



## 基于改进HMM纠偏算法的露天矿车辆高精度定位方法

阮顺领, 李孟, 顾清华, 卢才武

**A high-precision positioning method for open-pit mine vehicles based on improved HMM deviation correction algorithm**

引用本文:

阮顺领, 李孟, 顾清华, 卢才武. 基于改进HMM纠偏算法的露天矿车辆高精度定位方法[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(3): 381–389.

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 河曲露天矿排土场不同复垦区土壤质量评价

引用本文: 赵洪宝, 蒋冬梅, 李岳, 等. 河曲露天矿排土场不同复垦区土壤质量评价[J]. [矿业科学学报](#), 2023, 8(3): 419–427.

#### 2. 基于SVD–Unscented卡尔曼滤波的掘进机行进调度纠偏研究

引用本文: 吉晓冬, 瞿圆媛, 符世琛, 等. 基于SVD–Unscented卡尔曼滤波的掘进机行进调度纠偏研究[J]. [矿业科学学报](#), 2022, 7(3): 354–363.

#### 3. 井下掘进机行进纠偏调度规划与控制研究

引用本文: 瞿圆媛, 宋林珂, 吉晓冬, 等. 井下掘进机行进纠偏调度规划与控制研究[J]. [矿业科学学报](#), 2020, 5(2): 194–202.

#### 4. 基于局域栅格化的履带支护车自主导航方法研究

引用本文: 李瑞, 张敏骏, 王鹏江, 等. 基于局域栅格化的履带支护车自主导航方法研究[J]. [矿业科学学报](#), 2020, 5(4): 423–434.

#### 5. 岩质边坡弯曲倾倒破坏及支护DDA方法模拟

引用本文: 龚文俊, 陶志刚, 何满潮. 岩质边坡弯曲倾倒破坏及支护DDA方法模拟[J]. [矿业科学学报](#), 2019, 4(6): 489–497.

阮顺领,李孟,顾清华,等. 基于改进 HMM 纠偏算法的露天矿车辆高精度定位方法[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 381-389. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.03.011

Ruan Shunling, Li Meng, Gu Qinghua, et al. A high-precision positioning method for open-pit mine vehicles based on improved HMM deviation correction algorithm[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 381-389. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2023.03.011

## 基于改进 HMM 纠偏算法的露天矿 车辆高精度定位方法

阮顺领<sup>1,2</sup>, 李孟<sup>1,2</sup>, 顾清华<sup>1,3</sup>, 卢才武<sup>1,2</sup>

1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西西安 710055;
2. 西安市智慧工业感知与决策重点实验室, 陕西西安 710055;
3. 西安优迈智慧矿山研究院有限公司, 陕西西安 710055

**摘要:**针对露天矿区复杂路网背景下容易出现车辆定位偏差,严重影响生产车辆路径规划和智能调度的问题,提出了一种基于改进隐马尔可夫模型的露天矿车辆高精度定位纠偏方法。通过对构建的露天矿复杂路网地图进行路段裁剪处理以及对矿车定位轨迹数据清洗、密度稀疏化和分段处理等,建立缓冲区搜索轨迹候选路段点,从而提高复杂路网下矿车定位纠偏效率;通过计算矿车定位观测概率和转移概率建立定位纠偏 HMM 优化模型,并结合 Viterbi 算法计算最优纠偏结果,实现对露天矿车的高精度定位纠偏。研究结果表明,该方法纠偏效果优于原始 HMM 定位纠偏方法,纠偏准确率可达到 89.2%,平均纠偏时间仅需 0.055 s,能够实现对复杂背景下露天矿车辆定位坐标的有效纠偏。

**关键词:**露天矿;定位纠偏;隐马尔可夫模型;Viterbi 算法

中图分类号:TD 57

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2023)03-0381-09

## A high-precision positioning method for open-pit mine vehicles based on improved HMM deviation correction algorithm

Ruan Shunling<sup>1,2</sup>, Li Meng<sup>1,2</sup>, Gu Qinghua<sup>1,3</sup>, Lu Caiwu<sup>1,2</sup>

1. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Industry Perception Computing and Decision Making, Xi'an Shaanxi 710055, China;
3. Xi'an U-Mine Intelligent Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710055, China

**Abstract:** Vehicle location deviation could easily occur in complex road network of open-pit mines, which seriously affect production vehicle route planning and intelligent scheduling. In this light, this study proposed a method for high-precision positioning and rectification of open pit minecars based on an improved HMM (Hidden Markov Model). Specifically, this study clipped the road section by the complex road network map of the constructed open-pit mine, and cleaned the positioning trajectory data of the minecart, whose density was sparsed and segmented; a buffer zone was established to search for candidate road points of the trajectory, so as to improve the efficiency of the minecart positioning and correction under the complex road network; the HMM optimization model of positioning deviation correc-

收稿日期:2022-10-27 修回日期:2022-12-12

基金项目:国家自然科学基金(52074205);陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JM-201)

作者简介:阮顺领(1983—),男,河南周口人,博士,副教授,主要从事露天矿智能感知与决策等方面的研究工作。Tel: 13468766615, E-mail: ruanshunling@163.com

tion was established by calculating the positioning observation probability and transition probability of the minecart. The optimal deviation correction was conducted in combination with the Viterbi algorithm to achieve high-precision positioning and deviation correction of the open-pit minecart. Results indicate that the method produces a better correction effect than the original HMM positioning correction method, the correction accuracy can reach 89.2%, and the average correction time is only 0.055 s. This could effectively correct the positioning coordinates of open-pit mine vehicles under complex backgrounds.

**Key words:** open pit mine; positioning correction; Hidden Markov model; Viterbi algorithm

露天矿车的高精度定位是矿山生产车辆进行动态路径规划以及生产任务调度的重要基础<sup>[1-3]</sup>。矿区道路网状交织复杂,定位精度会受到矿山地形干扰,在路网交叉复杂路段,定位接收器也会存在系统误差<sup>[4]</sup>,进而导致在非结构化的露天矿道路上总会出现车载定位系统<sup>[5]</sup>数据偏差的情况,采集到的矿车定位信息可能会偏离其实际所在的道路位置,无法准确反映矿车真实的驾驶路径、满足矿车高精度定位的要求,也无法为矿车路径规划和智能调度提供精准的定位数据<sup>[6]</sup>。为了获得高精度的矿车轨迹定位信息,必须对露天矿车进行定位纠偏,从具有经纬度误差的定位数据中重构露天矿车真实的行驶路径。

传统的定位纠偏算法依据道路之间的几何与拓扑结构关系<sup>[7-8]</sup>。如谢博晖等<sup>[9]</sup>考虑了路段的形状和连通性,降低了定位误差和采样率的影响,但是针对露天矿区的道路形状不规则、路网交叉复杂的情况,这类算法还需要进一步调整和完善。目前定位纠偏的统一框架是地图匹配,通过构建不同的算法模型实现车辆的高精度定位<sup>[10-14]</sup>。如樊娜等<sup>[15]</sup>综合道路的各方面情况以及车辆的定位信息变化特征,对不同影响因素设立其相应的动态权值系数,并加权求和以此为复杂的城市路网进行定位纠偏。滕志军等<sup>[16]</sup>基于D-S证据理论,不考虑车辆的历史信息,一个定位坐标点纠偏错误并不会影响下一个点的纠偏效果,然而对于路段密集的区域还需要考虑道路因素对车辆定位坐标纠偏的影响。李卫东等<sup>[17]</sup>基于曲线拟合的匹配算法,通过对定位轨迹点进行样条曲线和最小二乘曲线拟合方向线路,但针对复杂路段情况需要进一步完善使得拟合效果达到最优。Xu等<sup>[18]</sup>利用卡尔曼滤波在一定程度上提高了车辆动态定位结果的准确性,但针对露天矿车大量重复轨迹定位坐标的纠偏,该算法需要更加充分地考虑车辆定位坐标与周围路网之间的联系。Jagadeesh等<sup>[19]</sup>基于隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)的定位纠偏方法应

用最广泛,其不仅结合了道路的连通性,还结合了定位坐标点之间的相互关系,将每个轨迹点的候选路段表示为马尔科夫链中的隐藏状态,定位轨迹信息为观测状态,通过计算相邻定位坐标点的转移概率和每个点的观测概率,预测最终的纠偏路段。

以上研究大部分在定位纠偏上取得了一定效果,但在露天矿区复杂路网背景下尚不能完全满足实际应用要求。本文考虑露天矿道路的复杂性,结合矿车待纠偏定位坐标点的历史信息,提出了一种基于改进隐马尔可夫模型的露天矿车高精度定位纠偏方法。该方法在路网匹配时对缓冲区以外的露天矿道路进行裁剪处理,并将矿车的定位轨迹进行数据清洗、密度稀疏化和分段等操作,在纠偏过程中综合考虑定位距离因素和车辆行驶方向因素,最终实现露天矿区复杂路网背景下矿车的高精度定位。

## 1 定位纠偏 HMM 模型构建

### 1.1 模型总体架构

对于露天矿复杂路网背景,在纠偏之前需要对路网数据进行裁剪处理,对定位轨迹进行数据清洗、密度稀疏化以及分段等处理。对于每一个待纠偏的定位轨迹点,建立以定位坐标点为圆心、以设定的点到路段的距离阈值为半径的圆形缓冲区,以此搜索候选路段点。通过定位观测点与其真实路网上的隐藏点建立定位纠偏 HMM 优化模型,求解观测概率和初始状态概率,并综合考虑定位距离因素和车辆行驶方向因素求解转移概率,利用 Viterbi 算法求解模型确定最优的纠偏轨迹序列,再将定位坐标点向其对应的候选路段点做垂直投影,得到最终的定位纠偏结果。露天矿区复杂路网背景下车辆高精度定位纠偏模型总体架构如图 1 所示。

### 1.2 模型定义

露天矿车定位纠偏实际就是依据算法模型对车辆定位显示位置进行修正,从而显示出车辆在实际路网中的位置<sup>[20]</sup>。假设车辆定位轨迹  $tr=p^1 \rightarrow$

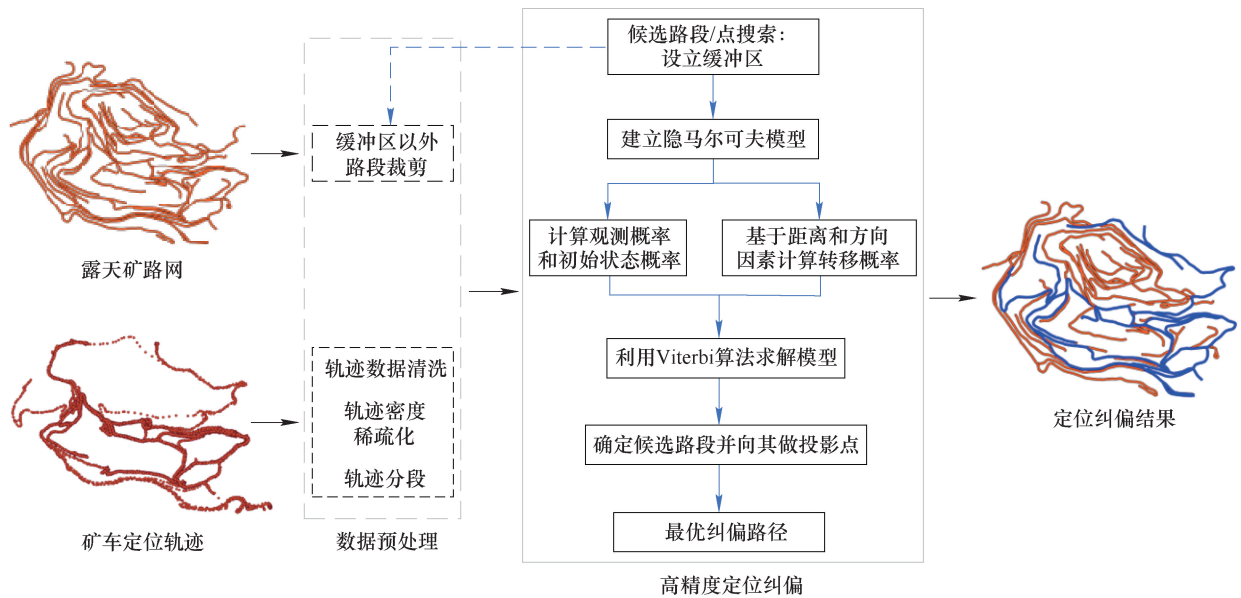


图1 露天矿车高精度定位纠偏模型总体架构

Fig. 1 Overall architecture of high precision positioning correction model for open-pit mine truck

$p^2 \rightarrow \dots \rightarrow p^7$  和路网  $G$ , 定位纠偏时将  $tr$  转化成  $G$  中的路段序列  $e^1 \rightarrow e^2 \rightarrow \dots \rightarrow e^7$ , 如图2所示。

在 HMM 模型中可对具有隐藏状态和可观测状态的序列进行建模<sup>[21]</sup>, 如图3所示, 隐藏状态序列为  $I = i_1, i_2, \dots, i_k$ , 观测序列为  $O = o_1, o_2, \dots, o_k$ 。观测概率即为隐藏状态生成对应的观测状态的概率; 初始状态概率即为观测序列中第一个状态的观测概率; 转移概率为当前的状态转移到下一状态的概率<sup>[22]</sup>。

基于 HMM 的定位纠偏方法即是给定一个算法模型和某个特定的定位坐标观测序列, 求出最可能产生这个观测序列的真实轨迹。将此模型应用在露天矿车高精度定位纠偏中时, 模型中的每个定义对应的实际含义见表1。

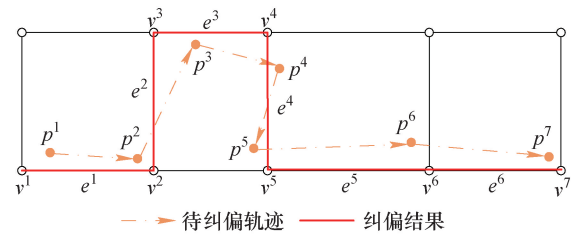


图2 定位纠偏示例

Fig. 2 Example of positioning correction

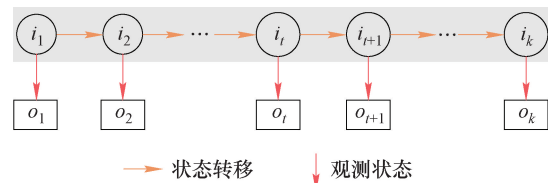


图3 隐马尔可夫模型

Fig. 3 Hidden Markov model

表1 参数对应表

Table 1 Parameter correspondence table

参数	公式	本文参数的含义
隐藏状态 $Q$	$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ , $N$ 为隐藏状态数量	露天矿车实际所在的道路位置信息
可观测状态 $V$	$V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$ , $M$ 为观测状态数量	定位系统终端接收到的露天矿车定位信息
状态转移序列 $A$	$A = [a_{ij}]_{N \times N}$ , $a_{ij} = P(i_{t+1} = q_j   i_t = q_i)$ 为状态 $q_i$ 转移到状态 $q_j$ 的概率	露天矿车前后两个定位坐标点与其对应的车辆实际道路位置点之间的关系越接近, 转移概率就越大
状态观测序列 $B$	$B = [b_{ij}]_{N \times M}$ , $b_{ij} = P(o_t = v_j   i_t = q_i)$ 为状态 $q_i$ 生成观测 $v_j$ 的概率	定位坐标点距离候选路段越近, 观测概率就越大
初始状态概率向量 $\tau$	$\tau_i = P(i_1 = q_i)$ , $\sum_{i=1}^N \tau_i = 1$	露天矿车某段轨迹初始位置点的概率, 即该定位坐标点的观测概率

本文定义相关术语及符号如下:

(1) 矿车定位坐标点  $p$ : 露天矿车的定位系统终端所显示的位置信息, 可表示为

$$p = [\text{id}, t, \text{lat}, \text{lon}, v, f] \quad (1)$$

式中,  $\text{id}$  为矿车的唯一标识;  $t$  为时间戳;  $\text{lat}$  为矿车的纬度;  $\text{lon}$  为矿车的经度;  $v$  为矿车当时行驶的速度;  $f$  为方向。

(2) 矿车轨迹  $T$ : 在某一段时间内按顺序收集的同一辆矿车的定位坐标点序列, 可表示为

$$T = p^1 \rightarrow p^2 \rightarrow \dots \rightarrow p^i \rightarrow \dots \rightarrow p^k$$

$$p^i t < p^{i+1} t, 1 \leq i \leq k \quad (2)$$

式中,  $k$  为轨迹中所包含的露天矿车定位坐标点的数量。

(3) 矿车待纠偏轨迹  $T_{i,j}$ : 露天矿车轨迹中的一部分连续片段, 即  $T$  的子轨迹, 记为

$$T_{i,j} = p^i \rightarrow \dots \rightarrow p^j, 1 \leq i \leq j \leq k$$

(4) 露天矿路网: 露天矿路网可以表示为一个有向图  $G = \{V, E\}$ 。其中, 顶点  $v \in V$  为露天矿中某一个路段的起点或终点; 有向边  $e \in E$  对应露天矿中某一条路段, 可表示为

$$e = [\text{id}_r, \text{start}, \text{end}, \text{len}] \quad (3)$$

式中,  $\text{id}_r$  为路段的唯一标识号;  $\text{start}$  为路段的起始点;  $\text{end}$  为路段的结束点;  $\text{len}$  为该路段的长度。

(5) 矿车定位坐标点的候选路段集  $E_C^i$ : 已知露天矿车定位坐标点  $p^i$  和露天矿路网  $G = \{V, E\}$ ,  $p^i$  在  $G$  上的候选路段集可表示为

$$E_C^i = \{e \mid l(p^i, e) < r, e \in E\} \quad (4)$$

式中,  $l(p^i, e)$  为  $p^i$  到  $e$  的最短距离;  $r$  为指定距离阈值。

(6) 矿车定位坐标点的候选点集  $C^i$ : 矿车待纠偏定位坐标点距离其候选路段最近的位置点。第  $\xi$  个候选路段  $e_\xi^i \in E_C^i$  对应的候选点为  $c_\xi^i, 1 \leq \xi \leq \psi, \psi$  为待纠偏定位坐标点候选路段的数量。矿车定位坐标点  $p^i$  的所有候选点构成的集合称为候

选点集  $C^i$ 。

(7) 矿车定位纠偏后的轨迹  $T_T$ : 露天矿车辆轨迹经纠偏之后的轨迹, 记为

$$T_T = s^i \rightarrow \dots \rightarrow s^j, 1 \leq i \leq j \leq k$$

## 2 露天矿车高精度定位纠偏模型

### 2.1 矿车轨迹数据预处理

由于定位信号会受到各种因素的影响, 矿车的定位轨迹数据可能出现重复或者异常现象<sup>[23-25]</sup>。因此, 在矿车定位轨迹纠偏之前, 需要进行轨迹数据清洗、轨迹密度稀疏化和轨迹分段等处理。

(1) 轨迹数据清洗: ①去除冗余点。矿车的定位设备信号不稳定, 会导致重复接收矿车的定位信息、矿车突然停止或者以非常低的速度行驶, 造成定位轨迹数据前后信息基本一致, 这些都属于冗余数据。通过对比轨迹序列中连续相邻的定位坐标点信息, 合并位置相同的数据。②去除漂移点。当矿车的驾驶速度过快时, 会产生超越露天矿区道路范围内的定位坐标点, 这些点就是漂移数据<sup>[26]</sup>。通过设立速度阈值对露天矿车速度大于阈值的定位坐标点数据进行剔除, 本文依据露天矿干线道路运输限速情况设定速度阈值为 32 km/h。

(2) 轨迹密度稀疏化: 由于露天矿车运输矿石的行驶路线在一定时间内是固定不变的, 车辆定位坐标点会大量堆叠到此路线上, 因此需要对定位轨迹点进行抽稀, 以降低轨迹密度。具体操作是, 将轨迹序列中两个连续定位坐标点之间的距离进行测量, 设定一个最小距离限值, 如果测量的距离小于限值, 则删除两个连续定位坐标点之间的第二个点; 重复以上操作, 直到所有两个连续定位坐标点之间的距离不小于限值。基于矿区生产实际情况并且经过实验测试后, 本文设定前后两个定位坐标点之间的最小距离限制为 5 m, 其表达式如下:

$$S = 2\Omega \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{a}{2} + \cos(\text{lat}_i) \cos(\text{lat}_j) \sin^2 \frac{b}{2}} \geq 0.005 \text{ km} \quad (5)$$

$$\Omega = \sqrt{(6378 \cos \theta)^2 + (6357 \sin \theta)^2}$$

$$a = \text{lat}_i - \text{lat}_j, b = \text{lon}_i - \text{lon}_j, 1 \leq i \leq j \leq k$$

式中,  $S$  为两个连续定位坐标点之间的距离;  $(\text{lat}_i, \text{lon}_i)$  为前一个点的经纬度;  $(\text{lat}_j, \text{lon}_j)$  为后一个点的经纬度;  $\Omega$  为露天矿区到地球质心的距离; 6 378 为赤道半径, km; 6 357 为极半径, km;  $\theta$  为该露天矿区的经度, 本文取  $33^\circ$ 。

(3) 轨迹分段: 指将一条长的轨迹分解成多

条短的子轨迹。本文通过时间信息对矿车轨迹进行分段。当在规定时间内对矿车的轨迹进行分段时, 能尽量避免轨迹定位信息重复出现在同一条道路上。经过多次试验后设定矿车每 20 min 就对轨迹进行分段处理, 示例如图 4 所示。

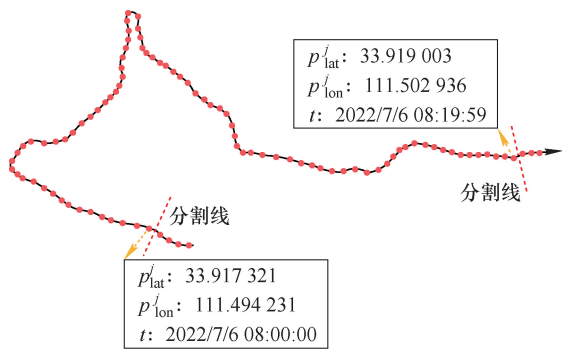


图4 轨迹分段示例

Fig. 4 Example of trajectory segmentation

### 2.2 候选纠偏路段点检索优化

在定位纠偏过程中,对距离待纠偏轨迹点超过一定阈值的路段进行舍弃,既不影响定位纠偏准确率,又能提高纠偏效率。因此,建立以定位坐标点为圆心,以固定距离阈值为半径的圆形缓冲区,与该区域相交的路段为待纠偏轨迹点的候选路段,每条路段上最靠近圆心的点为候选点,该区域以外的路段在定位坐标点进行计算时不会产生影响,可直接对其进行裁剪处理。设定位坐标点  $p^i$  为当前待纠偏的定位轨迹点,以该点为圆心,半径  $r$  的圆形缓冲区内的路段  $e_1^i, e_2^i, e_3^i, e_4^i$  为其候选路段,区域外被裁剪的路段不在考虑范围,将定位坐标点  $p^i$  投影到其对应的候选路段上,得到候选点  $c_1^i, c_2^i, c_3^i, c_4^i$ ,如图5所示。一般来说,每个点的候选路段数量不固定,缓冲区的半径是一个经验值,与定位误差成正比,根据现场实际工况,本文设定缓冲区半径  $r=20\text{ m}$ 。

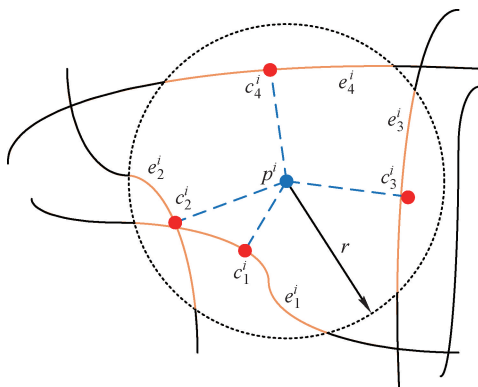


图5 候选路段点搜索

Fig. 5 Search for candidate road segment points

### 2.3 矿车高精度定位纠偏

矿车的定位轨迹序列为观测序列,定位坐标点的候选路段点为隐藏序列,通过建立定位纠偏HMM优化模型,计算矿车定位坐标点初始状态概

率、观测概率和转移概率。

#### 2.3.1 定位纠偏观测概率

矿车定位坐标候选点代表其真实所在位置的概率就是观测概率,定位坐标点距离候选路段越近,其观测概率就越大,反之越小。定位观测点与候选路段之间的距离概率服从正态分布,观测概率  $N(c_\xi^i)$  的计算如下:

$$N(c_\xi^i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x_\xi^i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

$$x_\xi^i = \text{dist}(c_\xi^i, p^i)$$

式中,  $x_\xi^i$  为定位坐标点  $p^i$  与其对应的候选点  $c_\xi^i$  之间的欧几里得距离;  $\mu$  为平均值,取0;  $\sigma$  为标准差,取20 m。

矿车定位轨迹坐标点序列中第一个定位坐标点的观测概率为初始状态概率。

#### 2.3.2 定位纠偏转移概率

转移概率指的是从  $t-1$  时刻  $p^{i-1}$  的候选点  $c_{\xi_{i-1}}^{i-1}$  转移到  $t$  时刻  $p^i$  的候选点  $c_{\xi_i}^i$  的概率。原始的HMM定位纠偏算法在计算转移概率时,只考虑定位坐标点之间的距离,对于露天矿车来说,结合定位距离因素和车辆行驶方向因素计算转移概率,更能充分考虑车辆行驶的历史信息,使得定位纠偏的精度更高。

定位距离因素代表露天矿真实路网上前后两个车辆位置点之间距离与对应的前后两个定位观测点之间距离的关系,如图6所示。图中  $d$  和  $w$  的值越接近,转移概率就越大。考虑该因素的计算式如下:

$$M_D(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) = \frac{\min\{d_{(i-1) \rightarrow i}, w_{(\xi_{i-1}, i-1) \rightarrow (\xi_i, i)}\}}{\max\{d_{(i-1) \rightarrow i}, w_{(\xi_{i-1}, i-1) \rightarrow (\xi_i, i)}\}} \quad (7)$$

式中,  $d_{(i-1) \rightarrow i}$  为定位坐标点  $p^i$  与其前一个定位坐标点  $p^{i-1}$  之间的欧几里得距离;  $w_{(\xi_{i-1}, i-1) \rightarrow (\xi_i, i)}$  为真实路段中  $c_{\xi_{i-1}}^{i-1}$  和  $c_{\xi_i}^i$  之间最短路径的长度。

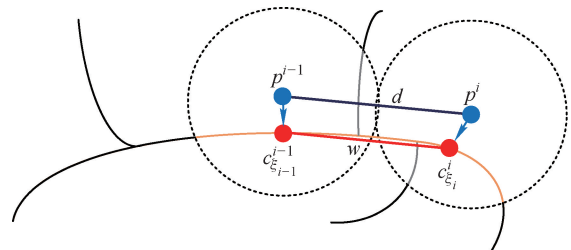


图6 定位距离因素

Fig. 6 Positioning distance factor

车辆行驶方向因素代表从候选点  $c_{\xi_{i-1}}^{i-1}$  到下一个候选点  $c_{\xi_i}^i$  的线段与对应的定位轨迹点的线段之间的角度偏差,如图7所示。角度偏差  $\alpha$  越小,转

移概率越大。考虑该因素的计算式如下：

$$M_V(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) = \frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为  $c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i$  和  $p^{i-1} \rightarrow p^i$  之间的角度偏差。

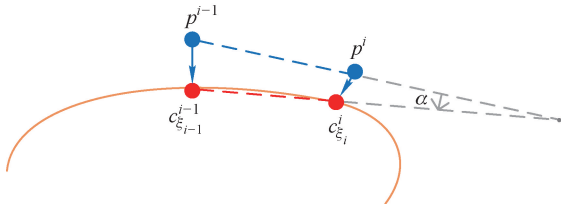


图7 车辆行驶方向因素

Fig.7 Vehicle driving direction factor

定位距离因素和车辆行驶方向因素两者关系相互独立,则最终转移概率  $M(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i)$  的计算如式(9)所示。

$$M(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) = M_D(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) M_V(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) \quad (9)$$

### 2.4 最优定位纠偏路径搜索

基于露天矿车待纠偏轨迹序列与其候选点之间的关系建立的定位纠偏 HMM 优化模型,采用 Viterbi 算法求解,以此得到最优定位纠偏路径。结合上文的初始状态概率、观测概率和转移概率,最优纠偏序列  $s^1, s^2, \dots, s^k$  的概率计算:

$$P(s^i) = \max_{1 \leq j \leq k} [P(s^{i-1}) M(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i)] N(c_{\xi_i}^i) \quad (10)$$

Viterbi 算法利用动态规划思想来求解最优路径,基本步骤:

(1) 初始化局部状态,即求解待纠偏矿车轨迹点的初始状态概率。

(2) 按序列遍历所有待纠偏矿车轨迹点,对于每一个定位坐标点,找到其对应的所有候选路段点,并结合前一个定位坐标点的候选路段点,利用式(11)计算矿车当前定位坐标点的所有候选路段点的概率。

$$P(c_{\xi_i}^i) = P(c_{\xi_{i-1}}^{i-1}) M(c_{\xi_{i-1}}^{i-1} \rightarrow c_{\xi_i}^i) N(c_{\xi_i}^i) \quad (11)$$

(3) 所有矿车待纠偏轨迹点的概率计算结束之后,概率最大的候选路段点作为纠偏后定位坐标点。回溯查找对应的前一个定位坐标点的候选路段点,直到回溯到矿车轨迹最初的定位坐标点,此时的结果即是最优纠偏轨迹序列。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 实验设计与数据准备

本实验通过无人机于 2022 年 5 月对河南洛阳某

露天矿区进行倾斜摄影,利用 Agisoft Photoscan 对该露天矿进行建模,导出 TIFF 格式的数字高程模型,将其进一步修复后导入 GIS 平台中,通过坐标转换工具将坐标系转换成与定位点坐标系一致的 WCS84 坐标系,并对矿区内的主干道路以及新增的临时道路进行矢量标注,最终形成整个露天矿区的路网(图 8)。



图8 露天矿区路网

Fig.8 Road network map of open-pit mining area

本实验记录共 12 074 个定位轨迹点数,为减少纠偏过程的计算量并提高纠偏的计算效率,需要对轨迹数据进行数据预处理(图 9)。其中,图 9 (b)中数据清洗后的轨迹点数为 10 383 个,图 9 (c)中轨迹密度稀疏化后的轨迹点数为 2 430 个,图 9(d)为 2022 年 7 月 6 日 08:00 ~ 08:20 的一条轨迹路段,此段轨迹点数为 116 个。

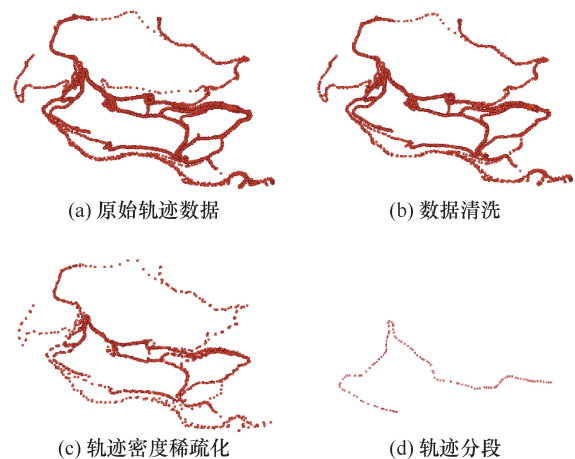


图9 定位轨迹数据预处理

Fig.9 Data preprocessing of positioning trajectory

### 3.2 定位纠偏结果分析

河南洛阳某露天矿区的车载定位系统使用的是单点定位模式,定位精度通常小于 2.5 m,但发生漂移时定位精度衰变约 10 m。基于本文提出的

改进 HMM 纠偏方法可将定位精度提升至厘米级。部分纠偏实验结果如图 10 所示,橙色线为露天矿路网,蓝色点为矿车待纠偏轨迹点,绿色虚线为最终的定位纠偏结果。该方法在不同结构路段中都具有较好的定位纠偏效果。其中,图 10(b)为 2022 年 7 月

6 日 08:00 ~ 08:20 的一条定位轨迹序列的纠偏结果,该轨迹中与车辆实际路段的最大偏差距离为 11.210 m,纠偏后与实际位置的距离为 0.066 m,此定位结果与车辆实际所在路段位置几乎一致。不同路段下,纠偏前后的定位精度见表 2。

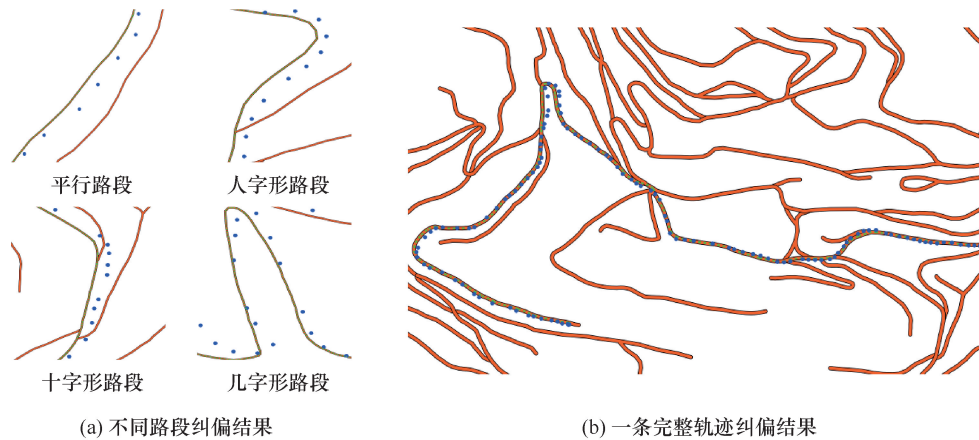


图 10 露天矿车高精度定位纠偏结果

Fig. 10 High precision positioning correction results of open-pit mine truck

表 2 不同路段下纠偏前后的定位精度

Table 2 Positioning accuracy before and after the correction of deflection under different road sections

路段结构	平均定位精度/m	该方法纠偏后定位精度/m
平行路段	6.465	0.049
人字形路段	7.261	0.024
十字形路段	6.674	0.082
几字形路段	6.213	0.008

表 3 纠偏准确率对比

Table 3 Comparison of aorrection accuracy

定位纠偏方法	轨迹点总数 N/个	正确纠偏轨迹点数 T/个	纠偏准确率 AC/%
原始 HMM 定位纠偏方法	2 430	1 927	79.3
本文方法	2 430	2 168	89.2

### 3.3 定位纠偏性能分析

为了验证本文提出的露天矿车高精度定位纠偏方法的纠偏效果和模型性能,将本文方法与原始的 HMM 定位纠偏方法在纠偏准确率与纠偏效率上进行对比分析。

#### 3.3.1 纠偏准确率

纠偏准确率(AC)是指正确纠偏的轨迹定位坐标点数量与轨迹点总量的比值,其计算如下:

$$AC = \frac{T}{N} \quad (12)$$

式中, T 为正确纠偏到真实路段上的轨迹点数量; N 为待纠偏的轨迹点总量。

本文选取经过预处理后的 2 430 个矿车轨迹定位坐标点进行实验,对两种方法纠偏的准确率进行比较,结果见表 3,可见本文方法纠偏效果更好,准确率达到了 89.2%。

本文还选取待纠偏定位轨迹点数量分别为 18,36,47,66,82,101,116 的轨迹进行实验,充分对比原始 HMM 定位纠偏方法与本文方法的纠偏准确率。如图 11 所示,经过改进之后的方法整体比原始 HMM 定位纠偏方法纠偏准确率更高。

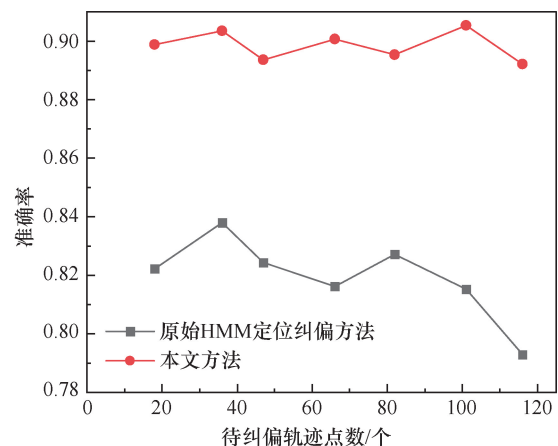


图 11 原始 HMM 与本文方法纠偏准确率对比

Fig. 11 Comparison of correction accuracy between original HMM and proposed method



### 3.3.2 纠偏效率

高精度定位纠偏操作是矿车的路径规划与智能调度的重要基础,纠偏效率是必须要考虑的因素。本文选取待纠偏定位轨迹数量分别为 18,36,47,66,82,101,116 的轨迹,对比原始 HMM 定位纠偏与本文方法定位纠偏的效率。如图 12 所示,随着轨迹点数的增加,两种方法的纠偏时间都有所增加,但是本文方法的纠偏效率一直优于原始 HMM 定位纠偏方法,其中待纠偏轨迹点数是 116,原始 HMM 定位纠偏方法纠偏时间为 0.510 s,而本文方法纠偏时间为 0.086 s。对于整体实验平均纠偏时间而言,原始 HMM 定位纠偏方法纠偏时间为 0.432 s,本文所提方法纠偏时间为 0.055 s,平均纠偏时间提高了 0.377 s。

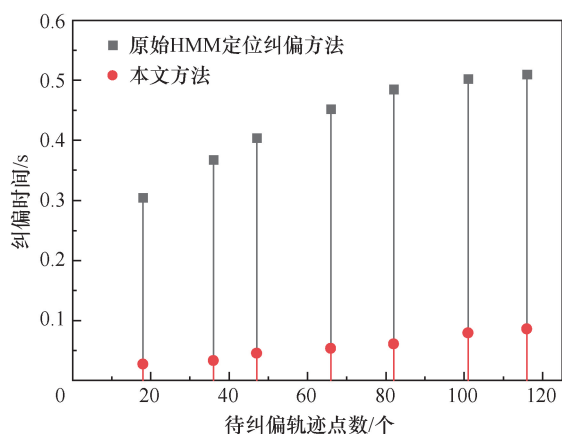


图 12 原始 HMM 与本文方法纠偏时间对比

Fig. 12 Comparison of correction time between original HMM and proposed method

## 4 结论

本文针对露天矿区车辆定位偏离的问题,提出了基于改进 HMM 的露天矿车高精度定位纠偏方法。该方法可依据矿车轨迹定位坐标点的历史定位信息,有效地将车辆偏离的定位坐标点纠偏到其实际所在的道路上。同时,针对露天矿的复杂路网背景,能够在自建矿区真实路网地图的基础上,通过算法模型高效地实现矿车的高精度定位纠偏。

实验结果表明,定位纠偏 HMM 优化模型纠偏准确率达到 89.2%,相比原始 HMM 定位纠偏方法提升了 9.9 个百分点,使得单点定位模式下的定位精度达到厘米级,并且平均纠偏时间仅需 0.055 s。

针对露天矿车的高精度定位纠偏任务,本文方法只考虑了待纠偏露天矿车定位坐标点的前一个定位信息点,对于复杂的露天矿车行驶轨迹,充分考虑历史定位信息可以更好地提升定位纠偏精度,这也是下

一步露天矿车高精度定位纠偏所要改进的地方。

## 参考文献

- [1] 李学现,顾清华,阮顺领,等. 考虑能耗动态变化的露天矿卡车运输最优路径规划[J]. 煤炭学报,2021,46(S1):590-600.  
Li Xuexian, Gu Qinghua, Ruan Shunling, et al. Optimal transportation path planning of truck in open-pit mine under dynamic energy consumption [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 590-600.
- [2] 程平,李晓光,顾清华,等. 露天矿新能源纯电动卡车的智能调度优化及应用[J/OL]. 金属矿山:1-11 [2022-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20211223.1738.002.html>.
- [3] Husam K Salih Juboori Mohanad F Jwaid. Vehicles for open-pit mining with smart scheduling system for transportation based on 5G[J]. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education: TURCOMAT, 2021, 12(5):827-835.
- [4] Wang B Y, Han Y, Wang S Y, et al. A review of intelligent connected vehicle cooperative driving development [J]. Mathematics, 2022, 10(19):3635.
- [5] 李星星,张伟,袁勇强,等. GNSS 卫星精密定轨综述:现状、挑战与机遇[J]. 测绘学报,2022,51(7):1271-1293.  
Li Xingxing, Zhang Wei, Yuan Yongqiang, et al. Review of GNSS precise orbit determination: status, challenges, and opportunities [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1271-1293.
- [6] Dong L J, Sun D Y, Han G J, et al. Velocity-free localization of autonomous driverless vehicles in underground intelligent mines [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9):9292-9303.
- [7] 朱递,刘瑜. 一种路网拓扑约束下的增量型地图匹配算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2017,42(1):77-83.  
Zhu Di, Liu Yu. An incremental map-matching method based on road network topology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(1): 77-83.
- [8] 唐炉亮,靳晨,杨雪,等. 基于 GPS 时空轨迹的路网拓扑自动变化检测[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2017,42(10):1381-1386.  
Tang Luliang, Jin Chen, Yang Xue, et al. Road network topology automatic change detection based on GPS spatio-temporal trajectories [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(10): 1381-1386.
- [9] 谢博晖,吴健平. GPS 轨迹数据纠偏方法研究[J]. 计算机技术与发展,2012,22(7):223-226.  
Xie Bohui, Wu Jianping. Research of map matching

- method for GPS tracking data[J]. *Computer Technology and Development*, 2012, 22(7): 223-226.
- [10] 王浩岩,刘远刚,李少华,等. GNSS 高采样率路径增量地图匹配方法[J/OL]. *测绘学报*; 1-15 (2022-08-22) [2022-08-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2089.P.20220622.1739.002.html>.
- [11] Huang Z F, Qiao S J, Han N, et al. Survey on vehicle map matching techniques[J]. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2021, 6(1): 55-71.
- [12] Chao P F, Hua W, Zhou X F. Trajectories know where map is wrong: an iterative framework for map-trajectory co-optimisation[J]. *World Wide Web*, 2020, 23(1): 47-73.
- [13] Jiang L L, Chen C X, Chen C, et al. From driving trajectories to driving paths: a survey on map-matching Algorithms [J]. *CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction*, 2022, 4(3): 252-267.
- [14] 于娟,杨琼,鲁剑锋,等. 高级地图匹配算法: 研究现状和趋势[J]. *电子学报*, 2021, 49(9): 1818-1829.  
Yu Juan, Yang Qiong, Lu Jianfeng, et al. Advanced map matching algorithms: a survey and trends [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(9): 1818-1829.
- [15] 樊娜,尉青青,康军,等. 基于动态加权的城市路网地图匹配算法[J]. *测控技术*, 2018, 37(1): 154-158.  
Fan Na, Yu Qingqing, Kang Jun, et al. Map matching algorithm for urban road network based on dynamic weight[J]. *Measurement & Control Technology*, 2018, 37(1): 154-158.
- [16] 滕志军,张宇,李昊天,等. 复杂路网的自适应 D-S 证据理论地图匹配算法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(2): 524-530.  
Teng Zhijun, Zhang Yu, Li Haotian, et al. Adaptive D-S evidence theory map matching algorithm of complex road network[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2021, 51(2): 524-530.
- [17] 李卫东,侯丽虹. 基于三次 B 样条曲线拟合的列车定位方法研究[J]. *控制工程*, 2017, 24(1): 135-140.  
Li Weidong, Hou Lihong. A study on the train positioning method based on cubic B-spline curve fitting[J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(1): 135-140.
- [18] Xu H, Liu H C, Tan C W, et al. Development and application of an enhanced Kalman filter and global positioning system error-correction approach for improved map-matching[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2010, 14(1): 27-36.
- [19] Jagadeesh G R, Srikanthan T. Online map-matching of noisy and sparse location data with hidden Markov and route choice models[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(9): 2423-2434.
- [20] 吉晓冬,瞿圆媛,符世琛,等. 基于 SVD-Unscented 卡尔曼滤波的掘进机行进调度纠偏研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(3): 354-363.  
Ji Xiaodong, Qu Yuanyuan, Fu Shichen, et al. Path tracking of mining boom road-header using SVD-Unscented Kalman Filtering [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(3): 354-363.
- [21] Grewal J K, Krzywinski M, Altman N. Markov models—hidden Markov models[J]. *Nature Methods*, 2019, 16(9): 795-796.
- [22] 王勇,周松,邢策梅. HMM 的地名地址时空数据引擎构建方法[J]. *测绘科学*, 2020, 45(10): 161-167.  
Wang Yong, Zhou Song, Xing Cemei. The address spatiotemporal data engine building method based on HMM [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(10): 161-167.
- [23] 曹士龙,刘根友,王生亮,等. GPS 超长基线解算的误差特性与精度分析[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2023, 48(2): 260-267.  
Cao Shilong, Liu Genyou, Wang Shengliang, et al. Bias characteristics and accuracy analysis of GPS ultra long baseline solution [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 260-267.
- [24] Li C L, Fu Y C, Yu F R, et al. Vehicle position correction: a vehicular blockchain networks-based GPS error sharing framework[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(2): 898-912.
- [25] 陈伟,杜路遥,孔海洋,等. 面向智能网联汽车定位的协同地图匹配算法[J]. *交通信息与安全*, 2021, 39(6): 162-171.  
Chen Wei, Du Luyao, Kong Haiyang, et al. A cooperative map matching algorithm for intelligent and connected vehicle positioning[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2021, 39(6): 162-171.
- [26] 刘子政,李默颖,黄长青,等. 顾及速度约束的基于时间序列 GPS 漂移数据处理方法[J]. *测绘地理信息*, 2017, 42(1): 14-18.  
Liu Zizheng, Li Moying, Huang Changqing, et al. GPS trajectory data drift processing method based on time series considering velocity constraints [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(1): 14-18.

(责任编辑:陈骏)