

文章编号: 1001-1595(2011)01-0111-07

# 基于 GPS 的列控轨道地图数据生成方法研究

刘 江<sup>1,2</sup>, 蔡伯根<sup>1</sup>, 唐 涛<sup>2</sup>, 王 剑<sup>1,2</sup>

1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044

## Research on GPS Based Track Map Data Generation Method for Train Control

LIU Jiang<sup>1,2</sup>, CAI Baigen<sup>2</sup>, TANG Tao<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>

1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: To meet different level requirements of train positioning and control, the track map data for train control consists of private data, track data and terrain environment data, and the track data are divided into feature layer and interpolation layer under different scales, which could contribute to complete structure of the track map. To huge GPS measurements, the multi-points weighted distance discrimination and Kalman estimation are applied to reject incorrect data; with improvement of Douglas Peucker method, in which the original data are divided as the track curve feature and the limited error is adjusted dynamically, certain feature points are selected to describe the real track under low scale; based on the feature point set, interpolation points are generated by inverse calculation of cubic B spline curve and equidistance interpolation as certain distance resolution, which could refine the track description under high scale. With the replenishment of mileage information, the generation of track map data could be realized completely. Calculation results with measurement data from Qinghai-Tibet railway show that, the method could meet various requirements of train positioning and control, with simple calculation and engineering realization.

Key words: track map data; GPS; train control; data reduction; cubic B spline

摘 要: 为满足列车运行控制及列车定位不同层次的需求, 将轨道地图数据分为轨道专用数据、轨道线路数据及地形环境数据, 并对轨道地图线路数据按照不同尺度划分为特征点层及插值点层, 形成列控轨道地图结构。针对原始 GPS 地图测量数据, 采用多点加权距离检验及 Kalman 估计差值检验实现错误数据剔除; 根据轨道曲线特征对原始数据进行划分, 通过在各划分段内动态调整约减限差, 选取|定数量的轨道线路特征点在低尺度上实现轨道线路描述; 基于所求得特征点, 采用三次 B 样条曲线反算生成拟合曲线, 并按照|定的距离分辨率进行等距离插值, 在高尺度上细化轨道曲线特性; 通过地图数据点里程信息补充, 完整实现列控轨道地图数据的生成。青藏线实测数据计算结果表明, 该方法计算简单, 易于工程实现。

关键词: 轨道地图数据; GPS; 列车运行控制; 数据约减; 三次 B 样条

中图分类号: U284 文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2009AA11Z221); 国家自然科学基金(60736047, 60634010, 60870016)

## 1 引 言

铁路运输同其他交通运输行业一样越来越多的引入新的计算机与通信技术, 其主要目的就在于提高操作安全性, 降低运营成本, 提升运营服务的竞争力水平<sup>[1]</sup>。如何实现安全、高效、经济的列车运行控制, 已成为近年来铁路列车控制技术领域研究的热点。目前, 为适应我国铁路更高的安全、快速和服务需求, 增强市场竞争力, 铁路部门提出了发展适于我国国情的中国列车运行控制系统 (Chinese train control system, CTCS) 的策略<sup>[2]</sup>。

在列车运行控制系统中, 列车定位扮演着重

要的角色。列控系统根据列车在铁路线路上运行的客观条件和实际情况, 对列车运行速度及制动方式等状态进行监督、控制和调整。现有的列车定位方法, 如轨道电路、查询-应答器、里程计等, 都无法满足现代列控系统对列车定位日益增长的需求。将以 GPS 为代表的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS) 应用于列车定位, 能够有效提高列车定位性能, 降低列控系统成本, 并且实现不同列车控制系统的互操作性<sup>[3-5]</sup>。

在基于 GNSS 的列车定位中, 高精度的轨道地图是实现定位的基础。车载设备通过轨道地图获取线路的各种信息, 列车定位系统可以对车载

传感器的输出进行校验,检测故障;此外,轨道地图能够在列车定位中有效的校正定位误差并提高整个系统的完整性。目前在轨道地图生成方面,基于GPS测量生成轨道地图数据是主要方式之一。文献[6]对轨道地图的生成方法以及规范进行了研究;文献[7]等采用GPS与其他传感器组合,开发了一套快速轨道制图系统;文献[8]针对调车作业产生大量重复轨迹的特点提出多轨迹融合的方法实现地图自动精确化和更新,并且对定位测量方法及弯轨的表示进行了讨论;文献[9]在实测轨道GPS数据生成电子地图过程中,提出一种启发式线性算法,实现大规模GPS测量数据的约简。但目前所采用的生成方法大都基于大量的GPS测量数据,而对采用GPS定位的运营线路,如2006年开通的青藏铁路,现场环境的实际情况制约了大量重复性测量结果的获取。此外,随着计算机处理、存储能力的提升,测量设备的不断更新,以及列车定位中地图匹配精度要求的不断提高,传统的采用少量特征点构成折线逼近真实轨迹的方法不再符合未来的发展需要。因此,迫切需要新的轨道地图数据生成方法以适应列车定位系统的发展。

本文根据列车运行控制过程中对列车定位的要求,在不同尺度上将列控轨道地图划分为关键点、特征点及插值点分层结构,对地图原始GPS测量数据进行错误剔除、数据约减选取特征点集,并在特征点间采用三次B样条拟合方式补充插值数据,通过完善里程信息构成完备的列控轨道地图数据,为列车定位及列车运行控制提供有效保障。

## 2 列控轨道地图设计

### 2.1 列控轨道地图结构

铁路线路主要由铁路轨道、铁路沿线设备等构成,列控轨道地图是对实际轨道线路的描述和表示,其主要由三部分构成:轨道专用数据、轨道线路数据以及地形环境数据。

(1) 轨道专用数据,主要包括轨道沿线各种设备及特定地点信息,而对整个铁路线路来说,出于描述及地图使用的结构化考虑,以道岔、信号机、绝缘节等线路关键点构成的点集 $\{S_i\}$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ 作为分界,将整条铁路线路划分为不同段,以相邻两关键点为首尾分别保存本段内的线路数据。

(2) 轨道线路数据,是对轨道结构以及地理位置的描述,采用GPS测量对线路进行测量,选

取一定间隔的位置点形成轨道曲线,同时根据列控系统中列车定位的不同需求,将对线路的表述分为不同的尺度。

在低尺度上,在由关键点划分的段内只保留能够以最小容量描述线路曲线特征的特征点 $\{V_j | (S_i, S_{i+1})\}$ ,  $i=1, 2, \dots, n-1; j=1, 2, \dots, m_i$ ,在列车实时定位过程中,能够通过特征点位置以较低分辨率确定列车所处位置;在高尺度上,按照一定的原则及精度指标对相邻特征点间的线路进行插值构成插值点集 $\{C_k | (V_j, V_{j+1})\}$ ,  $j=1, 2, \dots, m-1; k=1, 2, \dots, c_j$ ,使其对线路的描述进一步细化,从而通过地图匹配能够得到更加精确的列车位置。

(3) 地形环境数据,包括影响列车定位的环境的描述,如隧道、山体、气象条件等,作为轨道元素的属性数据对列车定位进行辅助。

基于上述内容的列控轨道地图结构如图1所示。

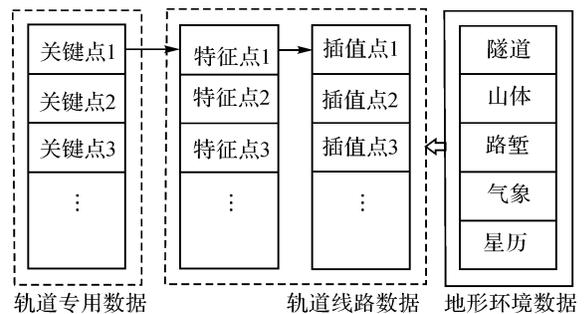


图1 列控轨道地图结构

Fig. 1 Structure of track map for train control

### 2.2 基于GPS的轨道地图数据生成流程

基于GPS测量的列控轨道地图数据生成主要包括以下步骤:

(1) GPS数据测量,利用高精度测量型GPS接收机在实际线路上对线路关键点以及点间线路数据分别进行测量。对于线路关键点,采用长时间静态测量的方式获取高精度测量结果;对于关键点间线路,按预先设定的测量方向及顺序,沿轨道中线在行进中采集测量数据。

(2) 错误数据处理,对原始测量数据中可能包含的异常及错误数据进行剔除。

(3) 测量数据约减及特征点选取,对测量数据逐段进行特征点抽取,通过剔除重要度较低的数据实现约减。

(4) 轨道数据插值,对特征点按照一定规则进行数据插值,生成最终轨道地图数据集。

### 3 轨道地图数据生成

#### 3.1 错误测量数据处理

理想情况下, 在静态及动态测量过程中得到间隔均匀、连续、精度水平高且无重复往返的测量数据, 能够大大简化地图数据生成的数据处理工作, 但由于铁路现场测量条件的制约, 测量过程中不可避免会存在错误及异常数据, 造成地图精度及性能指标的偏离, 因此在数据处理之初需要对错误数据予以剔除, 保证数据质量的统一。

通常基于 GPS 的地图测量数据包含的错误有, 测量数据疏密不均, 重复、遗漏测量, 精度水平降低等, 基本的错误模式可如图 2 所示。

图 2 中, 实线为真实轨迹, 图 2(a) 图为理想测量结果; 图 2(b) 中的测量点  $b, c$  及  $d, f$  存在测量数据过密、过疏问题, 而造成测量过疏的原因在于行进速度不均或测量过程存在可能的遗漏点  $e$ , 点  $g, h$  几乎重合, 属于重复测量模式; 图 2(c) 图中测量点  $i, j, k$  存在折返测量的问题,  $l, m, n$  点可能由于测量环境因素或测量线路偏移导致与被测轨道较大的误差, 造成测量精度水平下降。

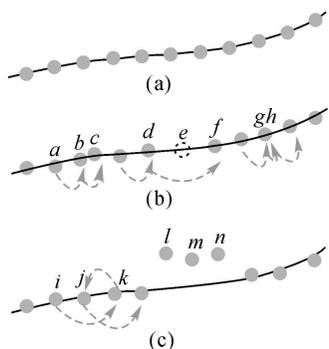


图 2 GPS 地图测量数据错误模式

Fig. 2 Error pattern in GPS map measurements

针对图(2)所示的错误数据, 一种有效的检测和错误剔除方法是测量点间距检验, 对于重复测量、疏密不均及测量遗漏的情况, 按照一定距离指标分别检验任意相邻两点间距离即可实现较好的正误分离。对于折返测量, 若有多个连续点存在折返, 则仅采用两点间距检验则无法保证检验的完备性, 因此考虑增加多点间距的判断, 并对不同的间距模式采用递减的权值分配得到加权距离用于检验。对于一段包含  $\phi$  点的原始测量数据来说, 当最多考虑  $N$  点间距时 ( $2 \leq N < \phi - 1$ ), 一种可行的检验方案为

$$D_L \leq d_m(i) \leq D_H, i = 1, 2, \dots, \phi - 1 \quad (1)$$

$$d_m(i) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{N-1} \tilde{\omega}_{j,N} \cdot dis(P_i, P_{i+j}), & i = 1, 2, \dots, \phi - N + 1 \\ \sum_{j=1}^{\phi-i} \tilde{\omega}_{j,N} \cdot dis(P_i, P_{i+j}), & i = \phi - N + 2, \dots, \phi - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $d_m(i)$  表示第  $i$  点的加权距离;  $D_L, D_H$  为加权距离的上下限值;  $\tilde{\omega}_{j,N}$  表示最多考虑  $N$  点间距时相邻  $j + 1$  点间距在  $d_m(i)$  中的权重, 通常  $\tilde{\omega}_{j,N} > \tilde{\omega}_{i,N}, i < j$  且  $\sum_{j=1}^{N-1} \tilde{\omega}_{j,N} = 1$ ;  $dis(P_i, P_j)$  为距离函数, 表示点  $P_i$  到  $P_j$  的距离。

而对于图(c)中  $l, m, n$  点出现的精度水平下降, 这里考虑采用估计位置与测量位置的距离检验对异常数据进行剔除。选取测量点位置及其一阶、二阶导构成状态量

$$X = [x \quad \dot{x} \quad \ddot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad \ddot{y}]^T \quad (3)$$

对测量过程建立状态转移模型, 采用 Kalman 滤波对测量位置进行估计, 得到状态的估计值  $X_k$ , 考察估计点  $P_k^x(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$  与测量点  $P_k^z(x_k, y_k)$  的距离是否满足

$$dis(P_k^x, P_k^z) \leq \delta_E \quad (4)$$

式中,  $\delta_E$  为测量与估计点距离阈值, 如此则可决定测量点的取舍, 对于包含较大测量误差的点进行剔除。

根据上述基于加权距离及滤波差值的检验准则, 可以有效剔除原始测量数据中的错误及异常, 保证所生成地图数据满足一定的精度水平。

#### 3.2 数据约减及特征点选取

由于原始测量数据的不规律性, 无法满足列控轨道地图的结构化设计需求, 因此对于已经过异常及错误剔除的原始数据, 要得到对真实轨道的完备及精确描述, 则需要通过对原始数据进行约减从而以一定数量的特征点在低尺度完成对轨道线路的较优描述。

在地理信息领域, 曲线数据约减是地图尺度变化中保持地图保真度的重要手段, 文献[10—11]对目前存在的曲线数据约减方法进行了分析与总结, 在已有的众多约减算法中, 垂距法、合并法、光栏法、Douglas-Peucker 法在算法复杂度及约减性能上具有一定优势, 而其中又以 Douglas-Peucker 法(简称 DP 算法)为实用中的首选。但是, 文献[13]在研究中指出了传统 DP 算法的非

最优性。基本的 DP 算法采用距离原则,逐层将顶点到首尾连线的距离最大值与预先设定的限差进行比较,决定顶点的取舍,直到所有点都满足限差为止,该算法主要存在的问题在于,若限差选取不当,则会出现简化后的折线自相交情况,并且采用单一的限差时,无法在曲线的各种特性下都使约减性能保持在相同水平。

在轨道地图数据约减过程中,考虑对基本 DP 算法进行一定改进,改进的思想在于根据线路的曲线特征动态调整 DP 算法的限差,从而提高数据约减性能。算法步骤如下:

### 3.2.1 求曲线偏角

对于经错误处理的原始测量点集 $\{R_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ , 任意点  $R_i$  所对应的曲线偏角  $\vartheta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k-1$  为线段  $\overline{R_i R_{i+1}}$  到  $\overline{R_i R_{i+2}}$  的夹角 ( $i = 1, 2, \dots, k-2$ )。

$$\tan \vartheta_i = \frac{A_1(i)B_2(i) - A_2(i)B_1(i)}{A_1(i)A_2(i) + B_1(i)B_2(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, k-2 \quad (5)$$

如图 3(a) 所示,  $(A_1(i), B_1(i), C_1(i))$ ,  $(A_2(i), B_2(i), C_2(i))$  分别为线段  $\overline{R_i R_{i+1}}$ ,  $\overline{R_i R_{i+2}}$  的直线参数。

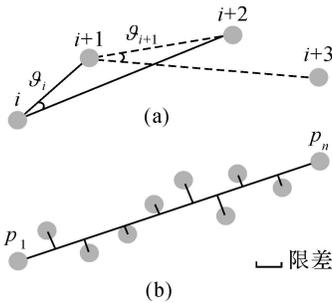


图 3 数据约减示意图

Fig. 3 Diagram of the data reduction

### 3.2.2 计算偏角变化率

引入基于距离的角速率  $\omega_i$ ,  $i = 2, \dots, k-2$  表征测量点随轨道线路及测量过程偏角的变化速率,设置角速率阈值  $\kappa$  对测量点进行逐点判断,考察是否满足

$$|\omega_i| > \kappa \quad (6)$$

$$\omega_i = \frac{\vartheta_i - \vartheta_{i-1}}{dis(R_i, R_{i-1})}, \quad i = 2, \dots, k-2 \quad (7)$$

式中,  $dis(R_i, R_{i-1})$  为点  $R_i, R_{i-1}$  间距。提取超限点作为分段的分界点,将原始测量数据划分为若干段,从而对曲线形变特性进行描述和分离。

### 3.2.3 数据约减

对所划分的各段测量数据分别确定距离限差,根据 DP 算法原则,在段内进行数据约减,提取轨道曲线特征点。如图 3(b) 所示,点  $p_1, p_n$  为经过角速率判别提取出的相邻分界点,在该段内首先求出所有点到线段  $\overline{p_1 p_n}$  的距离  $d_i$ , 然后取其最大值与设置的限差进行比较,若其最大值小于限差,即当满足

$$\max(d_i) \leq \xi_j \quad (8)$$

$$\xi_j = (1 - \sigma) \cdot E(d) + \sigma \cdot \max(d) \quad (9)$$

则将该段内所有测量点全部舍去,只保留端点,其中  $\xi_j$  为第  $j$  段的限差,  $\sigma$  为调谐系数且  $0 < \sigma < 1$ , 通常可取为 0.85。若在该段内不满足式(7),则将最大距离点  $p_{max}$  作为新的内插分界点,对  $(p_1 p_{max})$  和  $(p_{max} p_n)$  继续按照上述原则进行判断,直到所有点都满足限差为止。

以任意相邻关键点为端点,对全部关键点间的测量数据按照上述过程完成数据约减,得到最终的轨道线路特征点集  $\{V_j | (S_i, S_{i+1})\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, m_i$ , 从而能够在低尺度上对实际轨道线路进行描述和表达。

### 3.3 基于三次 B 样条的轨道数据插值

为了在高尺度上对轨道线路给出更加精确的描述,就需要以低尺度上的特征点、关键点为通过顶点,按照一定的规则对轨道曲线进行插值。铁路线路主要由线段、圆曲线和缓和曲线组成,采用测量点构成参数曲线对真实轨道进行近似,常用的主要有 Ferguson 曲线、三次 Bezier 曲线和 B 样条曲线等,而三次 B 样条曲线对三次 Bezier 曲线做出了改进,克服了 Bezier 曲线的不足,同时保留了 Bezier 曲线的直观性和凸包性,是一种工程设计中更常用的拟合曲线,因此过所选取的轨道特征点、关键点生成三次 B 样条曲线,按照一定规则在曲线上选取插值点即可得到高尺度的插值点集。

已知  $n+1$  个控制点  $P_i, i = 0, 1, \dots, n$ , 三次 B 样条曲线段的表达式为

$$N_{0,3}(t) = \sum_{i=0}^3 P_i G_{i,3}(t) \quad (10)$$

式中,基函数  $G_{i,3}(t)$  定义为

$$\left. \begin{aligned} G_{0,3}(t) &= \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) \\ G_{1,3}(t) &= \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4) \\ G_{2,3}(t) &= \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) \\ G_{3,3}(t) &= \frac{1}{6}t^3 \end{aligned} \right\} t \in [0, 1] \quad (11)$$



层和高尺度的插值点层合成构成最终的轨道地图。对原始测量数据进行坐标变换和平移,选取角速率阈值  $\kappa = 3.0$ , 调谐系数  $\alpha = 0.85$ , 以 X8 信号机至 S8 段测量数据为例, 图 5 给出了进行特征点提取的结果。

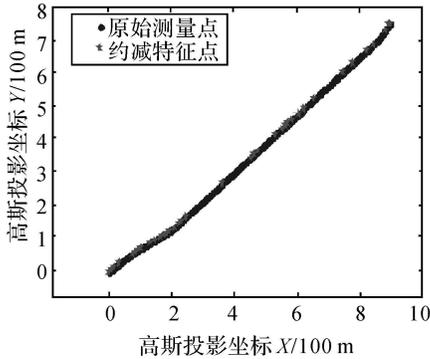


图 5 特征点提取结果

Fig. 5 Extraction of track feature points

分别以距离分辨率  $\delta_d = 0.5\text{ m}$ 、 $\delta_d = 0.1\text{ m}$  及  $\delta_d = 0.05\text{ m}$  对低尺度上的轨道地图关键点、特征点集进行三次 B 样条插值, 插值数据相对于经过错误数据处理的原始测量数据的插值误差如图 6 所示。

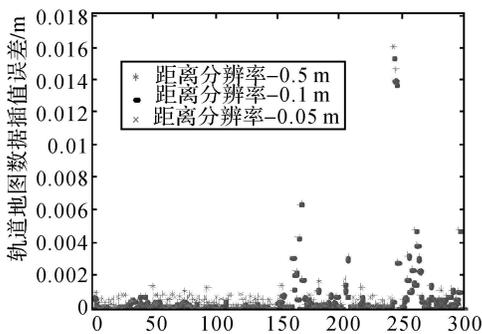


图 6 三次 B 样条插值误差

Fig. 6 Errors of cubic B spline interpolation

通过以上各步完成实际数据的处理, 形成完备的分层结构的轨道地图数据, 所生成地图的关键点层、特征点层以及插值点层分别如图 7 所示。以该站岔 31 段地图为例, 图 8 给出了由各图层叠加得到的最终生成地图在 MapInfo 8.5 中的显示结果。

由以上处理验证过程可得:

(1) 采用本文所述的列控轨道地图结构, 能够有效利用原始 GPS 测量数据实现轨道地图的结构化描述, 通过两种尺度以及关键点、特征点、

插值点三层结构的约束, 使轨道地图能够在保真度和复杂度两方面得到不同的调配方案, 满足列车定位及列车运行控制不同操作条件、工作模式的需求。

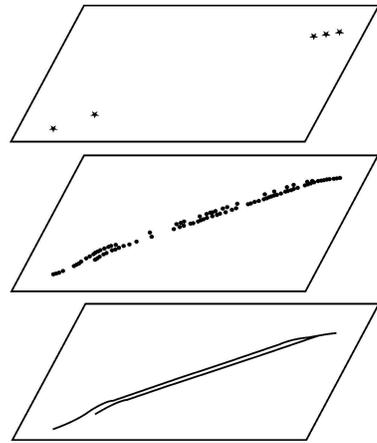


图 7 轨道地图三层结构示意图

Fig. 7 Structure of multi layer track map

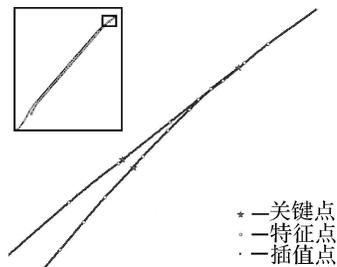


图 8 生成轨道地图示意

Fig. 8 Diagram of the generated track map

(2) 通过错误数据剔除、数据约减, 由被选特征点集近似描述轨道特性, 能够以一定精度水平降低地图数据规模。以图 5 为例, 整段数据的平均约减比(被约减数据占全体原始测量的比重)为 76.09%, 并且所选特征点分布随轨道曲线曲率增大而渐致密, 长直轨道则稀疏, 符合曲线数据约减的精确性要求, 如此则能较大程度提高地图存储和使用效率。

(3) 采用三次 B 样条曲线对特征点间特性进行精细描述, 相对于原始测量数据更加规范可控, 而原始数据的约减比将决定样条曲线对真实轨道的逼近精度, 因此在地图数据生成过程中需要对约减和插值作一致考虑。

(4) 距离分辨率  $\delta_d$  作为插值点层数据的可分辨最小距离, 直接反映了插值点层的精度特性, 同时也决定了插值造成的数量代价, 由图 7 所示

结果可以看出,  $\delta_r$  的减小能够提高插值的相对精度, 但随着  $\delta_r$  减小, 精度的可提升空间也逐渐收缩, 过低的距离分辨率反而会为地图数据集增加数量负担。此外, 插值点的选取直接决定列车定位地图匹配的性能, 因此, 合理的距离分辨率水平是列车测量位置对地图位置识别能力的重要保证。

## 5 结 论

高效完备的列控轨道地图是实现列车定位及列车运行控制的重要条件。本文在地图多尺度分层结构的基础上提出一种基于 GPS 的列控轨道地图数据生成方法, 通过对原始 GPS 地图测量数据分别进行错误剔除、数据约减、曲线插值、里程信息补充, 以关键点间所生成的特征点集、插值点集构成完备的列控轨道地图数据实现轨道特性描述, 并根据不同的参数及阈值选取策略满足相应的列车定位需求。

## 参考文献:

- [1] MAZL R, PREUCIL L. Sensor Data Fusion for Inertial Navigation of Trains in GPS Dark Areas[C] // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Columbus: IEEE Press, 2003: 345-350.
- [2] TANG Tao, GAO Chunhai. Analysis of ETCS System and Study on CTCS[J]. Electric Drive for Locomotives, 2004(6): 1-3. (唐涛, 郇春海. ETCS 系统分析及 CTCS 的研究[J]. 机车电传动, 2004(6): 1-3.)
- [3] SABB S. A Map Matching Approach for Train Positioning Part II: Application and Experimentation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(2): 476-484.
- [4] WANG Jian. Research on GNSS Based Train Positioning Method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007: 36-49. (王剑. 基于 GNSS 的列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007: 36-49.)
- [5] GENGHIA, MARRADI L, MARTINELLI L, et al. The RUNE Project: Design and Demonstration of a GPS/EGNOS-based Railway User Navigation Equipment[C] // ION GPS/GNSS. Portland: The International of Navigation, 2003: 225-237.
- [6] Track Data Base Generation. [EB/OL]. <http://www.honeywell.com/sites/Honeywell/1993>.
- [7] LEAHY F, JUDD M, SHORTIS M. Measurement of Railway Profiles Using GPS Integrated with Other Sensors [C] // IEEE-IEE Vehicle Navigation & Information

Systems Conference. Ottawa: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993: 706-709.

- [8] GAO Guigui, CAI Baigen. Research on the Automatic Electronic Map Generation Algorithm for the Train Supervision System[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(1): 63-67. (高桂桂, 蔡伯根. 列车监控系统专用电子地图自动生成算法的研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(1): 63-67.)
- [9] CHEN Dewang, CAI Baigen, WANG Jian, et al. Mathematical Model and Algorithm of Data Reduction for Railway GPS Data[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(4): 116-119. (陈德旺, 蔡伯根, 王剑, 等. 轨道交通 GPS 数据约简的数学模型与算法研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 116-119.)
- [10] DOUGLAS D H, PEUCKER T K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature[J]. Canadian Cartographer, 1973(10): 112-122.
- [11] Victoria H. Cartographic generalization: A Review of Feature Simplification and Systematic Point Elimination Algorithm [R]. [S. L.]: NOAA Technical Report NOS 112, 1985: 7-15.
- [12] CHEUNG Chuikwan, SHI Wenzhong. Estimation of the Positional Uncertainty in Line Simplification in GIS[J]. The Cartographic Journal, 2004, 41(1): 37-45.
- [13] VEREGIN H. Line Simplification, Geometric Distortion and Positional Error[J]. Cartographica, 1999, 36(1): 25-39.
- [14] BEDRICH S, GU X. GNSS Based Sensor Fusion for Safety-Critical Applications in Rail Traffic[C] // Proceedings of NAVITEC 2004. Noordwijk: [s. n.], 2004.
- [15] GUAN Lvtai, LUO Xiaonan, Li Luolu, et al. Computer Aided Geometric Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 136-163. (关履泰, 罗笑南, 黎罗罗, 等. 计算机辅助几何图形设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 136-163.)

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2009-11-02

修回日期: 2010-03-22

第一作者简介: 刘江(1985—), 男, 博士生, 研究方向: 智能交通、地理信息系统、组合定位导航、列车运行控制。

First author: LIU Jiang(1985—), male, PhD candidate, majors in intelligent transportation, geographic information system, integrated navigation and train control system.

E mail: liujiang27@163.com