

文章编号:1671-8879(2008)05-0027-04

基于 GPS 的公路路面裂缝定位方法

徐 琨¹, 贺昱曜¹, 孙朝云¹, 裴建中²

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:裂缝定位是路面裂缝检测与识别系统的关键问题之一。结合实际工程应用,给出了一种基于 GPS 的裂缝定位方法。首先应用正交多项式拟合的方法对原始定位数据进行误差校正,采用高斯投影获得平面定位数据;然后确定裂缝的相邻里程桩位置,使用分段插值方法插值出中间点坐标;最后计算出裂缝距最近里程桩的累积距离。结果表明,该算法应用于车速分别为 50、60、70 km/h 的路面裂缝定位,最小误差为 0.336 8 m,最大误差为 5.562 3 m,满足了系统设计的要求。

关键词:道路工程;路面裂缝;GPS 定位;数据处理

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

Pavement crack positioning based on GPS

XU Kun¹, HE Yu-yao¹, SUN Chao-yun¹, PEI Jian-zhong²

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

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Location is one of the key problems in pavement crack detection and recognition system. A method based on GPS is proposed with engineering application. The method of fitting based on orthogonal polynomial is used to remove the error, and the planar coordinates are got after Gauss projection firstly. The positions of the adjacent between two piles about the crack and the media dots are got applying interpolation algorithm. At last, the accumulated distance from the crack to the nearest pile are calculated. This algorithm is applied to locating the cracks when the vehicle's velocity is 50 km/h, 60 km/h and 70 km/h respectively, the minimum error is 0.336 8 m, and the maximum error is 5.562 3 m. Those results show this method can satisfy the design demands of the system. 1 tab, 4 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; pavement crack; GPS positioning; data procession

0 引 言

传统的路面裂缝检测主要采用人工检测,测量精度差、效率低。随着计算机数据处理速度、容量等

性能的提高,数字图像处理技术越来越多地应用于路面裂缝检测中^[1]。国外发达国家已开始将数字图像处理应用于公路路面裂缝检测中,如 20 世纪 80 年代美国的 PCES 系统^[2]。中国在这方面的研究起

收稿日期:2007-10-20

基金项目:特殊地区公路工程教育部重点实验室资助项目(KLP200501)

作者简介:徐 琨(1974-),女,陕西西安人,讲师,工学博士研究生,E-mail: xkun@chd.edu.cn.

步较晚,吉林大学从 2002 年开始对路面破损自动检测系统进行研究,并取得了一定的成果^[3-4];哈尔滨工业大学 2003 年开始了设备与算法方面的研究^[5],但离实际使用还有一定距离。裂缝定位是沥青路面裂缝检测与识别系统的关键技术之一。GPS 系统是裂缝定位的重要手段,但由于各种误差存在,定位精度一般较低。目前常用的差分 GPS 技术^[6]、多传感器数据融和方法^[7-8]虽然能有效提高 GPS 定位精度,但都需要投入额外资金。为此,本文结合沥青路面裂缝检测与识别系统开发过程中的实际应用,给出了基于 GPS 数据处理的裂缝定位方法,获得了较

为准确的裂缝定位结果。

1 沥青路面裂缝检测与识别系统

沥青路面裂缝检测与识别系统包括成像模块、供电模块、计数触发模块、补光模块、数据处理模块。GPS 接收机采集路面图像的空间属性信息,通过 GPS 接收机与单片机产生计数脉冲,控制摄像机采集频率。数据处理压缩图像数据,完成 GPS 数据处理,并将路面图像文件数据和空间属性数据存入数据库,图像分析完成路面图像的去噪、边缘检测以及特征识别。系统结构见图 1。

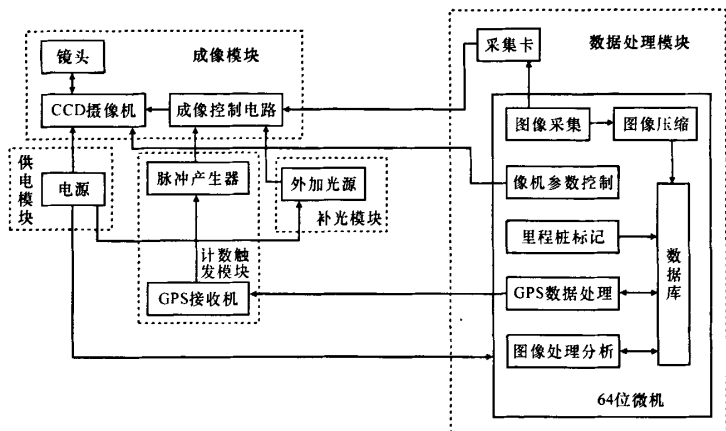


图 1 沥青路面裂缝检测与识别系统结构

2 GPS 数据处理

系统采用 GARMIN eTrex Legend C GPS 接收机,定位误差为 15~30 m,采样周期为 2 s,输出数据采用 WGS-84 坐标系。系统设计检测车以最高车速 70 km/h 拍摄路面图像,裂缝定位精度为 6 m。因此,需要对 GPS 原始数据进行后续的数据处理,主要包括误差校正、坐标转换和插值计算。

2.1 误差校正

根据多项式逼近理论,只要选择合适的模型参数和模型阶数,车辆在一段时间内的运动轨迹总可以通过多项式表达。因此系统采用正交多项式拟合的方法去除误差。设在一段时间内有 m 个观测样本 $\{f(x_i) \mid i = 1, 2, \dots, m\}$, x_i 表示观测时间, $f(x_i)$ 表示观测值。在函数空间 S 中求最小二乘逼近函数

$$P_n^*(x) = \sum_{j=0}^n a_j^* p_j(x), \text{ 使}$$

$$\min_{P(x) \in S} \sum_{i=0}^m \omega_i [f(x_i) - P_n(x_i)]^2 =$$

$$\sum_{i=0}^m \omega_i [f(x_i) - P_n^*(x_i)]^2$$

式中: $P_n(x_i)$ 为 n 次多项式; $p_j(x)$ ($j = 0, 1, \dots, n$) 为正交多项式; a_j^* 为系数; ω_i 为权系数,表明样本数据的可靠性。

为了避免求解方程组,选择关于给定点集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与权系数 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 正交的多项式组 $\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 做基底,用递推关系可表示为 $\varphi_0(x) = 1, \varphi_1(x) = x - \alpha_1, \varphi_{k+1}(x) = (x - \alpha_{k+1}) \cdot \varphi_k(x) - \beta_{k+1} \varphi_{k-1}(x)$,

$$\alpha_{k+1} = \frac{(x \varphi_k, \varphi_k)}{(\varphi_k, \varphi_k)} = \frac{\sum_{i=0}^m \omega_i x_i \varphi_k^2(x_i)}{\sum_{i=0}^m \omega_i \varphi_k^2(x_i)} \quad k = 0, 1, \dots, n-1,$$

$$\beta_{k+1} = \frac{(\varphi_k, \varphi_{k-1})}{(\varphi_{k-1}, \varphi_{k-1})} = \frac{\sum_{i=0}^m \omega_i \varphi_k^2(x_i)}{\sum_{i=0}^m \omega_i \varphi_{k-1}^2(x_i)} \quad k = 1, 2, \dots, n-1$$

此时,系数 a_j^* 为

$$a_j^* = \frac{(f, \varphi_j)}{(\varphi_j, \varphi_j)} = \frac{\sum_{i=0}^m \omega_i f(x_i) \varphi_j(x_i)}{\sum_{i=0}^m \omega_i \varphi_j^2(x_i)}$$

通过正交多项式拟合后,将拟合值 $P_n^*(x)$ 作为测量真值的最优估计,则 GPS 测量误差值 $e(x_i)$ 为

$$e(x_i) = f(x_i) - P_n^*(x_i)$$

图 2(a)、(b) 分别是采用 10 阶正交多项式对纬度、经度数据的拟合结果,图 2(c)、(d) 分别是分离出的纬度、经度误差数据。

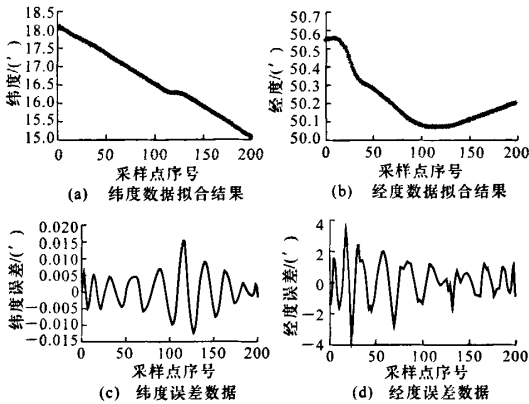


图 2 数据拟合结果与误差数据

2.2 GPS 数据坐标转换

由于 GPS 接收机输出数据采用 WGS-84 坐标系,地面上的点用大地经度 L 、大地纬度 B 和大地高度 H 表示,难以进行距离等参数的计算,因而应将椭球面上各点的大地坐标按照一定的规律投影到平面上,并以相应的平面直角坐标表达。目前较常用的是高斯投影,该投影使得椭球面上任一角度,投影到平面后保持不变,在小区域范围内保证平面图形与椭球面上的图形保持一致。WGS-84 坐标 (B, L) 转换为平面直角坐标 (x, y) 的转换公式为

$$\begin{aligned} x &= X_0 + Nt(l\cos(B))^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{24}(5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4)(l\cos(B))^2 + \frac{1}{720}(61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330\eta^2 t^2)(l\cos(B))^4 \right], \\ y &= Nl\cos(B) + \frac{1}{6}N(1 - t^2 + \eta^2)(l\cos(B))^3 + \frac{1}{120}N(5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2) \cdot (l\cos(B))^5 \end{aligned}$$

式中: N 为投影点的卯西圈曲率半径; $N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2(B)}$; a 为椭球长半径, $a = 6\,378\,137\text{ m}$;

e 为椭球第一偏心率, $e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$; b 为椭球短半径,

$b = 6\,356\,752.314\,2\text{ m}$; $t = \tan(B)$; $l = L - L_0$; L_0 为投影带的中央经线经度; $\eta = e' \cos(B)$; e' 为椭球

第二偏心率, $e' = \sqrt{\frac{a^2}{b^2} - 1}$; X_0 为当 $l = 0$ 时,从赤道起计算的子午线弧长,其计算公式为

$$X_0 = a(1 - e^2)[A_0 B + A_2 \sin(2B) + A_4 \sin(4B) + A_6 \sin(6B) + A_8 \sin(8B)]$$

其中

$$A_0 = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{350}{512}e^6 + \frac{11\,025}{16\,834}e^8,$$

$$A_2 = -\frac{1}{2}(\frac{3}{4}e^2 + \frac{60}{64}e^4 + \frac{525}{512}e^6 + \frac{17\,640}{16\,834}e^8),$$

$$A_4 = \frac{1}{4}(\frac{15}{64}e^4 + \frac{210}{512}e^6 + \frac{8\,820}{16\,834}e^8),$$

$$A_6 = \frac{1}{6}(\frac{35}{512}e^6 + \frac{2\,520}{16\,834}e^8),$$

$$A_8 = \frac{1}{8}(\frac{3\,150}{16\,834}e^8).$$

由于地球椭球是不可展的曲面,因此在高斯投影中,长度除中央子午线外均存在变形,距中央子午线越远,长度变形越大。为了限制长度变形,并根据系统定位的误差范围,本文采用 3 度带,即从 $1^\circ 30'$ 起,自西向东每隔经差 3° 为一个投影带,全球分为 120 个投影带。带号 n 与相应的投影带中央经线经度 L_0 的关系为 $L_0 = 3n$ 。西安地区 $L_0 = 108^\circ$ 。

2.3 数据插值

系统使用的 GPS 接收机的采样周期为 2 s,裂缝图像定位精度差。因此,需要采用插值法得到中间点的坐标。为了减小误差,系统采用分段插值函数,即根据插值点的位置关系自适应地选择插值方法。设在时刻 T_{i-1} 、 T_i 、 T_{i+1} 的采样点坐标依次为 (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 。

若 $|k_{i-1,i} - k_{i,i+1}| \leq \epsilon$, 则 $T(T_{i-1} < T < T_i)$ 时刻的高斯平面坐标 (x, y) 为

$$x = \frac{T - T_i}{T_{i-1} - T_i} x_{i-1} + \frac{T - T_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} x_i,$$

$$y = \frac{T - T_i}{T_{i-1} - T_i} y_{i-1} + \frac{T - T_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} y_i.$$

若 $|k_{i-1,i} - k_{i,i+1}| > \epsilon$, 则 $T(T_{i-1} < T < T_i)$ 时刻的高斯平面坐标 (x, y) 为

$$x = \frac{(T - T_i)(T - T_{i+1})}{(T_{i-1} - T_i)(T_{i-1} - T_{i+1})} x_{i-1} +$$

$$\frac{(T - T_{i-1})(T - T_{i+1})}{(T_i - T_{i-1})(T_i - T_{i+1})} x_i +$$

$$y = \frac{(T - T_{i-1})(T - T_i)}{(T_{i+1} - T_{i-1})(T_{i+1} - T_i)} x_{i+1} + \frac{(T - T_i)(T - T_{i+1})}{(T_{i-1} - T_i)(T_{i-1} - T_{i+1})} y_{i-1} + \frac{(T - T_{i-1})(T - T_{i+1})}{(T_i - T_{i-1})(T_i - T_{i+1})} y_i + \frac{(T - T_{i-1})(T - T_i)}{(T_{i+1} - T_{i-1})(T_{i+1} - T_i)} x_{i+1}$$

式中: $k_{i-1,i}$ 表示相邻采样点 $(i-1, i)$ 的斜率。

3 裂缝定位方法

系统通过安装在检测车顶部的线阵摄像机将路

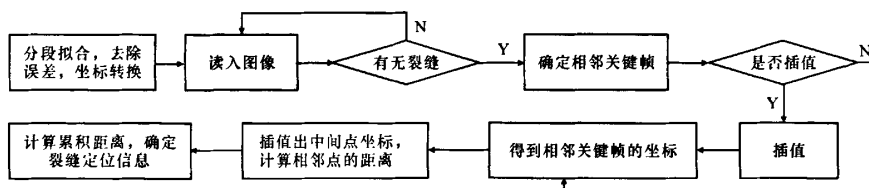


图3 定位算法流程

首先对原始定位数据分段拟合, 去除误差, 将去除误差后的数据转换为平面坐标。对于含有裂缝的图像依据关键帧号确定与其相邻的两个里程桩, 在 GPS 数据表中依据时间信息查找这两个里程桩的定位坐标, 若该时间无对应 GPS 定位数据, 则插值该点坐标。车辆在短时间内可认为匀速运动, 其行驶轨迹近似为一条直线。考虑到系统设计检测车最高车速为 70 km/h, 可插值出这两个里程桩间隔为 0.5 s 的中间点的坐标。最后计算相邻两点的直线距离, 并计算出裂缝图像距离两个里程桩的累积距离, 以其中最小值作为路面裂缝的位置^[9]。

为了验证算法的有效性, 课题组于 2007 年 8 月在西安市西三环分别以 50、60、70 km/h 的车速采集了路面裂缝信息。图 4 给出了不同车速的定位误差曲线。表 1 给出了各车速定位误差的最小误差、最大误差和均方误差。可以看出, 各车速的裂缝定位最小误差为 0.336 8 m, 最大误差为 5.562 3 m, 满足系统设计要求。并且随着车速的增加, 误差亦呈一定的增长趋势, 这主要是由于车速增加使得手

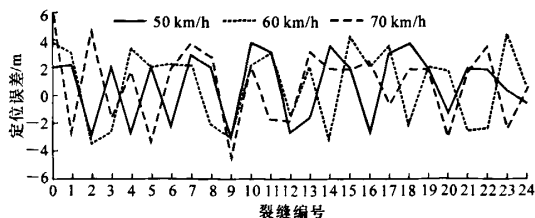


图4 不同车速的定位误差曲线

面图像以 jpeg 文件形式保存, 文件名记录采样顺序, 将文件相关信息写入路面图像数据表中。同时, 将 GPS 定位信息写入 GPS 数据表中。根据路旁的里程桩, 手动标记里程, 系统将里程桩号、对应关键帧号、标记时间写入里程桩表中。系统设计采集过程的图像数据量达到 38.9 MBytes/s, 为了适应高速现场采集的要求, 裂缝定位使用离线处理。

路网中任一条公路上的任意一点均可由起始路线编号和里程桩进行定位。因此, 系统采用公路里程桩与高斯平面直线距离相结合的定位方法。算法流程如图 3 所示。

动标记里程桩信息不准确造成的。可考虑添加面阵摄像机, 在记录路面裂缝图像的同时, 该摄像机记录路旁里程桩影像, 两摄像机时间同步, 就能获得更加准确的里程桩位置信息。

表1 不同车速的定位误差统计信息

误差类别	不同车速(km/h)时的误差/m		
	50	60	70
最小误差	0.336 8	0.579 2	0.410 1
最大误差	3.721 2	4.284 4	5.562 3
均方误差	2.449 0	2.747 0	2.774 0

4 结 语

(1) 选择关于给定点集和权系数正交的多项式做基底拟合检测车行驶轨迹, 分离出误差数据。对 GPS 原始定位数据进行高斯投影, 获得定位点的平面坐标, 便于计算两点间的距离。采用分段插值函数插值出间隔 0.5 s 的中间点的坐标, 提高了定位精度。

(2) 给出了详细的路面裂缝定位方法。运用该方法确定的裂缝最小误差为 0.336 8 m, 最大误差为 5.562 3 m, 平均均方误差为 2.656 7 m, 满足了系统设计要求。

(3) 目前大多数文献只是讨论各种裂缝的识别算法, 而对裂缝的具体定位却很少涉及。本文给出的定位方法对相关问题的解决具有借鉴意义。

(下转第 44 页)

- 24(6):1-6.
HAO Pei-wen, XU Jin-zhi, ZHOU Huai-zhi. Key technologies of aggregate blending by Bailey method [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6):1-6.
- [4] 吕文江, 陈爱文, 郝培文, 等. 贝雷法参数 CA 比对沥青混合料性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4):5-8.
LU Wen-jiang, CHEN Ai-wen, HAO Pei-wen, et al. Effect of CA ratio on asphalt mixture property based on Bailey method[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4):5-8.
- [5] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(1):32-37.
CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on design method of multilevel dense built-in gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1):32-37.
- [6] 张肖宁, 王绍怀, 吴旷怀, 等. 沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J]. 公路, 2001(12):17-21.
ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai, WU Kuang-huai, et al. CAVF method of asphalt mixture design [J]. Highway, 2001(12):17-21.
- [7] Pine W J, Gerald P E, Huber A. The Bailey method of gradation selection heritage research group [M]. Indiana: Indianapolis, 2000.
- [8] 吴旷怀, 张肖宁. 沥青混合料设计综述[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2005, 4(5):456-461.
WU Kuang-huai, ZHANG Xiao-ning. Summarization on methods of asphalt mixture design[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2005, 4(5):456-461.
- [9] JTJ 052-2000, 公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [10] JTG E42-2005, 公路工程集料试验规程[S].
- [11] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].

.....
(上接第 30 页)

参考文献:

References:

- [1] 张娟, 沙爱民, 高怀钢, 等. 基于数字图像处理的路面裂缝自动识别与评价系统[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(2):18-22.
ZHANG Juan, SHA Ai-min, GAO Huai-gang, et al. Automatic pavement crack recognition and evaluation system based on digital image processing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2):18-22.
- [2] Kelvin C P W. Designs and implementations of automated systems for pavement surface distress survey [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2000, 6(1):24-32.
- [3] 储江伟, 初秀民, 王荣本, 等. 沥青路面破损图像特征提取方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(A10):1211-1217.
CHU Jiang-wei, CHU Xiu-min, WANG Rong-ben, et al. Research on asphalt pavement surface distress image feature extraction method [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(A10):1211-1217.
- [4] 王超, 王荣本, 初秀民, 等. 路面破损检测自动定位技术[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2003, 33(3):19-23.
WANG Chao, WANG Rong-ben, CHU Xiu-min, et al. Positioning method in pavement surface distress detecting system [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2003, 33(3):19-23.
- [5] 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):66-69.
HOU Xiang-shen, WANG Zhe-ren, LIU Zhen-peng. Research on equipments and technologies for pavement distress image collection and procession[J]. Highway, 2003(2):66-69.
- [6] Eenge P, Kalafus R, Ruane M. Differential operation of the global positioning system [J]. IEEE COM MAG, 1998, 26(7):48-60.
- [7] 于德新, 杨兆升, 刘雪杰. 基于卡尔曼滤波的 GPS/DR 导航信息融合方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2):65-69.
YU De-xin, YANG Zhao-sheng, LIU Xue-jie. GPS/DR navigation data fusion method based on Kalman filter [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2):65-69.
- [8] 赵梅, 张三同, 朱刚. 改进粒子滤波算法在组合导航中的应用[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2):108-112.
ZHAO Mei, ZHANG San-tong, ZHU Gang. Application of improved particle filter algorithm to integrated navigation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2):108-112.
- [9] 熊永清. GPS 观测值的最佳多项式拟合[J]. 测绘通报, 1997(8):2-4.
XIONG Yong-qing. The best polynomial fit of GPS data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 1997(8):2-4.