

基于三维激光扫描技术的路面断板深度检测

曹 霆, 王卫星, 杨 楠, 高 婷, 王峰萍

(长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:针对传统的路面检测方法无法直接获得路面的深度信息,设计了一种基于三维激光扫描技术的路面断板深度检测方法。该方法首先通过三维激光扫描仪得到路面点云数据,其次将路面断板数据沿水平方向分为若干切片,然后对每一断板切片上下平面分别进行拟合,最终根据上下平面之间的距离确定断板的深度。根据实际工程需要,提出了一种基于动态阈值的平面拟合迭代算法,不仅可以有效地识别并去除断板点云数据中的无效点,而且可以在点云数据三个方向都存在误差的情况下实现平面计算。实验结果表明,该方法不仅能得到整个路面断板的深度信息,还能反映出断板深度沿水平方向的变化趋势。

关键词: 三维激光扫描; 路面断板; 点云数据; 平面拟合

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0206006

Detection method for the depth of pavement broken block in cement concrete based on 3D laser scanning technology

Cao Ting, Wang Weixing, Yang Nan, Gao Ting, Wang Fengping

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Because the depth information of pavement could not be got directly by traditional method of pavement detection, a detection method for the depth of broken block in pavement based on 3D laser scanning technology was presented. The point cloud data of the broken crack can be obtained by a 3D laser scanner. The crack data can be divided into several slices along the horizontal direction, and the depth information for each of the slices can be estimated by the distance between the up and down planes respectively. According to the practical engineering, a novel plane fitting iterative algorithm based on dynamic threshold was proposed, it can not only identify and remove invalid points in the point cloud data effectively, but also accomplish plane calculation with errors in three directions. Experiments show that the proposed method can not only get the depth information of the whole pavement broken block, but also reflect the change trend of the depth of the broken block along the horizontal direction.

Key words: 3D laser scanning; pavement broken block; point cloud data; plane fitting

收稿日期:2016-06-10; 修订日期:2016-07-20

基金项目:陕西省国际合作重点项目(2013KW03);中央高校重点项目(CHD2013G2241019);长安大学优秀博士论文资助项目(310824150011)

作者简介:曹霆(1988-),男,博士生,主要从事三维点云及图像处理方面的研究工作。Email:wellcaoting@163.com

导师简介:王卫星(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理,模式识别以及计算机视觉等方面的研究工作。

Email:wxwang@chd.edu.cn

0 引言

随着国民经济的持续发展,国内的高速公路事业也在高速前进^[1]。公路使用中难免会产生一定的消耗和损害,对路面性能产生影响。如果不能及时地发现并进行养护处理,将会造成较大的病害,从而严重影响公路运输和行车安全。因此,对水泥混凝土路面众多病害的有效检测和科学管理具有重要的现实意义。

在其众多病害中,路面断板是影响水泥混凝土道路使用寿命及路面平整度的重要指标,也是对检测路段进行破坏度评定的标准之一。当水泥混凝土路面产生断板后,其它病害也会伴随发生,如错台,脱空,裂缝,拱起等。若不能及时发现并处理断板,路面的病害会更加严重,甚至破碎,从而丧失承载能力。因此,路面断板的检测一直是研究的重点。

国内外已开展了大量关于水泥混凝土路面断板检测的研究,不仅涉及水泥混凝土路面断板与路面平整度、舒适性等众多指标间的关系^[2],也涉及断板产生的机理、分级和治理方法等,但是关于断板检测方法研究还十分有限。传统的人工检测方法通常是借助相关仪器实现手动测量^[3],这种方法不仅主观性强,速度慢,而且危险性高,且易受外界影响,已经逐渐无法满足智能交通管理系统和日益完善的路面质量评价技术发展的需要。目前,现代化的三维路面检测技术正成为路面检测发展的方向^[4]。

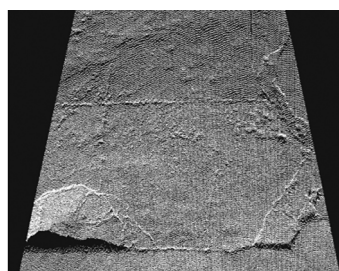
近年来,三维激光扫描测量技术已经成为研究的热点^[5-6],与传统测量技术相比,该技术能够快速获取目标物体的三维空间信息,真正实现无接触测量^[7-10]。国外对三维激光技术的研究起步较早,技术也比较成熟。国内引进时间较晚,但是发展迅速,目前已经逐渐应用于多种工程方面^[11-13]。然而,目前针对路面三维检测方法还没有得到广泛认可,因此利用激光扫描技术对三维检测方法进行深入研究,不仅有一定理论价值和实际意义,而且对今后的相关研究有指导意义。

针对目前的问题,文中提出了一种基于三维激

光扫描技术的水泥混凝土路面断板深度检测方法。该方法通过三维激光扫描得到路面点云数据,根据路面断板的上下平面三维数据,测量和分析出断板的深度信息。该方法不仅能得到整个路面断板的深度信息,还能反映出断板深度沿水平方向的变化趋势。相比其他人工检测方法,文中提出的检测方法具有技术上的先进性,无接触三维测量保证了检测的安全性和便捷性,处理数据的速度快,并能对数据进行保存,以供后期可视化查询和对比,因而该方法在其他工程实践中也会有着广阔的应用前景。

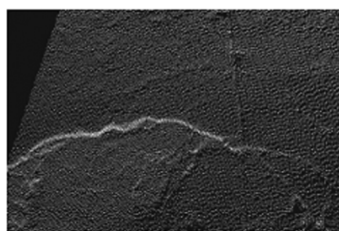
1 路面三维激光数据分析

在现实的水泥混凝土路面中,断板的形状信息是随机的,几乎不可能是理论上的垂直和水平,都是些无规则形状。如图 1 所示是使用 Leica C10 三维激光扫描仪获得一段路面的点云数据,在 Visual Studio 2010 平台下显示出来三维效果图。



(a) 三维路面可视化效果

(a) 3D pavement visualization effect



(b) 近距离效果

(b) Close range effect

图 1 路面点云数据

Fig.1 Pavement point cloud data

1.1 路面断板数据分析

可以看出,路面点云数据本质是由海量的点数据组成。图 2 是不同角度的路面断板点云数据,中间灰度较深的部分的代表路面断板信息。

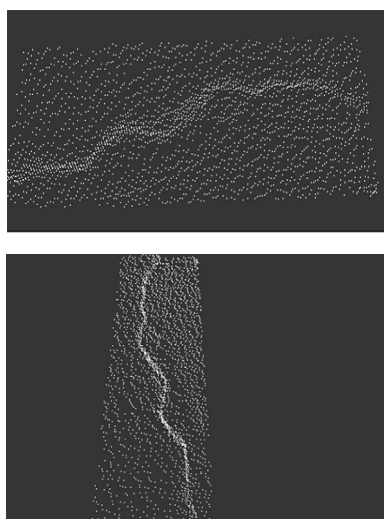


图 2 不同角度的路面断板点云数据

Fig.2 Point cloud data of pavement broken block in different angles

所以,不能简单地直接测量一段断板的深度。在上述的基础上,文中选取此路面断板为例,详细说明整个分析计算的原理和过程,如图 3 所示。

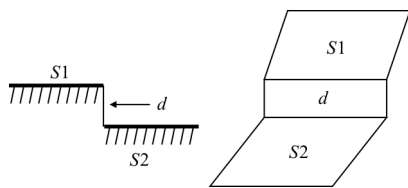


图 3 路面断板深度检测原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of depth detection principle of pavement broken block

图中, S_1 和 S_2 分别为路面断板上下平面, d 为路面断板部分。

为了更加准确地反映断板深度信息,对沿断板水平方向分割为若干切片,分别对每一切片的深度进行计算。针对每一切片,分别对其上平面和下平面进行平面拟合,通过计算两个平面的距离得出路面断板深度值。最终不仅能得到整个路面断板深度数据,而且还可以得到其水平方向的变化趋势。

1.2 特征值平面拟合算法

综上所述,计算断板深度数据关键是对断板上下平面的计算,也就需要分别对路面断板的上平面和下平面进行拟合。

目前,最常用的点云数据平面拟合方法为最小二乘法 and 特征值法^[14]。

其中,最小二乘法根据平面方程 $z=ax+by+m$,

仅考虑 z 方向的数据作为条件求解参数。由于点云数据在 x,y,z 三个方向的都有数据,因此并不能适合点云数据。而特征值法是根据平面方程 $ax+by+cz=d$ 得到平面的参数。这种方法可以考虑 x,y,z 三个方向数据,能有效地对点云数据进行平面拟合。其原理是根据特征值方程求解最小特征值对应的特征向量值,即为拟合平面的方程参数 a,b,c 。

2 路面断板平面拟合算法

在实际工程应用中的点云数据内容都非常庞大,直接对所有点云数据进行平面拟合进行不仅方法复杂,计算量大而且容易受到噪声干扰。没有考虑到异常点的存在,会导致求出的并非为最优解,并不能反映出真实的平面信息。因此,需要对数据进行一定的筛选,有效去除异常点的干扰。

随机参数估计是一种经典地随机参数估计算法^[15],理论上可以剔除异常点的影响,并得到全局最优的参数估计。但是在实际应用中存在两个问题。首先,在每次迭代中用于区分内点和外点的阈值需要确定。其次,算法的迭代次数是运行期决定的,不能预知迭代的次数。

文中根据实际工程特点,提出了一种基于动态阈值的平面拟合迭代算法,根据标准差思想选取动态阈值,使用迭代的方法剔除外点,构建一个仅有局内点数组成的子集,最终得到最优平面模型参数。其中,使用平面距离的标准差计算动态阈值,而迭代次数用内点个数比例确定。

2.1 根据标准差选取动态阈值

综上所述,在平面拟合迭代算法中,阈值 t 的选择十分重要,若阈值 t 较小,则可能放弃应该选取的有效点,而阈值 t 过大,则会将异常点误判为有效点。因此,需要考虑实际点云数据误差允许范围,选取阈值能够有效检测出异常点。

标准差反映了数据偏离平均值的程度,在实际工程中,根据标准差概念自动计算选取阈值,可以有效区分有效点,而且不需要认为设定参数,方便易行。

阈值 t 的选取过程为:

- (1) 利用平面模型计算出平面参数 a,b,c 的初

始值。

(2) 计算每个点到平面距离 l_i :

$$l_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (1)$$

(3) 计算 l_i 的标准差 σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: $\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$

(4) $t=2\sigma$ 取, 当 $l_i > t$ 时, 认为该点为异常点, 需要剔除。

2.2 迭代次数选取

除此之外, 迭代的次数也是重要的一个参数。其不仅影响精度, 而且严重影响速度。迭代次数过少, 不能有效去除异常点, 影响精度。迭代次数过多, 减缓整个算法的速度。而且, 仅仅根据迭代的次数难以客观反映最终计算模型参数的好坏。因此, 文中对于迭代结束的条件并不是按照传统的次数来衡量, 而是根据实际工程需要, 按照内点占全部点云数据的比例作为衡量标准。若占有比率 p 达到 90% 以上, 就认为满足要求, 完成迭代计算。

2.3 基于动态阈值的平面拟合迭代算法

因此, 文中提出的基于动态阈值的平面拟合迭代算法可以分为以下几个步骤:

(1) 从初始的点云数据 S 中随机的选取点, 采用上述特征值方法计算平面模型参数 a, b, c 的值。

(2) 分别计算 S 中每个点到平面的距离 l_i 。设置阈值 t , 判断该点是内点 M 还是外点 N 。

若 $l_i \geq t$, 则 $S_i \in N$, 若 $l_i < t$, 则 $S_i \in M$ 。

(3) 统计内点 N 的个数 n , 计算是否大于设定占有比例 p 。

如果不是, 返回第一步, 继续进行迭代, 直至满足设定比例。如果是, 迭代结束, 所有内点为最优结果, 采用特征值方法得到最终平面模型参数。图 4 为算法流程图。

综上所述, 基于动态阈值的平面拟合迭代算法首先选取制定点云数据作为初始平面模型参数的计算, 这样不但能够保证平面模型参数计算的快速准确, 还能有效去除噪音的影响。其次根据标准差思想计算选取动态阈值, 可以有效区分内外点, 并根据内点占有比

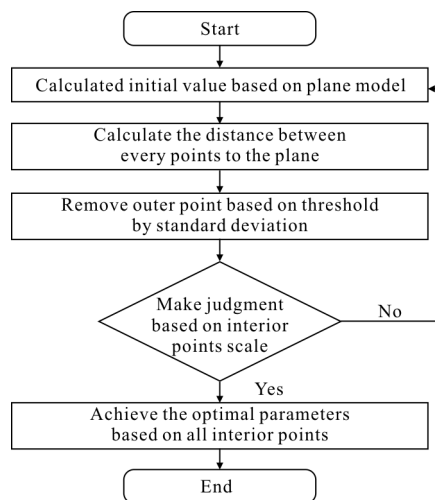


图 4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of proposed method

例作为评判标准, 可以快速完成迭代计算得到最优的内点。此外, 采用特征值方法可以在点云数据三个方向都存在误差的情况下完成相应的平面拟合。

3 实验数据和分析

文中的实验借助 Visual Studio2010 为平台, 使用 C++ 语言进行编译, 结合微软的 PCL (Point Cloud Library) 实现相关算法及可视化。

目前, 关于间隔的选取并没明确的规范和参考依据。实际上, 不同的间隔只会影响用于平面拟合的数据量多少, 并不会对精度产生本质的影响。而且, 在实际工程中可以根据具体需求, 对间隔大小的选取进行相关调整。文中选取 2cm 为距离间隔对路面断板部分进行分割, 整个断板被分割为 14 个切片, 在此基础上分别对每一切片进行断板深度的计算。分别如图 5 所示。

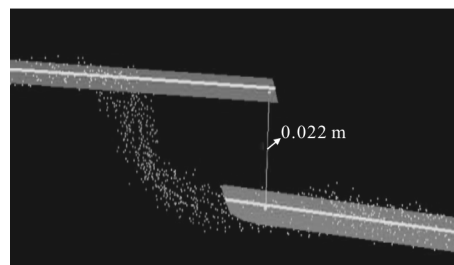


图 5 路面断板深度结果

Fig.5 Result of pavement broken block depth

采取基于动态阈值的平面拟合迭代算法得到的路面断板深度数据结果如表 1 所示。

表 1 根据切片检测出路面板深度

Tab.1 Pavement broken block depth detection according to the slice

Checking points	Broken block depth/m
1	0.026
2	0.024
3	0.024
4	0.024
5	0.030
6	0.026
7	0.022
8	0.024
9	0.024
10	0.020
11	0.018
12	0.021
13	0.016
14	0.015

如图 6 所示,该方法不仅能够得到路面断板深度信息,也可以看出断板深度数据沿水平方向的变化趋势,为路面修整和维护提供了详细的信息。图 7 为断板深度三维重构示意图。

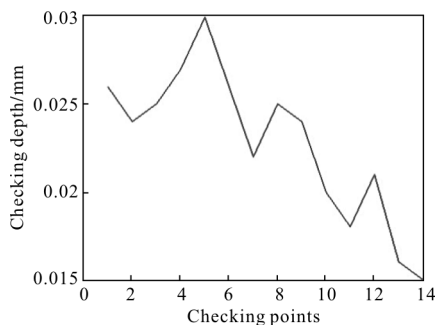


图 6 路面断板深度沿水平方向变化趋势

Fig.6 Changing trend of pavement broken block depth along horizontal direction

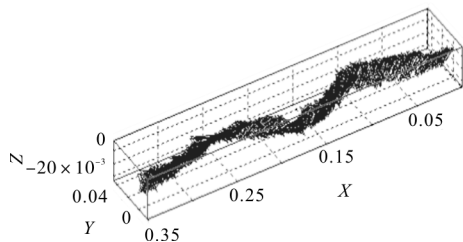


图 7 断板深度三维重构示意图

Fig.7 3D reconstruction of broken block depth

作为对比,采用人工检测的方法得到检测点 1,5,10,14 的断板深度分别为 0.025 m,0.030 m,0.020 m 和 0.016 m。这与文中方法的检测结果误差为 0.001 m,考虑到人工方法同样也会存在误差,所以可以认为这两种方法拥有相同的检测精度。相比于传统的方法,文中提出的方法在保证检测精度的前提下,实现了无接触三维测量,不仅安全而且方便快捷。所检测的数据易保存记录,也可供后期查询对比。

4 结论

文中设计出一种基于三维激光扫描技术的水泥混凝土路面断板深度检测方法。该方法通过三维激光扫描得到路面点云数据,具体采用基于动态阈值的平面拟合迭代算法分别对路面断板的上下平面拟合,根据平面之间的距离确定断板的深度。该算法不仅可以有效去除路面断板点云数据的无效点,而且特征值方法也可以在点云数据三个方向都有误差的情况下有效进行平面拟合。为了提高对路面断板深度计算的精确性,将断板的点云数据沿水平方向分为若干切片,分别对每一断板切片深度进行分析计算。实验结果表明,该方法不仅能得到整个路面断板的深度信息,还能反映出断板深度沿水平方向的变化趋势,从而为整个路面修补及维护提供了准确及全面的信息。

目前相关的三维技术仍然处于发展状态,尤其是在道路智能检测方面还处于起步阶段。文中的实验数据有限,仅仅针对了水泥混凝土路面。在实际应用中,仍然有可能会遇到各种现实的问题。文中抛砖引玉,希望能对今后三维激光技术在实际工程应用中的快速发展起到一定的指导意义。该技术存在诸多优点,不能仅拘泥于道路检测,应用环境应更为广泛,笔者下一步要研究的方向就是将这种技术扩展到其他相关工程领域。

参考文献:

[1] Wang Chang, Wang Yu. The national transportation work conference held in Beijing seeking for long-term stability [J]. *Transportation Construction & Management*, 2014, 23: 18-21. (in Chinese)
汪畅, 王宇. 全国交通运输工作会议在京召开 谋策长远

- 稳中求进[J]. 交通建设与管理, 2014, 23: 18–21.
- [2] Liu Y, Tian B, Niu K. Research on skid resistance and noise reduction properties of cement concrete pavements with different surface textures [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 22 (7): 22–27.
- [3] Tsai Y, Wu Y, Lewis Z. Full-lane coverage micromilling pavement-surface quality control using emerging 3D line laser imaging technology [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, 140(2): 04013006.
- [4] Jahanshahi M R, Asce A M, Asce S M, et al. Unsupervised approach for autonomous pavement-defect detection and quantification using an inexpensive depth sensor [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2014, 27(6):743–754.
- [5] Ouyang W, Xu B, Ouyang W. Pavement cracking measurements using 3D laser-scan images [J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 24(10): 105204.
- [6] Li Xu, Peng Huan, Wang Chunhui. APD optimal gain control investigation for spaceborne laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (5): 0502001. (in Chinese).
李旭, 彭欢, 王春辉. 星载激光测距仪 APD 最佳雪崩增益控制技术研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0502001.
- [7] Tsai Yichang, Wang Zhaohua, Jiang Chenglong, et al. Innovative crack sealing analysis and cost estimation for airport runway shoulders using 3D laser technology and automatic crack detection algorithms [J]. *Airfield and Highway Pavements*, 2015, 25(7): 652–661.
- [8] Zhou Sen, Guo Yongcai, Gao Chao, et al. Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1524–1530. (in Chinese)
周森, 郭永彩, 高潮, 等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1524–1530.
- [9] You Hongjian, Zhang Shiqiang. Reconstructing 3D buildings based on airborne CCD image and laser scanning rangefinder data [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14 (2): 297–302. (in Chinese)
尤红建, 张世强. 组合 CCD 图像和稀疏激光测距 数据的建筑物三维信息提取 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 297–302.
- [10] Lv Yuanzhi, Sun Qiang, Bi Guoling. Recognition and repairing of surface hole in three dimensional laser scanning system[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 114–121. (in Chinese)
吕源治, 孙强, 毕国玲. 三维激光扫描系统中曲面空洞的识别与修复[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 114–121.
- [11] Zhu Jingguo, Li Feng, Huang Qitai, et al. Design and realization of an airborne LiDAR dual-wedge scanning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0502001. (in Chinese)
朱精果, 李锋, 黄启泰, 等. 机载激光雷达双光楔扫描系统设计及实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0502001.
- [12] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 213–232. (in Chinese)
张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213–232.
- [13] Wang Pengbo, Kelvin C P, Chen Cheng, et al. 3D pavement crack image detection based on anisotropy measure [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2014, 49(5):888–895.
- [14] Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Shi Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36 (7): 981–984. (in Chinese)
官云兰, 程效军, 施贵刚. 一种稳健的点云数据平面拟合方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 981–984.
- [15] Fischler M, Bolles R. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography[J]. *Commun ACM*, 1981, 24(6): 381–395.