

车载 POS 公路线形特征识别与参数计算

郝雨时¹ 徐爱功¹ 章红平² 隋 心^{1,2}

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000
2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘 要:为了高效获取高质量公路线形参数信息,采用车载定姿定位系统(position orientation system, POS)获取的离散坐标、姿态等信息,通过后处理的方式反演公路线形参数及特征。包括利用均值加速中值滤波平滑的姿态信息分析曲率分布特征,并进行线形特征初步识别、直线和圆曲线线形窗口准确识别与参数计算,利用平差后的直线和圆曲线参数计算缓和曲线参数,最终获得全路段最优化轨迹及线形特征信息。利用该方法处理某公路路段(全程 20 km)的车载 POS 数据,处理结果证明该方法简单高效,具有可行性。

关键词:POS;姿态信息;均值加速中值滤波;线形识别计算

中图分类号:P258 **文献标志码:**A

公路线形数据采集与计算是公路普及调查过程中的重要工作。目前国内外对道路线形计算的研究方法主要分为两种。一是以数学模型为基础研究公路设计基本元素的选取组合及线形拟合问题^[1];二是结合计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术研究公路设计基本元素的选取组合及线形拟合问题。国外学者倾向于先进行线形特征识别再研究,具有代表性的是 Cesar 提出的弧长-曲率法、文献[1]提出的斜率法及综合法等。中国学者在国外研究理论的基础上,对道路平面线形进行了深入研究,如童小华等^[2]提出基于曲率-弧长、斜率判别法,分别建立道路曲线基本单元的基本平差模型,并进一步建立以基本单元组合的道路曲线的联合平差模型,以及分段道路曲线的整体平差模型,整体拟合精度为 0.102 m。姚连璧^[3]提出基于曲率判别法的方位角法,利用车载 GPS 获取公路离散坐标,通过方位角法对线形进行识别;计算直线及圆曲线的重心化参数,并利用平差后的直线及圆曲线参数计算缓和曲线参数;并对 3 种线形连接处,结合加权平均法和道路设计思路,得到比较精确的道路平面线形几何参数;将该理论应用于无缓和曲线的情况,所得两段直线精度分别为 0.47 m、0.35 m,圆曲线

精度为 0.17 m。杨轶等^[4]认为当拟合曲线 $\int_0^s h^2 ds$ 或 $\sum_{i=1}^n h_i^2$ 最小时得到最佳拟合曲线,其中 h 为采样点到拟合曲线的垂距。此外,CAD 样条曲线法^[5]利用测设里程坐标参数绘制样条曲线,剔除粗差点后,粗略判断基本元素的位置,绘制 CAD 直线、圆曲线与样条曲线,通过对比获取拟合曲线参数。

综上可知,CAD 样条法存在较多人为因素干扰,不利于公路线形自动识别与计算理论研究。建立在曲率法、方位角法及综合法基础之上的联合平差法、方位角法及最小二乘法均采用车载 GPS 数据研究公路线形参数计算方法,相对于传统方法简单有效。但在隧道等复杂环境下,由于卫星信号受遮挡或受多路径影响,且车体无法严格按照中线行驶和车体抖动等原因,计算出的曲率或方位角会有一定程度的波动,即便选取特定的采样步长计算,也会损失判断精度,不利于线形特征识别与参数计算。

定位定姿系统(position orientation system, POS)是基于全球导航卫星系统(GNSS)/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合导航原理的一种定位定姿系统,其组合方式主要

分为松组合、紧组合与深组合 3 种。GNSS 的优势是导航定位误差不随时间累积,可提供较高精度的定位、测速及授时信息;INS 的优势是不依赖于外部信息,完全独立自主、全天候,且不存在信号失锁问题,可提供更加丰富的导航信息,短期内载体位置、速度及姿态信息精度较高。将二者组合可实现两种技术的优势互补,能长时间提供精度较高的完整导航参数,包括位置、速度和姿态^[6-9]等。本文采用的车载 POS 坐标与姿态信息由差分 GNSS 伪距及相位与 INS 的紧组合处理获得,位置精度可达 cm 级,航向角精度可达 0.001°,俯仰角及横滚角精度可达 0.000 5°。较高精度的位置和姿态信息对线形的识别与计算工作有重要意义。

本文首先采用基于均值的快速中值滤波 (mean-based fast median filter, MFM) 算法对车载 POS 采集的航向信息进行平滑,利用平滑后的航向信息结合里程信息粗略识别轨迹线形特征,并对数据分组,最终生成最优化线形参数计算结果、线形特征识别结果及最优化轨迹。

1 航向角平滑与线形初步识别

公路线形识别是公路线形计算的基础。通过线形特征识别,将离散的坐标数据分组,使后期线形参数计算过程具有针对性。

1.1 采用 MFM 算法平滑航向角

受车体震动及车道偏移等不确定因素影响,车载 POS 获取的姿态信息中存在噪声。在信号处理过程中,若有用信号与噪声信号呈现较明显的频谱特征,可以通过设计某种线性滤波器降低信号受噪声污染的影响,常用的有中值滤波和均值滤波^[8]。假设噪声模型为:

$$S_i = \begin{cases} \hat{S}_i, & \text{概率为 } P \\ \hat{S}_i + n, & \text{概率为 } 1 - P \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_i 为信号输出, \hat{S}_i 为正常信号输出; n 为均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布白噪声。其中,概率 $1 - P$ 表示信号受噪声污染的概率,体现了信号受污染程度。若 P 较大,噪声污染面积较小,表现为颗粒噪声,此时选用常规中值滤波即可较好地剔除奇异点;若 P 较小甚至趋近于 0 时,输出信号为有用信号与方差为 σ^2 的零均值高斯白噪声的叠加,此时采用中值滤波输出的信号仍包含噪声,而均值滤波对噪声进行了均值运算,可以降低高斯白噪声影响。

实际测试过程中并非全路段均受高斯白噪声影响,所以 P 无法获取。若单纯采用中值滤波或均值滤波,可能造成滤波后的信号包含白噪声或损害正常信号输出。为了最大程度降低白噪声影响的同时又能有效剔除颗粒噪声,并克服中值滤波庞大计算量的问题,本文采用 MFM 算法来平滑航向角。MFM 算法平滑航向角步骤如图 1 所示。首先,计算滤波窗口航向角元素集合的元素均值;其次,将航向角元素分为大于等于该均值和小于等于该均值的两个集合;然后,舍弃元素个数少的集合,对元素个数大于滤波窗口总元素个数一半的集合重复上述过程,直到分解的两个集合的元素个数都小于滤波窗口总元素个数的一半;最后对得到的两个子集合之一快速排序,取中间值作为滤波窗口的航向角元素值^[10]。

MFM 算法有下列优势。

1) MFM 算法以滤波窗口元素均值为界限对元素分类,略去元素较少的部分,随着滤波窗口的增大,算法复杂度随之降低。

2) MFM 算法在对滤波窗口元素计算均值的过程中基本剔除了高斯白噪声的影响,该平均值接近信号中未受噪声影响的原始值,因此通过 MFM 算法进行 2 次排序即可很快找到滤波窗口中值。

3) 受颗粒噪声影响的元素在滤波窗口中表现为极值,在计算滤波窗口元素均值并以此为界将集合分成两部分的过程中,能很快去除极值点,降低颗粒噪声影响,最终在无颗粒噪声的集合中找到滤波窗口中值^[8]。

1.2 公路线形特征

令曲率随里程变化函数^[2]为 $K = F(S)$,将曲率随里程积分可得方位角变化,即:

$$d\alpha = \int_0^S K dS \quad (2)$$

对于离散形式的航向角信息,利用相邻航向角差值及里程差值即可求取单位里程内的曲率。建立曲率与里程的函数方程^[1]为:

$$k = as + b \quad (3)$$

式中, k 为曲率; s 为里程。理论上讲,对于直线段, a 、 b 等于零;对于圆曲线, a 等于 0, b 不等于 0;对于缓和曲线, a 、 b 均不等于零, k 随里程呈一阶线性变化。

由于车体不能严格沿中线行驶,存在变道、靠边停车等情况,航向输出与道路航向存在不平行性偏差;通过航向角计算的曲率进行线形特征识别可能会导致线形窗口识别不完整或不同线形窗

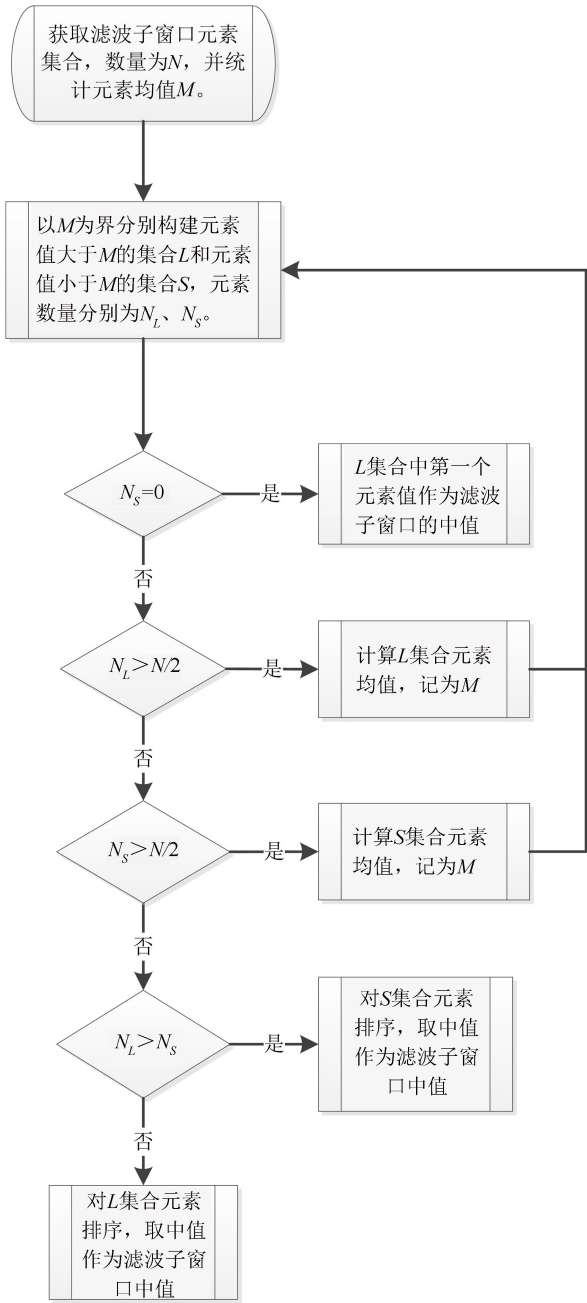


图 1 MFM 算法流程图

Fig.1 Flowchart of MFM Algorithm

口间界限模糊,即出现缓和曲线两端包含直线或圆曲线、直线或圆曲线两端包含缓和曲线的情况。图 2 为某段圆曲线的初步识别结果,start 和 end 分别为该段圆曲线窗口的首端和末端。可以看出,start 端包含了缓和曲线部分,end 端以外存在未被识别的圆曲线部分。这种情况不利于线形参数的计算。

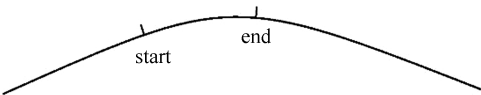


图 2 一段圆曲线的初步识别结果

Fig.2 Initial Recognition of One Circle

2 公路线形计算与线形窗口识别

公路线形主要分直线、圆曲线及缓和曲线 3 种。本节讨论直线与圆曲线的线形参数计算方法,通过比较拟合残差与窗口端点采样点间的航向角偏差,更准确地计算线形窗口的大小及位置,并基于平差后的直线和圆曲线参数计算缓和曲线线形参数。

2.1 直线线形参数计算

令某一直线段由 n 个离散点构成,对应坐标为 (x_i, y_i) ,直线方程 $y_i = ax_i + b$ 。则等精度法方程为 $(B^T B)X = B^T L$,即:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{pmatrix} \tag{4}$$

解得参数 a, b :

$$X = (a \ b)^T = (B^T B)^{-1} B^T L \tag{5}$$

从而得到拟合直线方程,则该直线段采样点 (x_i, y_i) 在拟合直线上的投影 (x_{i0}, y_{i0}) 及拟合误差 $error_i$ 为:

$$\begin{cases} x_{i0} = \frac{(x_i + ay_i - ab)}{1 + a^2} \\ y_{i0} = \frac{(ax_i + a^2 y_i + b)}{1 + a^2} \\ error_i = \sqrt{(x_i - x_{i0})^2 + (y_i - y_{i0})^2} \end{cases} \tag{6}$$

2.2 圆曲线线形参数计算

令某一圆曲线段由 n 个离散点构成,对应坐标为 $(x_i, y_i), i = 1, 2 \cdots n$,则圆曲线方程为 $x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2 = r^2$,其中圆心坐标为 (a, b) ,曲率半径为 r 。构建参数为 $a, b, a^2 + b^2 + r^2$ 的观测方程 $BX = L$,其中:

$$\begin{cases} B = \begin{pmatrix} 2x_1 & 2y_1 & -1 \\ 2x_2 & 2y_2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & -1 \end{pmatrix} \\ L = (x_1^2 + y_1^2 \ x_2^2 + y_2^2 \ \cdots \ x_n^2 + y_n^2)^T \\ X = (a \ b \ a^2 + b^2 + r^2)^T \end{cases} \tag{7}$$

则构建等精度法方程 $(B^T B)X = B^T L$,其中:

$$B^T B = \begin{pmatrix} 4 \sum x_i^2 & 4 \sum x_i y_i & -2 \sum x_i \\ 4 \sum x_i y_i & 4 \sum y_i^2 & -2 \sum y_i \\ -2 \sum x_i & -2 \sum y_i & n \end{pmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{B}^T \mathbf{L} = \begin{pmatrix} 2 \sum x_i (x_i^2 + y_i^2) \\ 2 \sum y_i (x_i^2 + y_i^2) \\ - \sum (x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix} \quad (9)$$

解得参数 a 、 b 、 $a^2 + b^2 + r^2$ ：

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ a^2 + b^2 + r^2 \end{pmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{L} \quad (10)$$

从而计算该圆曲线段采样点在拟合圆曲线上的投影 (x_{i0}, y_{i0}) 及拟合误差 $error_i$ 为：

$$\begin{cases} x_{i0} = \begin{cases} x_i - \cos(\arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}) error_i, \Delta x > 0 \\ x_i + \cos(\arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}) error_i, \Delta x < 0 \end{cases} \\ y_{i0} = \begin{cases} y_i - \sin(\arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}) error_i, \Delta x > 0 \\ y_i + \sin(\arctan \frac{\Delta y}{\Delta x}) error_i, \Delta x < 0 \end{cases} \\ error_i = \sqrt{(x_i - A)^2 + (y_i - B)^2} - R \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\Delta y = y_i - y_{i0}$; $\Delta x = x_i - x_{i0}$ 。

2.3 线形窗口自动识别

§ 1 中提到, 根据曲率分布初步识别结果识别线形, 可能会导致线形窗口识别不完整或识别

错误。本节讨论如何通过分析拟合中误差的大小控制窗口的大小, 比较窗口端点处采样点间航向角偏差, 确定窗口的伸缩方向, 最终实现线形识别结果与公路轨迹最大程度的吻合。以直线窗口识别为例, 流程如图 3 所示。

需要说明的是, 首先, 扩展因子 e 的作用在于控制窗口的伸缩程度。在窗口扩展之前, $e = 0$ 。若拟合残差中误差 $\sigma < \text{拟合残差中误差阈值 } \sigma_0$, 说明窗口初步识别范围过小, 需要扩展, 当扩展到 $\sigma > \sigma_0$ 时, 说明窗口需要缩小, 此时 $e = 1$, 说明窗口至少经过一次扩展。根据图 3 可知, 当 $e = 2$ 时, 说明拟合计算后满足 $\sigma < \sigma_0$ 的同时不需要再扩展窗口, 线形识别已达到最大程度吻合。然后, 通过窗口端点处采样点间方位角偏差选择伸缩方向: 直线的曲率近似等于 0, 采样点间方位角变化较小, 因此窗口扩展方向为航向角偏差较小的一端, 窗口缩小方向为航向角偏差较大的一端。圆曲线窗口伸缩方向选择方法与直线相反, 这是圆曲线与直线窗口识别过程唯一的不同之处。

2.4 缓和曲线线形参数计算

缓和曲线是以曲线起点建立的局部坐标系建立直角坐标系与曲线长的关系, 数学模型复杂。且 GNSS/INS 组合导航结果以离散形式输出, 具

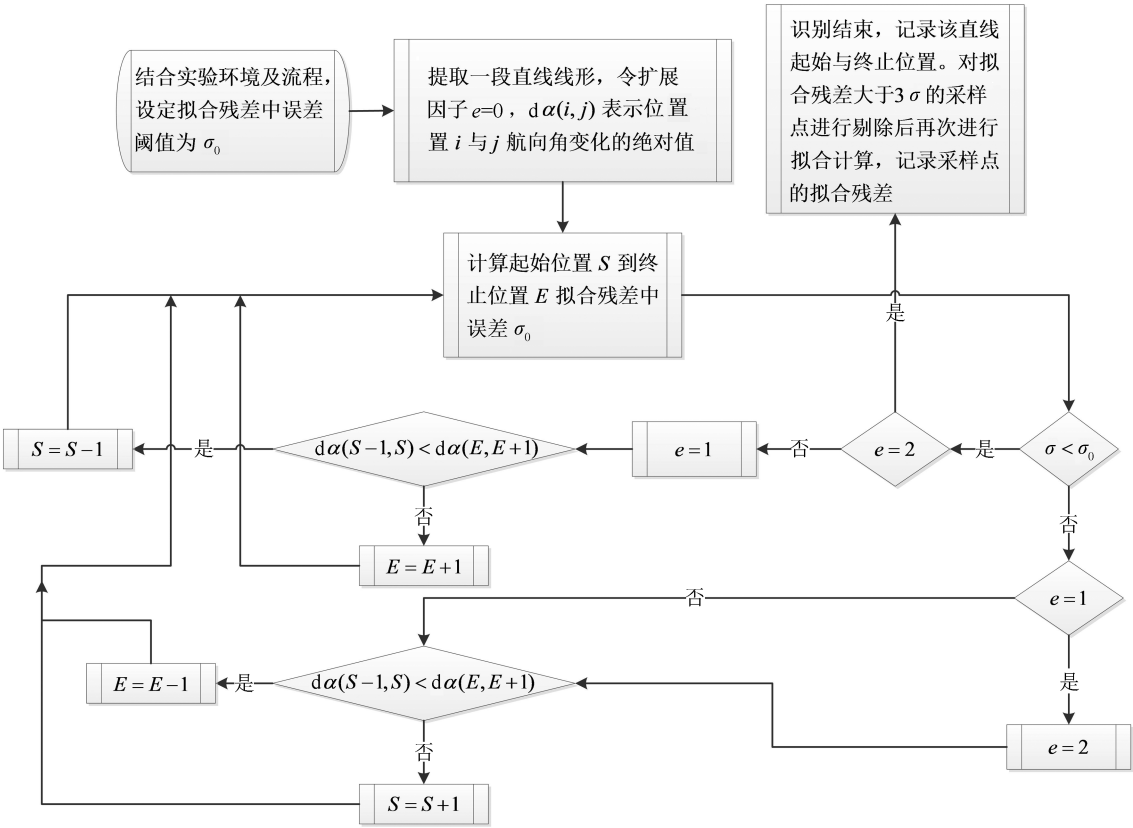


图 3 直线窗口识别与计算

Fig.3 Recognition and Calculation of Line Windows

有一定局限性,因此无法精确定位直缓点与缓圆点的位置,只能在平差后的直线与圆曲线端点间构造缓和曲线。在完成直线与圆曲线的计算与识别工作后即可筛出缓和曲线部分,根据缓和曲线两端点曲率与里程构造缓和曲线的曲率里程方程 $k=as+b$,其中 s 是缓和曲线里程, k 为缓和曲线曲率, a 和 b 分别是曲率里程方程的斜率和截距。再根据采样点曲率占缓和曲线曲率变化比例内插出缓和曲线离散坐标,过程如下。

令缓和曲线起始端 S 曲率与里程分别为 K_S 和 S_S ,末端 E 的曲率与里程分别为 K_E 和 S_E 。解得式(3)的系数 a 、 b 后,结合采样点里程计算采样点的曲率 K_i 以及 K_i 占曲率变化的比例 $scale_i$:

$$scale_i = (K_i - K_S) / (K_E - K_S) \quad (12)$$

令 $\Delta X=X_E-X_S, \Delta Y=Y_E-Y_S, (X_S, Y_S)$ 和 (X_E, Y_E) 分别为缓和曲线起点 S 与终点 E 的坐标,则缓和曲线内采样点 i 的内插坐标为:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_S + \Delta X \cdot scale_i \\ Y_S + \Delta Y \cdot scale_i \end{pmatrix} \quad (13)$$

为了保证缓和曲线平滑过渡,可以通过增大采样率的方法来加密缓和曲线内插点。

3 实验分析

3.1 线形初步识别

图 4 为 MFM 方法平滑航向角结果与曲率分布特征的初步识别结果,步长为 20 m。以此为参考,结合自编道路线形识别计算程序初步对 POS 数据进行分组。暂时假定无缓和曲线。

根据曲率分布初步识别结果可以较清晰地识别线形特征,拟定直线段初始曲率的绝对值不大于 0.02。在 0~2 000 m 之间的曲率分布存在 3 处粗差,原因可能是车体靠边停车所致。这类粗差影响会在线形窗口自动识别过程中剔除。

3.2 线形窗口自动识别与计算

以线形特征初步识别结果为基础,对直线与圆曲线进行拟合误差计算与线形窗口识别,利用平差后的直线与圆曲线参数计算缓和曲线线形参数,最终生成最优拟合轨迹,如图 5 所示(比例尺为 1:1 000)。并根据线形特征反演轨迹的计算曲率分布,如图 6 所示。

为了直观展现窗口自动识别过程,取一段圆曲线为例,分别从起始位置变化、末端位置变化、窗口里程大小、窗口拟合中误差 4 个方面来展示窗口自动识别过程。如图 7 所示,随着窗口的首

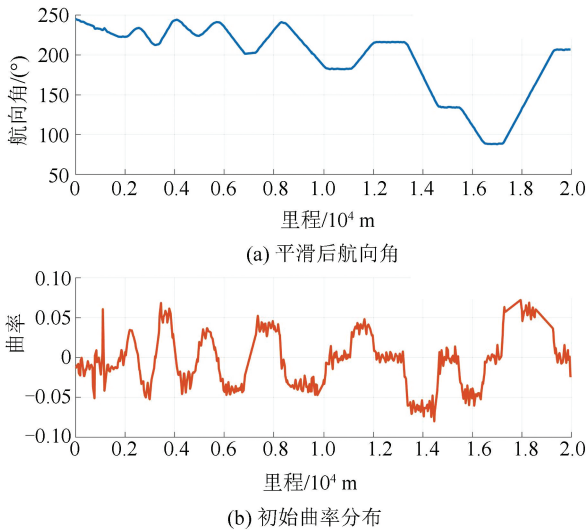


图 4 航向角平滑结果与初始公路线形的曲率分布
Fig.4 Smooth Result of Heading and Initial Curvature Characteristic of Road Line

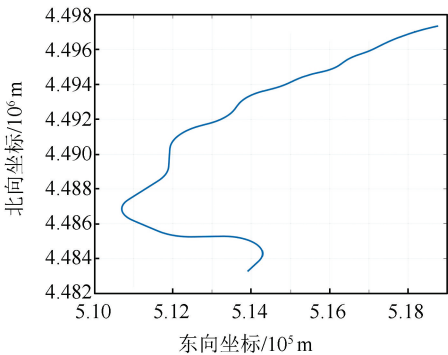


图 5 拟合轨迹
Fig.5 Fitting Line

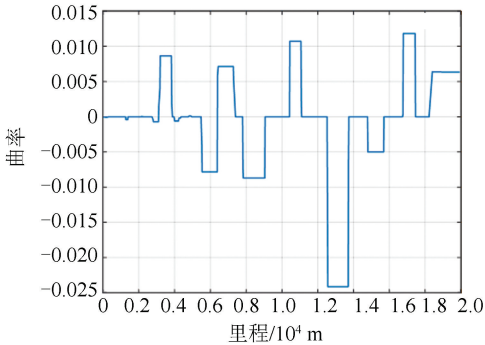


图 6 计算曲率分布
Fig.6 Distribution of Calculated Curvatures

端和末端位置变化,线形窗口大小及拟合中误差不断增大,当拟合中误差大于一定阈值时,窗口会恢复到上次扩展的程度,并记录拟合中误差、窗口间隔的历元数及首末端的位置。此时,该段圆曲线线形窗口识别已实现最大程度吻合。

计算曲率分布由最终线形特征识别与线形参数结果反演得到,即令直线曲率等于 0,圆曲线曲

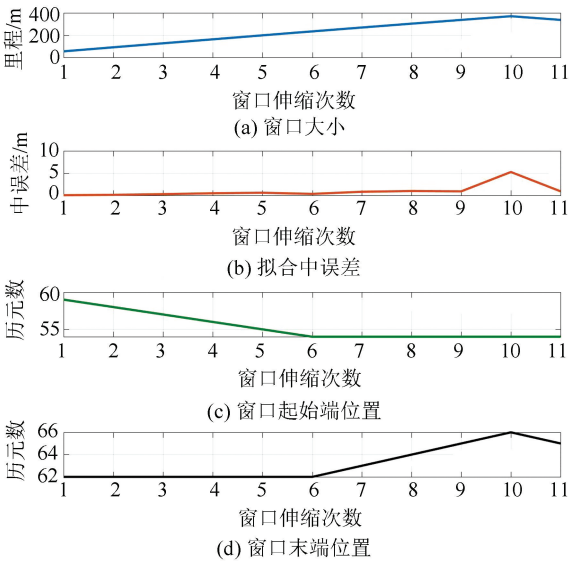


图 7 线形窗口自动识别

Fig.7 Recognition of Road Line Windows

率等于曲率半径的倒数,可以更直观地体现道路线形特征。

3.3 拟合精度分析

根据拟合误差分布,统计直线、圆曲线及缓和曲线的拟合中误差。直线段拟合中误差为±0.610 m,圆曲线段拟合中误差为±0.499 m,缓和曲线段拟合中误差为±0.740 m。如图 8 所示,整体轨迹的中误差为±0.573 m,最大拟合偏差为 1.417 m,最小拟合偏差为 0.021 m。拟合误差呈现出较大的随机性,可以认为这种随机误差主要由车体不能严格按照中线行驶所致。若能让车体严格沿中线行驶,线形参数计算的精度会提高。

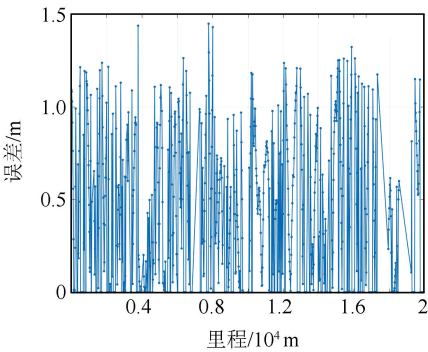


图 8 拟合误差分布

Fig.8 Distribution of Fitting Errors

4 结 语

本文讨论了采用车载 POS 采集的公路离散坐标及姿态信息进行公路线形特征识别与参数计算的方法。首先,基于 MFM 法平滑方位角,初步

识别线形特征,利用最小二乘法对不同线形进行拟合计算;其次,根据拟合中误差大小及线形窗口端点处采样点间方位角偏差,自动调节线形窗口的大小及端点位置,使线形窗口与真实轨迹最大程度吻合;最终,生成最优道路轨迹、线形特征及参数信息。结果表明,利用 POS 采集的离散坐标与姿态信息进行道路线形特征识别与参数计算,可以保证数据采集与处理的连续性,处理过程简单高效,且 POS 提供的姿态信息对更准确的线形特征识别有一定指导意义。对于线形特征的识别,关键在于不同线形间特征点的识别,由于数据的采集及处理均为离散形式,可采用更高采样率的 POS 系统进行数据采集。对于线形参数计算,针对由车体晃动、摆动等因素导致的车体不能严格按照中线行驶的问题,可考虑不采用 POS 与车体维持刚体不变的平台结构,以降低拟合残差大小。

参 考 文 献

[1] McAllister D F, Roulier J A. An Algorithm for Computing a Shape-Preserving Osculatory Quadratic Spline[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1981, 7(3): 331-347

[2] Tong Xiaohua, Liu Dajie. Combined Adjustment Models of Road Curve Digitization in GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(1): 64-68(童小华,刘大杰. 道路曲线数字化数据的联合平差模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001,26(1): 64-68)

[3] Yao Lianbi. Road Data Collection with Kinematic GPS and Calculation of Relevant Parameters[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(supp):45-49(姚连璧. 车载 GPS 道路数据采集与线形参数的计算[J]. 测绘学报, 2002,31(增刊): 45-49)

[4] Yang Zhen, Fang Shou'en, Gao Guowu. Alignment Parameters Recovery Technique Based on GPS[J]. *Journal of Tongji University*, 2003,3(5):567-571 杨轶,方守恩,高国武,基于 GPS 的道路线形恢复技术的研究[J]. 同济大学学报, 2003,3(5): 567-571)

[5] Hide C, Moore T, Smith M. Adaptive Kalman Filtering for Low-cost INS/GPS [J]. *Journal of Navigation*, 2003, 156: 143-152

[6] Zhang Hang, Huang Yun, Gong Liangfu. Study on Fitting Highway Alignment Based on the Cubic Spline Function[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2007, 31(5):925-927(张航,黄云,龚良甫. 基于三次样条函数拟合公路平面线形方法研究

[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007, 31(5):925-927)

[7] Angrisano A. GNSS/INS Integration Methods [D]. Calgary:University of Calgary, 2010

[8] El-Sheimy N. Inertial Techniques and INS/DGPS Integration[D]. Calgary: University of Calgary, 2004

[9] Zhang Li, Chen Zhiqiang, Gao Wenhuan, et al. Mean-Based Fast Median Filter[J]. *Journal of Tsinghua Science and Technology*, 2004, 44(9): 1 157-1 159(张丽, 陈志强, 高文焕, 等. 均值加速的快速中值滤波算法[J]. 清华大学学报·自然科学版, 2004,44(9): 1 157-1 159)

[10] Huang D, Leung H, El-Sheimy N. Expectation Maximization Based GPS/INS Integration for Land-Vehicle Navigation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1 168-1 177

Road Recognition and Calculation of Relevant Parameters with POS

HAO Yushi¹ XU Aigong¹ ZHANG Hongping² SUI Xin^{1,2}

1 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China
2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: In order to efficiently obtain high quality information of highway alignment parameters, vehicle position orientation system is adopted to obtain information of dispersed coordinate and attitude, and line type parameters are calculated through post processing. This paper firstly presents a method of initial recognition based on curvature characteristic which is calculated by azimuth filtered by fast median filtering algorithm. Secondly, calculations and accurate recognition of line and circle type parameters are performed. Finally the parameters of approach curve are calculated by adjusted line and circle curve parameters. The method in this paper has been testified at a highway, and the results show that this method is practical.

Key words: POS; attitude; mean-based fast median filtering; recognition and calculation of road line

First author: HAO Yushi, PhD candidate, specializes in the theories and methods of precision indoor and outdoor seamless positioning. E-mail:1216211827@qq.com

Corresponding author: XU Aigong, PhD, professor. E-mail: aigong_xu@lntu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0803102; the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program), No. 2014AA123101; the National Natural Science Foundation of China, No. 41501504; Liaoning Provincial Department of Education Innovation Team Program, No. LT2015013; Liaoning Provincial Department of Education Science Research Program, No. L2013141; Key Laboratory of Geospatial Information Engineering of National Administration of Surveying, Mapping and Geo-information Program, No. 201522.