

路面三维检测技术研究*

王建锋¹⁾ 马建¹⁾ 马荣贵²⁾ 宋宏勋³⁾

(长安大学汽车学院¹⁾ 西安 710064) (长安大学信息工程学院²⁾ 西安 710064)

(长安大学光电技术应用研究所³⁾ 西安 710064)

摘要: 为了建立一个信息完整、功能强大的路面三维数据库, 以便完整、直观地评价路面质量, 提出了一种基于激光位移传感器和陀螺仪的路面三维检测方法. 该方法采用 TCP/IP 协议进行检测数据的实时高速传输, 对检测到的激光传感器信号、加速度传感器信号和陀螺仪信号进行数据融合处理, 用计算机技术重构出路面的三维形状, 建立起路面的三维数据库. 通过水准仪测量结果和激光检测系统测量结果对比证明, 该方法可以测量整个车道的路面形状, 检测精度高, 检测速度快.

关键词: 交通工程; 道路三维形状; 三维重构; 激光检测; 数据融合

中图法分类号: U416.06; T P319

DOI: 10.3963/j.issn.1006-2823.2010.06.000

0 引言

路面平整度不仅影响车辆行驶的安全性和舒适性^[1,2], 而且影响公路运输的经济效益. 通常道路平整度采用国际平整度指数 *IRI* 作为检测和评定指标, *IRI* 通过路面的横断面计算获得^[3-4]; 车辙深度直接反映道路的好坏和行车的安全性. 车辙深度通过路面的横断面计算获得.

对于道路管理部门来说, 某时段道路 *IRI* 值和车辙深度的大小固然值得关注, 但更希望建立一个道路三维形状的数据库, 通过此数据库能够直观的评价整段道路路面的质量. 通过对路面形状三维数据库的分析和加工处理可以获得路面任意位置的纵断面和横断面信息, 以及掌握各局部路段各时段的 *IRI* 值和车辙深度的变化量及变化速率, 为道路质量的评估和验收工作提供可靠、科学的基础数据.

1 检测原理

路面三维形状模型是用一组点的 *X*, *Y*, *Z* 坐标的数字形式来描述地表空间分布形态的有序数

值阵列, 即把地形表面用一种密集网格点的高程来表示, 存储在一个数据处理外围设备中, 作为路形资料库, 从中可以获得不同形式的计算输出, 以用于对道路质量进行系统、完整的评价. *X* 为道路的横断面方向; *Y* 为道路的纵断面方向(行车方向); *Z* 为路面的标高^[5-6].

通过安装在刚性梁上的多路激光位移传感器测量路面的横断面相对高程. 安装在刚性梁两端的加速度传感器, 测量刚性梁的振动量, 并对测量的振动量进行 2 次积分得到刚性梁的振动位移. 用此振动位移量对激光位移传感器测量值进行修正, 得到路面小波长内的相对纵断面高程. 通过安装在检测车上的陀螺仪测量路面的地理趋势.

把陀螺仪测量的道路地理信息与激光位移传感器和加速度传感器共同测量的路面小波长内的高程信息相互融合, 计算出整个路面的三维形状.

检测横断面时, 每个横断面检测过程中检测横梁须保持统一的测量基准, 但实际测量中由振动影响, 检测横梁一直绕理想检测基准振动. 如图 1 所示.

设基准面横断面曲线 *T* 的方程为

$$T_i = f(y) = \{(x_i, y_1, z_{i1}) \times (x_i, y_2, z_{i2}) \dots (x_i, y_m, z_{im})\} \quad (1)$$

收稿日期: 2010-09-04

王建锋(1984): 男, 博士, 主要研究领域为: 车路系统工程以及道路交通安全改善

* 国家自然科学基金(批准号: 50908020)、国家西部交通建设科技项目(批准号: 200431881213)、陕西自然科学基金项目(批准号: SJ08E215)资助

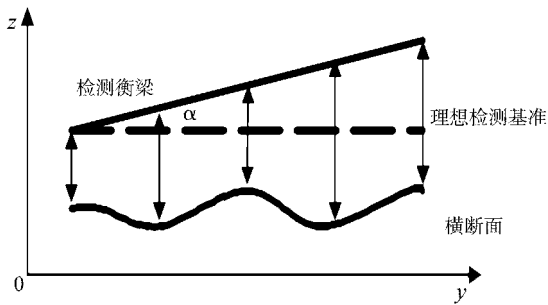


图 1 检测横梁倾斜时的横断面检测状态

检测横梁振动, 测得的横断面曲线 T'_i 为

$$T'_i = T_i + \tan \alpha^* y_i + b_i = \{(x_i, y_1, z'_{i1}) \times (x_i, y_2, z'_{i2}) \dots (x_i, y_m, z'_{im})\} \quad (2)$$

式中: α 为横梁相对于理想检测基准的倾角; b 为横梁相对于理想基准的截距. 要想得到横断面, 必须求出 α 和 b .

通常采用线性矫正法得到路面的横断面. 将检测得到横断面数据 (y_i, z_m) 代入直线方程

$$z'_{ij} = \tan \alpha^* y_j + b_i \quad (3)$$

得到

$$\begin{cases} z'_{i1} = \tan \alpha^* y_1 + b_i \\ z'_{i2} = \tan \alpha^* y_2 + b_i \\ \vdots \\ z'_{im} = \tan \alpha^* y_m + b_i \end{cases} \quad (4)$$

通过最小二乘法得到 α 和 b . 代入式(2)得

$$T'' = T' - (\tan \alpha^* y + b) \quad (5)$$

由式(5)即可准确计算横断面的车辙. 但是上式求得的 α 和 b 不是统一的检测基准面, 而是相对于横断面的线性回归基准面. 每个横断面拥有自己的基准, 各横断面之间没有统一的基准. 因此, 实际检测过程中只能检测横断面信息, 无法获得准确的三维信息. 要得到路面的三维曲面, 必须增加纵断面标高信息^[7-8].

为了得到路面的三维信息, 就要准确确定横断面检测中横梁相对于理想检测面的倾角和高度变化. 通过在横梁上引入 2 点纵断面信息, 就可以解决. 模型见图 2.

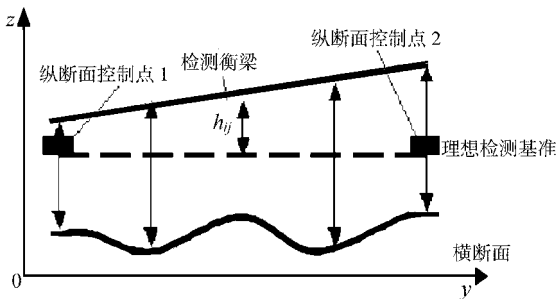


图 2 横断面和纵断面结合的三维重建模型

设纵断面控制点 1 的坐标为 (x_i, y_i, z_{i1}) , 纵断面控制点 2 的坐标为 (x_i, y_m, z_{im}) , 因为该坐标相对于标准检测面, 所以, 根据该两点的位置变化能准确得到第 i 点各横断面倾斜参数 α_i 和各点相对于基准面的高度变化 h_{ij} .

$$\tan \alpha_i = \frac{(z_{im} - z'_{im}) - (z_{i1} - z'_{i1})}{y_m - y_1} \quad (6)$$

$$h_{ij} = (z_{i1} - z'_{i1}) + \frac{j-1}{m} \times [(z_{im} - z'_{im}) - (z_{i1} - z'_{i1})] \quad (7)$$

式中: j 为横断面上第 j 个采样点; m 为横断面上总的采集点数; h_{ij} 为各点的振动因子; z'_{im} 为各点相对于倾斜横梁的检测高度.

由式(2)可知

$$T_i = T'_i - h_{ij} = \{(x_i, y_1, z'_{i1} - h_{i1}) \times (x_i, y_2, z'_{i2} - h_{i2}) \dots (x_i, y_m, z'_{im} - h_{im})\} \quad (8)$$

路面三维曲面 R 可表示为

$$R = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (x_1, y_1, z'_{11} - h_{11})(x_1, y_2, z'_{12} - h_{12}) \dots (x_1, y_m, z'_{1m} - h_{1m}) \\ (x_2, y_2, z'_{21} - h_{21})(x_2, y_2, z'_{22} - h_{22}) \dots (x_2, y_m, z'_{2m} - h_{2m}) \\ \vdots \\ (x_n, y_1, z'_{n1} - h_{n1})(x_n, y_2, z'_{n2} - h_{n2}) \dots (x_n, y_m, z'_{nm} - h_{nm}) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

路面三维重建结果如图 3 所示.

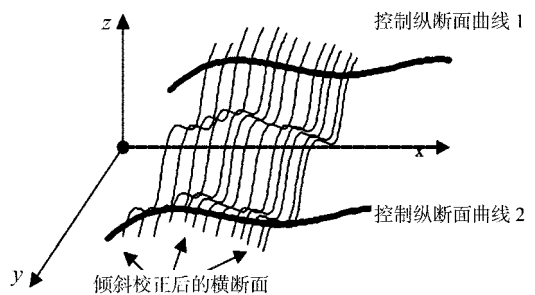


图 3 路面三维重建示意图

2 检测系统

2.1 系统结构设计

高速公路行车道路幅宽度为 3.75 m. 如果将传感器布置在整个车道宽度上, 车辆检测时将会严重影响到其他行驶车辆的安全, 为此刚性梁设计成如图 4 所示的双层伸缩结构. 为减小路面颠簸对传感器和刚性梁的影响, 整个结构通过专门

设计的减震系统悬浮在车体内,其中下层梁固定,上层梁可沿精密轨道自由伸缩.在运输或停放时,上层合上;测试时,上层向两边拉开.

31路激光位移传感器非均匀安装在检测梁上,其中轮迹带附近分布较密,两边较疏,两边激光位移传感器倾斜放置,使测量宽度达到3.75 m.

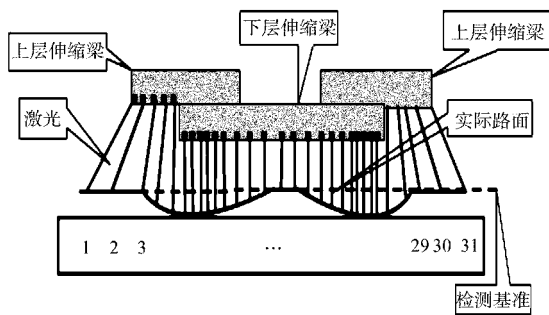


图4 路形检测系统结构

2.2 系统电路设计

系统要求能够快速测量整个车道,但由于传感器数量较多,对数据传输的实时性和可靠性要求很高.因此,采用了基于TCP/IP协议的以太网传输方式.其原理见图5.

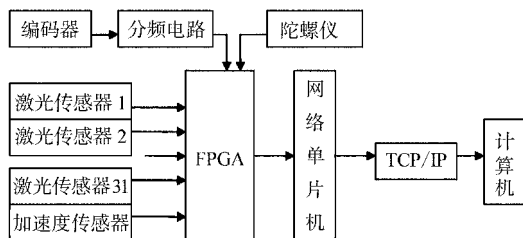


图5 三维路形测量系统数据传输原理

系统中激光位移传感器用于将路面相对高程转变为脉冲模拟信号;编码器和分频电路相当于距离传感器,用于计算行驶的里程,同时作为31路激光位移传感器的同步采集触发信号;加速度传感器感知系统的振动;陀螺仪获得路面的地理信息;FPGA主要完成各传感器信号的预处理;网络单片机在距离信号触发下同时完成各传感器的数据采集,遵照TCP/IP协议,通过以太网将采集数据发送至计算机^[9-10].

2.3 软件设计

路面三维形状激光检测软件主要包括采集和处理两部分.分为4个功能模块:(1)计算各传感器的测量值并记录.(2)对各传感器的测量值进行数据融合处理.(3)根据融合数据重建出路面的三维实体.(4)对重构的数字路面进行任意位置的纵剖或横剖,获得其相应位置的纵断面和横断面信息.

3 应用与检测结果

为了验证检测系统的精度,通过目测法选取6段道路,先用精密水准仪在30 m的路段上每隔0.25 m测出纵断面高程;在某位置用水准仪在3.75 m的宽度上每隔0.25 m测出横断面高程,然后运用激光路面三维检测系统在选取路段进行测试.

对重构的三维形状在水准仪检测的位置进行纵向剖切,获得相应位置的纵断面形状,见图7.图6为用水准仪测量的纵断面形状.

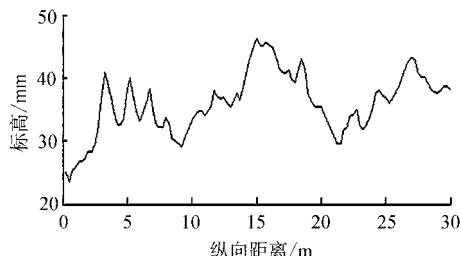


图6 水准仪检测结果(纵断面)

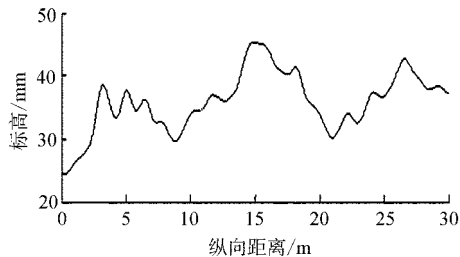


图7 路形检测系统检测结果(纵断面)

对重构的三维形状在水准仪检测的位置进行横向剖切,获得相应位置的横断面形状见图9.图8为用水准仪测量的横断面形状.

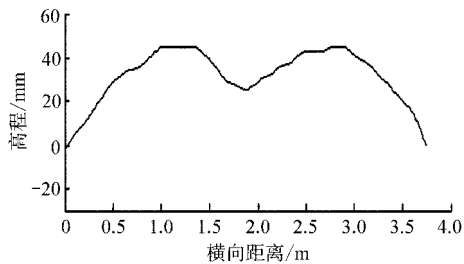


图8 水准仪检测结果(横断面)

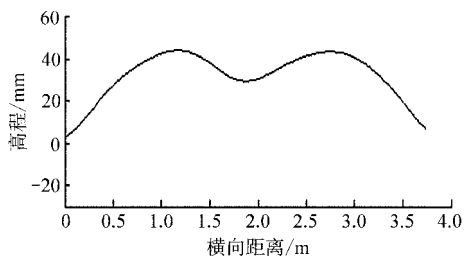


图9 路形检测系统检测结果(横断面)

从三维路形检测系统和水准仪的对比结果可以看出, 三维路形检测系统有很高的精度。

激光路面三维形状检测系统先后进行了安阳-鹤壁、武威-古浪、三门峡-观音堂等高速公路路段。检测速度 72 km/h, 检测宽度 3.75 m, 纵向采集间隔小于 0.05 m, 通过和选定路段横断面测量结果比较。以纵断面为基础的国际平整度指数 IRI 检测的最大误差小于 3%, 以横断面为基础的车辙检测的最大误差小于 2%。

4 结束语

基于多传感器数据融合的路面三维形状检测系统, 采用 TCP/IP 协议进行数据传输。根据检测的数据, 通过自主开发的软件能够准确的重构路面的真实形状, 并对重构的三维形状在任意位置进行剖切, 得到相应的纵断面或横断面形状。通过对断面信息计算可以获得国际平整指数和车辙深度等道路评价指标, 同时能够得到道路不同位置的相关性, 从而能为检测部门建立一个信息完整的数字路面信息库。

参考文献

[1] 严志刚, 盛洪飞, 陈彦江. 桥面平整度对大跨度钢管

混凝土拱桥车辆振动的影响[J]. 中国公路学报, 2004, 17(4): 44-48.

[2] 王新明, 王秉纲. 高速公路路面功率谱[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 53-56.

[3] 蔚晓丹. 国际平整度指数 IRI 作为路面平整度评价指标的研究[J]. 公路交通科技, 1999, 16(增1): 9-13.

[4] Sayers M W, Gillespie T D, O'Paterson W D. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements [R]. World Bank Technical Paper Number 46. The World Bank, Washington DC, January, PB86-165263, 1986.

[5] Lu Sun, Zhan Mingzhang, Jessoca Ruth. Modeling indirect statistics of surface roughness[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(2): 114-119.

[6] Thomas F. Statistical approach to road segmentation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(3): 300-308.

[7] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安: 长安大学信息工程学院, 2008.

[8] Chiu Liu, Herman R. Road profiles, vehicle dynamics and human judgment of serviceability of roads spectral frequency domain analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 33(4): 155-161.

[9] 马建, 宋宏勋. 高速公路养护质量激光检测技术及应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(6): 4.

[10] 马荣贵, 宋宏勋, 来旭光. 激光路面平整度检测系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 38-41.

Road Three-dimensional Shape Measurement Method with Multi-Laser Sensors

Wang Jianfeng¹⁾ Ma Jian¹⁾ Ma Ronggui²⁾ Song Hongxun³⁾

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)¹⁾

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)²⁾

(Institute of Applied Optoelectronics, Chang'an University, Xi'an 710064, China)³⁾

Abstract: In order to establish a complete, powerful three-dimensional shape database of the road, a measurement method with laser displacement sensors is presented. The structure principles and detection principles are provided. TCP/IP protocol is adopted to ensure the data transmitted with a high speed. According to data fusion treatment results of laser sensor signals, accelerometer signals and gyroscope sensor signals, using computer technology reconstructed three-dimensional shape of the road, a three-dimensional shape of the road database is established. The test results show that the method can measure the shape of the entire lane of the road surface with high accuracy, fast detection speed.

Key words: traffic engineering; road three-dimensional shape; 3D reconstruction; laser measure; data fusion