测系统和钢尺进行测量,如图 14 所示,测量结果如表 2、下页图 15 所示。



(a) 三维检测系统 (b) 钢尺测量

图 14 错台检测现场试验

Fig. 14 Field experiment of joint faulting detection

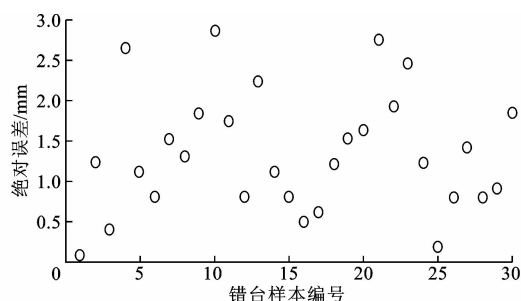


图15 现场试验三维检测系统与钢尺测量绝对误差

Fig. 15 Absolute errors of field experiment 3D detection system and steel ruler measure

4 结 语

(1)设计了错台三维检测系统,实现了水泥混凝土路面三维信息的采集,依据错台高程数据直方图的双峰特性,提出了阈值自动确定和平均错台量计算方法。实验室模拟试验和现场试验结果证明了三维检测系统的稳定性和准确性,可用于水泥混凝土路面错台自动检测。

(2)三维检测系统采样点比传统方法能实现的测量采样点数目大的多,可以提高水泥混凝土路面平均错台量的测量精度,为错台分级和处治方法提供理论依据,有助于道路管理部门做出合理的养护决策。

(3)本文设计实现的水泥混凝土路面错台三维检测系统已实现了车载式测量,可用于道路现场快速检测,但每次检测需要将检测车停在待检测区域,对交通还是存在一定程度的妨碍。下一步要在保证检测精度的前提下,将实现不停车移动式连续测量作为一个研究重点。

参考文献:

References:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research; 2013 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [2] 武贤慧, 沙爱民, 张娟. 水泥路面病害-成因关系链及数字化编码[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35(2): 19-25.
WU Xian-hui, SHA Ai-min, ZHANG Juan. Chain and

digital coding of distress and cause of cement concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(2): 19-25. (in Chinese)

- [3] MU F, VANDENBOSSCHE J M, GATTI K A, et al. An evaluation of JPCP faulting and transverse cracking models of the mechanistic-empirical pavement design guide[J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 13(1): 128-141.
- [4] SOLMINIHAC H D, SALSILLI R, COVARRUBIAS J P, et al. Rehabilitation performance prediction models for concrete pavements[J]. Journal of the Transportation Research Board, 1999(1684): 137-146.
- [5] TAYLOR P C, KOSMATKA S H, VOIGT G F. Integrated materials and construction practices for concrete pavement: a state-of-the-practice manual[R]. Ames: Iowa State University, 2006.
- [6] JUNG J S, OWUSU-ANTWI E B, AN J H. Analytical procedures for evaluating factors that affect joint faulting for jointed plain concrete pavements using the long-term pavement performance database[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(10): 1279-1286.
- [7] SAGHAFI B, HASSANI A, NOORI R, et al. Artificial neural networks and regression analysis for predicting faulting in jointed concrete pavements considering base condition[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2009, 2(1): 20-25.
- [8] 宋金华, 张彩利, 张雪华. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
SONG Jin-hua, ZHANG Cai-li, ZHANG Xue-hua. Roadbed and pavement engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 王威娜. 基于 LTPP 数据的水泥混凝土路面错台影响因素与预测模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WANG Wei-na. Analysis of design factors impacting joint plain concrete pavement faulting and development of forecasting model using LTPP data [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [10] PIERCE I M, UHLMAYER J, Weston J, et al. Ten-year performance of dowel-bar retrofit application; application performance, and lessons learned[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2003(1853): 83-91.
- [11] 张文武, 潘昊宇, 王振龙, 等. 基于 ANSYS 的错台修补有限元仿真分析及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(9): 53-56.

- ZHANG Wen-wu, PAN Hao-yu, WANG Zhen-long, et al. Finite element simulation analysis and application of slab staggering patching based on ANSYS[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(9): 53-56. (in Chinese)
- [12] 张文武, 张玉宏, 何兆益, 等. 环氧树脂砂浆在水泥路面错台修补中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(8): 53-55.
- ZHANG Wen-wu, ZHANG Yu-hong, HE Zhao-yi, et al. Application of epoxy resin mortar in repairing faulting of slab ends of cement pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(8): 53-55. (in Chinese)
- [13] MILLER J S, BELLINGER W Y. Distress identification manual for the LTPP (fourth revised edition) [R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2003.
- [14] SELEZNEVA O, JIANG J, TAYABJI S D. Preliminary evaluation and analysis of LTPP faulting data-final report [R]. Mclean: Federal Highway Administration, 2000.
- [15] DERE Y, ASGARI A, SOTELINO E D, et al. Failure prediction of skewed jointed plain concrete pavements using 3D FE analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2006, 13(6): 898-913.
- [16] AASHTO R 36-2000, Standard practice for evaluating faulting of concrete pavements[S].
- [17] 英红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247-252.
- YING hong, TAN Zhi-ming. Cement concrete pavement faulting detection and recognition based on binocular vision[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(2): 247-252. (in Chinese)
- [18] 马国民. 水泥混凝土路面错台病害的评定方法及处治技术[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- MA Guo-min. The assessment method and treatment technology for the joint faulting distress of cement concrete pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [19] 唐伯明, 马国民, 谈至明. 水泥混凝土路面错台分级方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 62-67.
- TANG Bo-ming, MA Guo-min, TAN Zhi-ming. Faulting evaluation criteria of cement concrete pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(1): 62-67. (in Chinese)
- [20] 李海滨, 盛燕萍, 黄振, 等. 人工神经网络与回归分析方法预测接缝式水泥混凝土路面错台[J]. 中外公路, 2012, 32(3): 110-114.
- LI Hai-bin, SHENG Yan-ping, HUANG Zhen, et al. Artificial neural network and regression analysis method to predict seam type concrete pavement joint faulting[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 32(3): 110-114. (in Chinese)
- [21] FLINTSCH G W, HUANG M Q, MCGHEE K K. Harmonization of macrotexture measuring devices [J]. Journal of ASTM International, 2007, 2(9): 47-58.
- [22] TSAI Y, WU Y, AI C, et al. Critical assessment of measuring concrete joint faulting using 3D continuous pavement profile data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(11): 1291-1296.
- [23] WANG K, LI L, LI J Q, et al. Automated joint faulting measurement using 3D pavement texture data at 1 mm resolution[C]//VARMA A, GOSLING G D. T&DI Congress 2014: Planes, Trains, and Automobiles. Reston: ASCE, 2014: 498-510.
- [24] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增2): 601-604, 608.
- WANG Xiao-jia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S2): 601-604, 608. (in Chinese)
- [25] 冯金城. 高精度实时激光三角测距系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- FENG Jin-cheng. The design of a real-time and high-precision laser triangulation system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- [26] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2004, 43(1): 50-53.
- LU Jin-ren, HUANG Yuan-qing. Laser triangulation method for surface measurement[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2004, 43(1): 50-53. (in Chinese)
- [27] 孙朝云, 郝雪丽, 李伟, 等. 路面三维数据去噪算法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35(1): 20-25.
- SUN Zhao-yun, HAO Xue-li, LI Wei, et al. Research of pavement 3D data denoising algorithm[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(1): 20-25. (in Chinese)