

基于 GPS 和车辙的三维路面重构

马荣贵, 汪花梅

(长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 提出了一种基于地理定位系统(GPS)和横断面车辙数据的路面三维重构模型. 针对 GPS 和车辙的采样间隔不同, 首先采用 Cardinal 插值算法对非等间距的离散 GPS 点插值, 并按间距需求选取等间距的插值点, 然后将序列化后的 GPS 插值数据与车辙数据融合, 构造出在三维空间中用于绘制三角形网格的顶点矩阵, 最后实现了三维重构路面的绘制. 实验表明用该方法重构的三维路面在路面车辙、坑槽及拥包的检测方面有很好的应用价值.

关键词: 道路工程; 三维路面重构; Cardinal 插值; 车辙; 地理定位系统

中图分类号: U416.06

文献标识码: A

Three-dimensional Road Reconstruction Based on GPS and Ruts

MA Ronggui, WANG Huamei

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

Abstract: A three-dimensional (3D) reconstruction model of road surface was proposed based on global positioning system (GPS) and rut of road cross-section. First, non-equidistant GPS points were interpolated on Cardinal interpolation algorithm by taking into account different sampling interval of GPS and ruts, then equidistant interpolation points were selected according to requirement. Subsequently, GPS and rut data were fused to construct vertices dot matrix which was used to draw triangle mesh in 3D space. Finally, an experiment system with 3D road model was developed. Practice shows that the method of 3D road surface reconstruction described above is useful to observe rut, pothole and swelling of road.

Key words: road engineering; 3D reconstruction of road surface; Cardinal interpolation; ruts; global positioning system

随着路面检测技术的快速发展,数据采集系统已相当成熟和完备,但相对滞后的路面重构技术却无法直观地将大量的检测数据应用到道路养护维修中^[1]. 传统的路面三维重构模型的数据一般来自从影像中提取的道路特征数据、采用地理定位系统(global positioning system, GPS)或全站仪野外测量的离散数据以及公路设计数据等^[2]. 建立的三维重构模型一般只能反映道路的宏观信息,如公路附属设施的定位及查询,公路周边地形环境等,而对于路面表面的行车安全信息如平整度、车辙等信息基本上不能直观地表现出来,特别是无法分析对行车安全危害最大的拥包(在行车水平力的作用下,使路面产生推移而形成局部不规则隆起的变形)和坑槽(在行车作用下,路面骨料局部脱落而产生的坑洼)信息,因此难以满足道路质量评估和养护的需求.

本文首先建立路面的三维重构模型,然后完成 GPS 和横断面车辙数据的融合,构造出用于绘制路面的三角形网格的点阵,最后基于 OpenGL 完成重构路面的绘制,实现真实路面三维仿真. 由此建立的三维路面,能够将道路检测数据准确地再现,便于决策者直观地观察路面的坑槽和拥包,有效地推动了路面的数字化管理.

1 路面三维重构模型

由于检测车采集道路数据时的采样频率或空间步长不同,为了实现数字路面的三维显示,建立一个统一的坐标系十分重要^[3]. 本文建立了以路面里程为 X 轴,横断面为 Y 轴,各点相对高程为 Z 轴的三维坐标系来完成三维重构,如图 1 所示. 其中线段 AB 是被测路面的起始横断面, C 为路面上的任意点, x_i 为各点的里程坐标, y_j ($j=1, 2, \dots, m$) 为各点的横断面坐标, z_{ij} 为各点的相对高程坐标.

次数. 由于车辙的采样步长是固定的, GPS 是非等间距的, 所以为了完成 GPS 与车辙的融合, 需要在以原始 GPS 点为控制点进行插值后的点序列中选出与车辙采样次数相同的个数的点, 且所选取的这些点要求是等间距的.

选取等间距 GPS 点的处理方法为, 在 GPS 曲线上选出使每一段弧长相等的 GPS 点. 首先对 GPS 数据从第一个点开始做累加操作, 直到该弧长等于目标长度, 则将该点纳入等间距点的集合, 并从该点重复以上操作直至完成. 如一条由 20 个控制点构成的曲线, 需要选择 1 000 个弧长相等的曲线点, 那么首先可设 $\Delta u = 0.000 1$, 也就是在每 2 个控制点间将构造出 10 000 个插值点, 这样整条曲线总共有 19 万个插值点. 然后对这 19 万个点间距离求和, 得到曲线的弧长为 k , 接着从曲线的起始点开始查找, 找到每一个累加点间距离为 $nk/1 000$ 的点 ($n = 1, 2, \dots, 1 000$), 这些点就是 1 000 个满足要求的等间距点. 至此, 完成了 GPS 点的插值以及等间距点筛选的操作.

2.2 GPS 扩展

GPS 插值后的等间距点在三维坐标系中只能绘制出一条曲线, 即道路的中心线. 然而道路并不是简单的一维线段, 它是有一定宽度的面状实体, 有一个或多个车道组成的复杂对象^[5]. 由于横断面车辙是由检测车横向刚性梁上以间距 d 均匀排列 23 个准直激光传感器采集到的, 因此首先把道路中心线以一车道宽度扩展成二维平面, 最后融合横断面上的 23 路车辙数据, 生成绘制三维图形所需的网格顶点阵.

GPS 扩展示意图如图 2 所示, X 轴方向为经度, Y 轴方向为纬度, 其中 p_1, p_2, p_3 是以 GPS 点为控制点插值后筛选出的点, 代表了道路的中心线, 连线 $p_1 p_2$ 和 X 轴的夹角为 α . A, B 分别表示以一定车道宽度扩展后的道路左右两边的点, 扩展步骤首先分为以下三步: ①相邻两个插值点连线, 过其中一个点做该连线的垂线段, 垂线段的长度设定为路面的宽

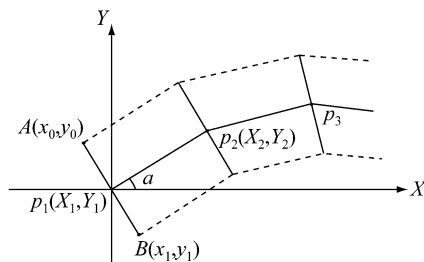


图 2 GPS 扩展

Fig.2 GPS extended

度; ②根据路面宽度, 以道路中心线上的点为中心, 在垂线段上取等间距的两点, 这两点即为扩展后得到的点; ③重复步骤①和步骤②, 直至所有 GPS 点扩展完成.

根据以上对扩展步骤的分析, 具体的扩展过程如下:

$p_1(X_1, Y_1), p_2(X_2, Y_2)$ 分别为两个有序的 GPS 插值点, 连接 p_1, p_2 两点, 过 p_1 点作 $p_1 p_2$ 的垂线 AB , 设 $p_1 p_2$ 的斜率为 k , 则有: $k = (Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1) = \tan \alpha$. 设一个车道的宽度为 d , 则 $AB = d$, 那么:

$$P_1 A = p_1 B = d/2$$

根据图 2 可以求出 A, B 两点的经纬度. 设 A 点经纬度为 (x_0, y_0) , B 点经纬度为 (x_1, y_1) , 过 p_1 点作 $p_1 p_2$ 的垂线 AB , AB 与 Y 轴的夹角也为 α , 那么, A, B 两点的经纬度值分别为

$$\begin{cases} x_0 = X_1 - (d/2) \cdot \sin \alpha \\ y_0 = Y_1 + (d/2) \cdot \cos \alpha \\ x_1 = X_1 + (d/2) \cdot \sin \alpha \\ y_1 = Y_1 - (d/2) \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

扩展后, 可计算出 A 点的经纬度值是 (x_0, y_0) , B 点的经纬度值是 (x_1, y_1) .

任意一横断面上有均匀间隔的 23 路车辙数据, 为了完成任意一横断面上 GPS 与车辙的融合, 接下来需要根据横断面中心线上的点和对应左右两边的扩展点完成横断面上均匀间隔点的经纬度的计算. 根据 A, B 两点的经纬度值, 在 A, p_1 和 B, p_1 之间分别均匀间隔生成 10 个插值点, 求出每一点的经纬度坐标. 这些插值点和 A, p_1, B 总共是 23 个点, 这 23 个点的经纬度坐标均已知, 并且在同一高程, 其高程值为 Z_i .

以此类推, 可以利用第 2 个和第 3 个 GPS 点, 第 3 个和第 4 个 GPS 点一直扩展下去, 直到完成倒数第 2 个 GPS 点的扩展, 对于最后一个 GPS 点, 可以反向和倒数第 2 个 GPS 点进行扩展, 此时所有的 GPS 扩展完毕. 这样在三维路面重构模型中, 融合基于纵断面的 GPS 信息和基于横断面的车辙信息, 就能够成功建立基于纵断面 GPS 和横断面车辙的三维路面.

2.3 GPS 高程和车辙的融合

路面横断面车辙采集过程中, 检测横梁须保持统一的测量基准, 检测横梁上均匀布置有 23 路激光位移传感器, 检测车在任意一个横断面上采集 23 路车辙数据, 记录为 d_1, d_2, \dots, d_{23} , 如图 3 所示.

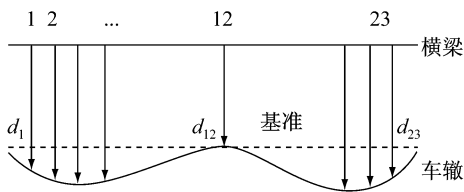


图 3 路面横断面车辙模型

Fig.3 Ruts model of road cross-section

以中间一路数据 d_{12} 为基准, 设各路车辙数据相对于基准的高程差为 l_1, l_2, \dots, l_{23} , 那么有:

$$\begin{cases} l_1 = d_1 - d_{12} \\ \vdots \\ l_{12} = d_{12} - d_{12} = 0 \\ \vdots \\ l_{23} = d_{23} - d_{12} \end{cases} \quad (6)$$

由于 GPS 安装在检测车车顶, 且位于检测横梁的正上方, 故系统中采集的高程点是在车顶, 所以 GPS 高程要减去检测车的高度, 这样得到的高程值才是路面高程. 本系统中检测车是由依维柯中型客车改装而成, 检测车的高度是 h 为 2.5 m. 已知 GPS 采集的高程是 Z_i , 假设实际大地高程是 Z'_i , 则有:

$Z'_i = Z_i - h$. 那么可以得知任意一个横断面上有:

$$\begin{cases} z_{i1} = Z'_i + l_1 \\ z_{i2} = Z'_i + l_2 \\ \vdots \\ z_{i,23} = Z'_i + l_{23} \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7), 可以计算出每一个横断面上采集的车辙深度在大地坐标系中的高程, 即在上文三维重构模型中的 z 值, 这样便完成了 GPS 和车辙的融合.

当路面倾斜导致车体以及车体上的采集横梁倾斜时, 检测横梁沿理想基准面产生一个倾角 α , 由于准直激光束是与刚性横梁垂直的, 所以激光束也旋转了一个角度. 此时激光束照射在路面上的位置与理想基准面照射到路面上的位置相比产生了一个横向的偏差且采集的车辙是垂直于横梁的斜高. 而 GPS 的高程是竖直的, 此时为了融合 GPS 和车辙, 首先要对采集的车辙进行一个处理. 假设基准面上的检测得到的横断面车辙曲线为 T , 检测横梁侧倾振动后测量到的横断面车辙曲线为 T' , 根据 T 和 T' 的关系以及侧倾后检测横梁与理想检测基准面的夹角 α , 运用最小二乘法去除检测结果中的趋势项^[6], 就可以得到近似于理想检测基准面的横断面曲线, 那么就可以求出各路车辙数据相对于基准的高程差

l_1, l_2, \dots, l_{23} . 此时, 再利用式(7)完成 GPS 和车辙的融合.

实际的路面可以表示为一个连续的三维函数, 然而检测车采集所得到的数据是由大量的 GPS 和横断面车辙离散点所组成的集合, 融合 GPS 和车辙数据, 在已经建立好路面三维模型中, 构成一个离散有序的点阵, 通过 OpenGL 将其以三角形网格的形式绘制出来. 由于横断面数据采集的激光头个数有限, 所以激光头间距较大, 导致构造出的三维路面不够光滑. 为了绘制出光滑逼真的三维路面, 试验中最后采用了内插法完成了三维曲面的插值.

3 基于 OpenGL 的三维路面绘制

基于 OpenGL 的三维图形绘制的本质是利用 OpenGL 图形库所提供的函数来绘制虚拟空间中的点、线、面, 通过对这些图元的绘制、移动、组合以及光照和渲染并最终投影到计算机显示屏上, 从而在视觉上形成逼真于真实空间的物体, 这在某种程度完成了对现实世界物体的仿真显示. 组成三维图形的基本图元的绘制取决于 OpenGL 三维空间中点的坐标值, 称这些点为顶点, 三维空间中所有的直线、曲线、平面或曲面都是由无数的顶点组成的.

试验中采用以上的理论和方法完成了三维路面的绘制, 运用 OpenGL 图形库在 Visual Studio2005 编程环境下开发了测试软件. 为完成路面的三维重构, 2010 年 12 月在河南洛阳选取了一段坑槽、拥包较多的路面进行检测, 最终实现的三维重建效果如图 4—5 所示.

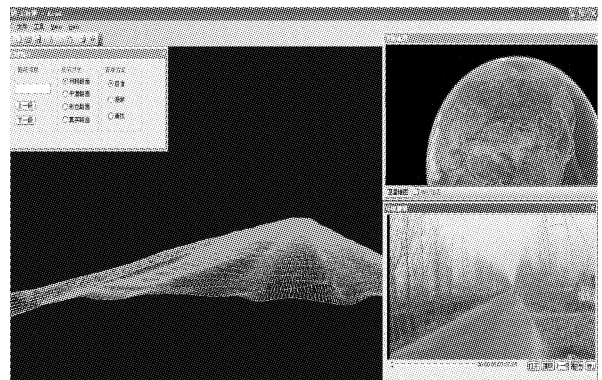


图 4 三维重构网格路面

Fig.4 3D reconstruction of grid road

如图 4 所示, 在已建立的网格路面上, 可以很明显地观察出路面的车辙. 由于重构中融合了 GPS 经度和纬度信息, 在重构的三维路面中可以体现出该段

路程道路的轨迹,故重构的路面更加逼真于真实的路面.如图 5 所示的彩色路面,是根据路面高程给三维路面渲染不同的颜色,通过颜色的变化来表现路面的高低起伏.在该图红色方框区域是两个坑槽,在重建路面上明显可以看出对应的两个坑槽.并在后期处理中计算坑槽的容积.

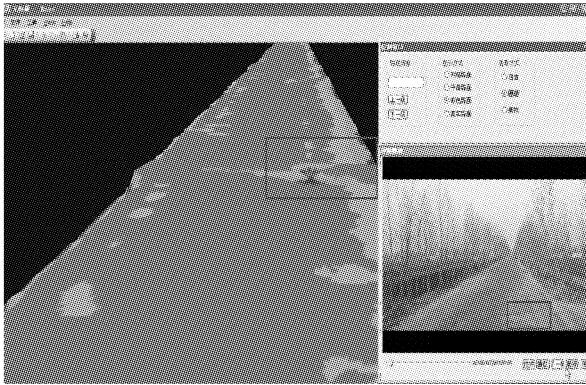


图 5 三维重构彩色路面

Fig. 5 3D reconstruction of color road

实验中将重构的三维路面和道路环境视频相结合,可以实现三维路面和环境视频文件的同步播放,在三维路面漫游的同时可以观测到对应路面的真实路况环境.还可以在观看道路视频同时,如果发现视频中路面上有坑槽,直接把三维路面定位到相应的位置,查看坑槽的形状和容积.最后将此信息提供给相应的管理部门决策者,在制定路面养护规划上将有着重大指导作用.

4 结语

本文首先建立了路面三维重构模型,并完成了 GPS 和车辙的融合,绘制出了三维网格路面,三维彩色路面和纹理路面.在重构的三维路面上可以查看

路面车辙以及道路轨迹,同时可以查看路面的坑槽和拥包,能够立体直观地观察路面破损情况,为制定养护方案提供重要的数据依据.

参考文献:

- [1] 啜二勇. 国外路面自动检测系统发展综述[J]. 交通标准化, 2009(17):96.
CHUO Eryong. Development summary of international pavement surface distress automatic survey system [J]. Transport Standardization, 2009(17):96.
- [2] 左小清,李清泉,唐炉亮. 公路三维模型建立与数据组织[J]. 武汉大学学报, 2004, 29(2):179.
ZUO Xiaoqing, LI Qingquan, TANG Luliang. 3D modeling and data organization of highway [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(2):179.
- [3] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安:长安大学公路学院, 2008.
MA Ronggui. Study on the principle and method of road three dimension measurement system [D]. Xi'an: School of Highway of Chang'an University, 2008.
- [4] 左小清,李清泉,谢智颖. 基于车道的道路数据模型[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(2):73.
ZUO Xiaoqing, LI Qingquan, XIE Zhiying. Lane-based road data model [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2):73.
- [5] 杨益明,文爱民,刘奕贯. 三维路面模型的构建及其在 Adams 中的验证[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12):140.
YANG Yiming, WEN Aiming, LIU Yiguan. Reconstruction of 3D road model and its verification based on adams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12):140.
- [6] 王建锋,马建,马荣贵,等. 路面三维检测技术研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(6):1202.
WANG Jianfeng, MA Jian, MA Ronggui, et al. Road Three-dimensional shape measurement method with multi-laser-sensors [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2010, 34(6):1202.