

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.007

# 基于 SINS-里程计-地图匹配的地铁列车定位方法研究

王博韬<sup>1</sup>, 任升莲<sup>1</sup>, 陈义华<sup>1</sup>, 李英明<sup>2</sup>, 骆进赛<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 华为技术有限公司, 广东 深圳 518129)

**摘要:**针对地铁列车运行环境特殊、定位信息获取困难的问题,文章提出一种联合导航方法。该方法基于捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS)-里程计组合与改进地图匹配算法的联合使用,在导航时,首先收集 SINS 和里程计输出的速度、角速度和姿态数据,利用卡尔曼滤波算法进行组合定位计算,再通过地图匹配算法对输出数据进行修正,得到最终的定位数据。仿真实验结果表明,在地铁列车环境中进行 SINS-里程计组合导航,可以很大程度地减小定位误差,所得定位数据经过地图匹配算法修正后,定位精度在多种轨迹实验中能达到 m 级,相较于 SINS 导航最大可提升 80% 以上。该文联合导航方法适用于地铁列车的准确定位。

**关键词:**组合导航;地铁列车定位;捷联惯性导航系统(SINS);卡尔曼滤波;地图匹配

**中图分类号:**U284.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)11-1478-08

## Research on metro train positioning method based on SINS-odometer-map matching

WANG Botao<sup>1</sup>, REN Shenglian<sup>1</sup>, CHEN Yihua<sup>1</sup>, LI Yingming<sup>2</sup>, LUO Jinsai<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen 518129, China)

**Abstract:** In view of the special operating environment of metro trains and the difficulty in obtaining positioning information, this paper proposes a combined navigation method. This method is based on the joint use of strapdown inertial navigation system (SINS)-odometer combination and an improved map matching algorithm. During navigation, the speed, angular velocity and attitude data output by the SINS and odometer are first collected, and the combined positioning calculation is carried out using the Kalman filtering algorithm. Then, the output data is corrected through the map matching algorithm to obtain the final positioning data. The results of simulation experiments show that the SINS-odometer combined navigation in the metro train environment can greatly reduce the positioning error. After the positioning data is corrected by the map matching algorithm, the positioning accuracy can reach the meter level in various trajectory experiments, demonstrating a maximum improvement of more than 80% over SINS navigation. It is suitable for the accurate positioning of metro trains.

**Key words:** combined navigation; metro train positioning; strapdown inertial navigation system (SINS); Kalman filter; map matching

近年来我国城市交通尤其是城市轨道交通发展迅速,地铁出行已经成为我国大部分城市居民

的重要出行方式。地铁列车控制系统需要准确的位置信息支持,这对地铁列车的定位精度提出了

收稿日期:2023-07-12;修回日期:2023-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72074198);自然资源部部门预算资助项目(121101000000180044)

作者简介:王博韬(1997—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

任升莲(1963—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:1999800079@hfut.edu.cn.

更高的要求。目前,国内外轨道交通常使用的定位方法有轨道电路、应答器、计轴器、电子地图定位、多普勒雷达、卫星定位等<sup>[1]</sup>,但是单一的定位方法均存在一些不足,例如,轨道电路定位精度低且铺设与维护成本高,应答器无法提供连续定位,计轴器需铺设道边测量设备,卫星定位在隧道环境下无信号或信号微弱而无法使用等。

捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS)是一种基于车辆自身运动学特性和惯性传感器来确定列车位置和状态的方法,具有实时性好、不受环境影响的优点,但仍存在定位误差随时间累计而增大的问题。因此,将多种定位方式进行组合,探索卫星信号受限环境下的组合导航定位方法成为目前地铁列车导航定位研究的主要趋势。文献[2]提出基于 SINS 和地磁测量的地铁列车定位方法,并设计构建地铁列车定位系统开发平台,实验结果表明其定位误差在 140 s 内能保持在 1 m 左右;文献[3]提出基于通道差分的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)-SINS 紧组合导航算法,其紧组合导航定位系统在“少星”情况下表现良好;文献[4]通过有线连接将全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)和惯性导航系统(inertial navigation system, INS) 2 个子系统整合到同一个定位系统单元中,提出一种针对卫星信号受限环境的最小二乘支持向量机(least square support vector machine, LSSVM)增强列车联合定位方法,北向位置误差由 16 m 降至 2 m,东向位置误差由 20 m 降至 2 m 以内。

里程计通过测量列车的速度、加速度和方向等参数,推算出列车的位置和姿态等参数,不需要外部信号支持,适用于无法使用 GNSS 等定位系统的地下场景。文献[5]通过在传统的列车定位子系统中引入加速度传感器,并设计了基于里程计、多普勒雷达和应答器等组件的传感器信息融合架构,成功提升了列车定位子系统的定位性能和精度。

考虑到地铁列车的运行是限制于固定轨道之上的,因此可将这一关键的约束条件作为一元传感器信息参与对列车组合定位系统的定位过程<sup>[6]</sup>,将电子地图作为辅助来对主传感器的定位结果进行修正,以应对传感器定位精度下降的情况。文献[7]在多源组合模式的基础上,研究了基于数字轨道地图辅助的北斗-INS 深组合列车定位方法,为国内数字轨道地图应用于列车定位奠

定了较好的理论基础。文献[8]对基于数字电子地图辅助的 BDS-INS 列车自定位算法进行深入研究,提出一种基于极大似然准则的深组合列车定位自适应无损卡尔曼滤波(maximum likelihood based adaptive unscented Kalman filter, MLAUKF)算法,实现了定位算法的优化和信息的有效融合。

本文提出一种基于 SINS-里程计与地图匹配的地铁列车联合定位方法,设计直线轨迹、曲线轨迹及综合轨迹 3 种路段进行仿真实验,并对纯 SINS 定位、SINS-里程计组合导航、基于 SINS-里程计-地图匹配定位 3 种定位方法的效果进行对比分析,以期实现无卫星信号情况下的地铁列车准确定位。

## 1 SINS-里程计组合定位方法

### 1.1 SINS-里程计组合定位原理

基于 SINS 与里程计的地铁列车组合定位方法是采用以 SINS 为主、里程计为辅的定位方式,其原理涉及姿态测量、航位推算和数据融合 3 个部分,如图 1 所示。

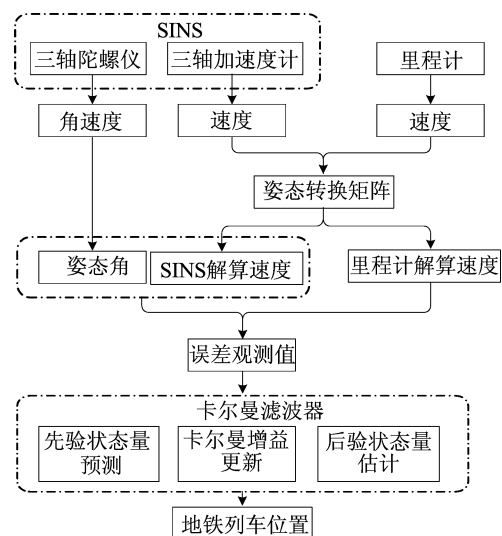


图 1 SINS-里程计组合定位原理

首先 SINS 对准后得到初始的姿态转换矩阵,随着地铁列车移动,更新姿态转换矩阵,将加速度与角加速度积分,得到载体坐标系下的速度与角速度,进一步积分得到导航坐标系下地铁列车参考姿态角与参考位移 1;同时里程计根据姿态角计算出参考位移 2;最后将 SINS 与里程计计算的位移数据之差作为误差观测值输入卡尔曼滤波器<sup>[9]</sup>,对 SINS 数据进行校正与补偿,最终输出

地铁列车位置。

## 1.2 坐标系

为方便描述地铁列车姿态,本文用到如下坐标系:①载体(即地铁列车)坐标系(b系),地铁列车前进方向为 $x_b$ 轴,车身平面上与移动方向垂直的方向为 $y_b$ 轴,与车身平面垂直的方向为 $z_b$ 轴;②导航坐标系,选取地理坐标系(g系)为导航坐标系(n系),以安装SINS所在地铁车厢重心为中心,规定 $x_n, y_n, z_n$ 分别指向东、北、天方向。此外,地铁列车的航向角为 $\varphi$ ,俯仰角为 $\theta$ ,横滚角为 $\gamma$ 。

## 1.3 SINS 解算原理

### 1.3.1 姿态更新

姿态解算在SINS中至关重要,影响系统精度。姿态更新<sup>[10]</sup>主要有方向余弦法、四元数法、欧拉角法等。四元数法是一种常用的姿态更新方法,具有算法简单、易于操作和实用性强的优势。规范化四元数 $\mathbf{Q}=[q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$ ( $q_1 \sim q_4$ 为实数)能够描述刚体绕定轴旋转运动的过程。载体坐标系至导航坐标系某时刻的姿态转换矩阵 $\mathbf{C}_b^n$ 可用一组四元数表示为:

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $T_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 3$ )表示某时刻地铁列车的姿态特征。

姿态转换矩阵的更新实质为四元数的更新。本文采用等效旋转矢量法对四元数更新,公式为:

$$\mathbf{Q}(k+1) = \mathbf{Q}(k) \otimes \mathbf{Q}_k^{k+1} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{Q}(k+1)$ 、 $\mathbf{Q}(k)$ 分别为 $k+1$ 和 $k$ 时刻的姿态四元数; $\otimes$ 为四元数乘法; $\mathbf{Q}_k^{k+1}$ 为由 $k$ 至 $k+1$ 时刻的姿态变化四元数。

取得姿态转换矩阵后,可求解得到导航坐标系下地铁列车姿态角 $\psi$ 为:

$$\psi = \begin{bmatrix} \gamma \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(-\frac{T_{31}}{T_{33}}\right) \\ \arcsin T_{32} \\ \arctan \frac{T_{12}}{T_{22}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.3.2 速度和位置更新

通过 $\mathbf{C}_b^n$ 将地铁列车加速度投影至导航坐标系下,得到地铁列车速度微分方程为:

$$\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}^b - (2\boldsymbol{\omega}_{re}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \quad (4)$$

其中: $\mathbf{v}^n$ 为SINS得到的导航坐标系下地铁列车速度, $\mathbf{v}^n=[v_E \ v_N \ v_U]^T$ , $v_E, v_N, v_U$ 分别为 $\mathbf{v}^n$ 在

东向、北向、天向的分量; $\mathbf{f}^b$ 为载体坐标系下加速度计测得的比力; $\boldsymbol{\omega}_{re}^n$ 为地球坐标系相对于地心坐标系的旋转角速度; $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ 为导航坐标系相对于地球坐标系的旋转角速度, $\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \left[ -\frac{v_N}{R_M+h} \quad \frac{v_E}{R_N+h} \right. \\ \left. \frac{v_U}{R_N+h} \tan L \right]^T$ , $R_M, R_N$ 分别为地铁列车所在地理位置的子午圈与卯酉圈曲率半径, $L, h$ 分别为SINS得到的地铁列车纬度、高度; $\mathbf{g}^n$ 为导航坐标系下重力加速度。式(4)表明,只有在加速度计输出中去除有害加速度 $\mathbf{a}=(2\boldsymbol{\omega}_{re}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n - \mathbf{g}^n$ 才能得到地铁列车运动的加速度。

地铁列车静止时, $\dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{0}$ ,SINS据此初对准,得到初始的姿态转换矩阵。基于速度方程,SINS的位置 $\mathbf{P}$ 微分方程为:

$$\dot{\mathbf{P}}^n = \begin{bmatrix} L \\ \lambda \\ h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N+h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E \\ v_N \\ v_U \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{P}^n$ 为SINS得到的导航坐标系下地铁列车地理坐标; $\lambda$ 为SINS得到的地铁列车经度。通过上述方法,即可得到SINS解算后的姿态、速度、位置方程。

## 1.4 里程计定位原理

目前轨道交通中使用的里程计大多为轮轴脉冲传感器,采用脉冲方式输出采样时间间隔内的里程增量,里程计安装在车轮轮轴上。当地铁列车在运行过程中正常行驶,里程计的输出值为地铁列车运行方向的速度量<sup>[10]</sup>。设地铁列车上里程计的坐标系为m系,是与地铁列车固连的右-前-上坐标系,即 $ox$ 轴沿地铁列车纵轴向前, $oy$ 轴沿地铁列车横轴向右, $oz$ 轴沿垂直地面向上,里程计在采样时间间隔内输出的脉冲数 $N$ 在m系投影矢量为:

$$\mathbf{N}^m = [0 \ N \ 0]^T \quad (6)$$

地铁列车上的SINS坐标系为载体坐标系b系,把里程计坐标系转换为SINS坐标系的旋转矩阵为 $\mathbf{C}_b^m$ ,设 $K_D$ 为里程计刻度因子,则里程计输出的位置增量在b系的投影为:

$$\Delta \mathbf{S}^b = \mathbf{C}_b^m K_D \mathbf{N}^m \quad (7)$$

进一步整理后,计算得到里程计的位置增量为:

$$\Delta \mathbf{S}^b = \begin{bmatrix} \Delta S^b_x \\ \Delta S^b_y \\ \Delta S^b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_\varphi \cos \alpha_\theta \\ \cos \alpha_\varphi \cos \alpha_\theta \\ \sin \alpha_\theta \end{bmatrix} \frac{2\pi R n(t)}{N i_0} \quad (8)$$

其中: $\alpha_\varphi$ 、 $\alpha_\theta$  分别为地铁列车坐标系相对于里程计坐标系的航向角、俯仰角; $i_0$  为输出轴到齿齿轮传动比; $N$  为里程计旋转 1 周产生的脉冲数目; $n(t)$  为时间  $t$  内产生的脉冲数目; $R$  为行走轮的分度圆半径。

只考虑标度因数误差  $\delta K_D$ 、安装误差角  $\delta\alpha_\varphi$  和  $\delta\alpha_\theta$ , 则里程计实际输出的地铁列车坐标系下分量可简化为:

$$\Delta \bar{\mathbf{S}}^b = \begin{bmatrix} 1 & \delta\alpha_\varphi & 0 \\ -\delta\alpha_\varphi & 1 & \delta\alpha_\theta \\ 0 & -\delta\alpha_\theta & 1 \end{bmatrix} (1 + \delta K_D) (\Delta \mathbf{S}^b + \mathbf{w}_d) \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{w}_d$  为随机噪声干扰。

### 1.5 基于 SINS-里程计-卡尔曼滤波的组合算法

由于 SINS 输出地铁位置信息会随时间增加出现误差累计的情况, 而卡尔曼滤波是一种对系统进行最优估计的方法, 可以准确地更新系统的均方根误差 (root mean square error, RMSE)<sup>[11]</sup>, 因此, 将上述 SINS 与里程计的位移之差作为卡尔曼滤波器的观测值, 以卡尔曼滤波器的输出值作为 SINS 误差的补偿值, 对 SINS 数据进行校正与补偿, 在一定程度上抑制误差的发散, 最终可以输出地铁列车较准确的位置<sup>[12]</sup>。

建立卡尔曼滤波系统方程:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t)\mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t) \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{F}(t)$  为系统矩阵;  $\mathbf{w}(t)$  为系统噪声,  $\mathbf{G}(t)$  为系统噪声转移矩阵, 两者一般为白噪声。

其中该组合导航状态变量为 18 维:

$$\mathbf{X} = [(\delta \mathbf{v}^n)^T \quad (\delta \boldsymbol{\varphi}^n)^T \quad (\delta \mathbf{P}^n)^T \quad (\boldsymbol{\varepsilon}^b)^T \quad (\nabla^b)^T \quad \delta K_D \quad \delta\alpha_\theta \quad \delta\alpha_\varphi]^T \quad (11)$$

其中:  $\delta \mathbf{v}^n$  为速度误差;  $\delta \boldsymbol{\varphi}^n$  为姿态误差;  $\delta \mathbf{P}^n$  为位置误差;  $\boldsymbol{\varepsilon}^b$  为陀螺仪零漂;  $\nabla^b$  为加速度计零漂。

由里程计输出的航位推算位置增量  $\Delta \mathbf{P}_{k+1}^D$  更新算法公式为:

$$\Delta \mathbf{P}_{k+1}^D = \mathbf{C}_{b(k)}^n \Delta \bar{\mathbf{S}}_{k+1}^b \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{C}_{b(k)}^n$  为  $k$  时刻 SINS 解算的姿态矩阵。

利用单位时间内 SINS 与航位推算位置增量之差作为量测, 将航位推算误差扩充到状态中。因为 SINS 位置解算使用微分计算, 随着时间的增加误差累积增大, 所以采用导航坐标系下 SINS 位置增量  $\Delta \mathbf{P}_{k+1}^n$  和航位推算位置增量的每秒位置之差作为量测值, 即

$$\mathbf{Z} = \sum_{k_0=1}^K \Delta \mathbf{P}_{k_0}^n - \sum_{k_0=1}^K \Delta \mathbf{P}_{k_0}^D \quad (13)$$

其中,  $K$  为 1 s 内位置更新次数。

在地铁列车运行过程中 SINS 解算的真实位置和里程计航位推算的位置相同, 根据公式进一步整理, 即可得到观测矩阵  $\mathbf{H}(t)$ , 即

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} K\mathbf{TI}_{3 \times 3} \\ -\sum_{k_0=1}^K (\mathbf{C}_{b(k_0-1)}^n \Delta \mathbf{S}_{k_0}^b) \times \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ -\sum_{k_0=1}^K (\mathbf{C}_{b(k_0-1)}^n \mathbf{M}_{k_0}^b) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中:  $T$  为 SINS 单位解算时间;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{M}_{k_0}^b$  为里程计航位推算输出的位置增量矩阵。

根据上述建立的状态方程和量测方程, 可以得到标准的卡尔曼滤波过程<sup>[13]</sup>, 其时间传播方程为:

$$\hat{\mathbf{x}}(k | k-1) = \mathbf{F}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1) \quad (15)$$

$$\mathbf{F}(k | k-1) =$$

$$\mathbf{F}(k, k-1)\mathbf{P}_0(k-1)\mathbf{F}^T(k, k-1) + \mathbf{Q}(k-1) \quad (16)$$

量测更新方程为:

$$\mathbf{K}(k) =$$

$$\mathbf{P}_0(k | k-1)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}_0(k | k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k | k-1) +$$

$$\mathbf{K}(k)[\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k | k-1)] \quad (18)$$

$$\mathbf{P}_0(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}_0(k | k-1) \quad (19)$$

其中:  $\mathbf{F}$  为状态矩阵, 由运动方程确定;  $\mathbf{Q}$  为过程噪声协方差矩阵, 量化过程噪声的分布;  $\mathbf{R}(k)$  为  $k$  时刻的观测噪声协方差矩阵, 描述观测误差的分布;  $\mathbf{z}(k)$  为  $k$  时刻的测量参数;  $\mathbf{P}_0(k)$  为  $k$  时刻的协方差矩阵, 反映最优值的可信度。将  $k-1$  时刻的导航参数作为系统输入, 修正  $k$  时刻下的导航参数, 修正后的值作为定位系统的输出, 得到地铁列车的位置与姿态。

对于地铁隧道无卫星信号的环境, SINS 虽然能够有效地输出地铁的位置信息, 但会存在误差随时间累计的情况, 而引入里程计与 SINS 进行卡尔曼滤波组合定位, 能在一定程度上抑制误差的发散, 保证导航系统的准确性和稳定性。

## 2 改进地图匹配定位算法

地图匹配是一种基于软件技术的定位误差修正技术, 地图匹配算法大致可分为以下 4 类: 基于几何图形的匹配算法、基于拓扑关系的匹配算法、基于概率的匹配算法及基于其他技术的地图匹配

算法<sup>[14]</sup>。在地铁列车定位中,地图匹配作为一种辅助定位手段具有重要的作用,能够通过提供轨道几何信息、站点位置信息等对主传感器定位结果进行修正,进一步提升地铁列车组合定位的精度。

### 2.1 基于地铁线路改进的地图匹配算法

常规的地图匹配算法可分为 2 个步骤:① 找到车辆当前所在的道路;② 求取车辆在匹配路段上的具体位置,即匹配点。对于地铁列车的地图匹配,因为列车不会偏离轨道行驶,所以可以跳过第 1 步,只进行第 2 步,根据传感器信息求取地铁列车在轨道上的具体位置<sup>[15]</sup>。因此,地铁列车的地图匹配算法相较于常规地图匹配算法,步骤更少且得到的结果更准确。本文基于地铁列车轨迹的特点,设计改进的地图匹配算法来对传感器输出结果进行修正。

不同于目前针对公路采取网格划分的地图匹配算法,本文选择将地铁线路进行分段处理,采用多级分段,将地铁线路上的每两个车站之间设置为一段,当搜索待匹配的路段时,无需遍历整条线路,只对地铁所在分段进行搜索,避免了大量计算。当地铁列车行驶在轨道上时,通过判断地铁列车航向角的变化,判定地铁列车行驶在直线或者曲线上,若地铁列车行驶在直线上,则可以采用直接投影法,垂足即匹配后的列车位置<sup>[16]</sup>。

直接投影法投影匹配示意图如图 2 所示。图 2 中: $P(X_0, Y_0)$  为定位点; $O(X_2, Y_2)$ 、 $O'(X_1, Y_1)$  为候选路段的首、末节点; $P_e(X_e, Y_e)$  为投影点。则投影点坐标计算公式如下。

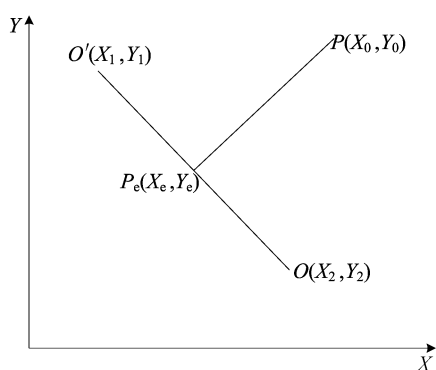


图 2 直接投影法投影匹配示意图

$OO'$  的直线方程为:

$$Y - Y_1 = k_1(X - X_1) \quad (20)$$

其中,  $k_1$  为直线方程的斜率。

$PP_e$  所在的直线方程为:

$$Y - Y_0 = -\frac{1}{k_1}(X - X_0) \quad (21)$$

$P$  到  $OO'$  的垂直距离,即  $PP_e$  的长度为:

$$|PP_e| = \frac{|AX_0 + BY_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (22)$$

其中,  $A, B, C$  为方程的参数。

投影点坐标  $(X_e, Y_e)$  为:

$$X_e = \frac{k_1^2 X_1 + X_0 - k_1 Y_1 + k_1 Y_0}{k_1^2 + 1} \quad (23)$$

$$Y_e = \frac{k_1^2 Y_1 + Y_0 - k_1 X_1 + k_1 X_0}{k_1^2 + 1} \quad (24)$$

若列车行驶在曲线上,则采用基于曲线拟合的地图匹配算法<sup>[17]</sup>。基于曲线拟合的地图匹配示意图如图 3 所示。建立曲线拟合的三次多项式为:

$$Y = aX^3 + bX^2 + cX + d \quad (25)$$

其中,  $a, b, c, d$  为三项多项式的参数。

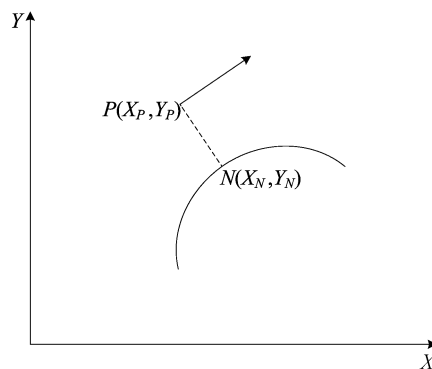


图 3 基于曲线拟合的地图匹配示意图

通过最小二乘法的原理对曲线上采集的信息进行拟合,得出近似曲线。若定位点  $P$  的坐标为  $(X_p, Y_p)$ ,则通过此时的航向角可以得出定位点  $P$  所在方程的斜率  $k_2$ ,进而得出其方程为:

$$Y - Y_p = -\frac{1}{k_2}(X - X_p) \quad (26)$$

将式(25)与式(26)联立,可以得出匹配后的匹配点  $N$  的坐标。

### 2.2 改进的地图匹配算法步骤

改进的地图匹配算法具体步骤如下:

- 1) SINS 和里程计进行定位推算,得到地铁列车定位信息,对定位信息进行预处理。
- 2) 计算地铁列车所在分段。
- 3) 判断列车航向角是否发生变化,若航向角发生变化,则采用基于曲线拟合的地图匹配算法;若列车航向角没有发生变化,则采用直接投影法。
- 4) 将匹配后的数据输出,作为此时列车的有效定位位置,并在电子地图上显示。

### 3 仿真实验与数据分析

本文电子地图的线路数据基于根据地铁列车

运行特征设计的地铁线路轨迹,采用 WGS-84 坐标系,其中每段轨迹均包含 1 600 个数据点。

### 3.1 地铁列车轨迹仿真

根据本文设计的地铁列车联合定位方法,利用 MATLAB 软件仿真地铁列车的轨迹。为验证算法在不同路段情况的定位效果,根据文献[18]中第 6.1.4 条第 2 款地铁列车两站之间的间距、第 6.2.1 条第 1 款关于曲线最小半径的规定,设计直线轨迹、曲线轨迹及综合轨迹 3 种路段进行仿真实验,仿真曲线如图 4 所示。

1) 直线轨迹(图 4a)。地铁列车轨道为一条长 2 720 m 的直线。假设列车以  $1.25 \text{ m/s}^2$  的加速度加速至  $20 \text{ m/s}$ ,然后匀速行驶 120 s,最后以  $1.25 \text{ m/s}^2$  的加速度减速直到静止。

2) 曲线轨迹(图 4b)。地铁列车轨道可分为 6 段:第 1 段是长为 100 m 的直线轨道;第 2 段为弧长 900 m、半径 573 m 的圆弧轨道;第 3 段为 400 m 的直线轨道;第 4 段为弧长 900 m、半径

573 m 的圆弧轨道;第 5 段为 400 m 的直线轨道;第 6 段为弧长 400 m、半径 573 m 的圆弧轨道。假设列车以  $2 \text{ m/s}^2$  的加速度加速至  $2 \text{ m/s}$ ,然后沿着轨道匀速运动 150 s。

3) 综合轨迹(图 4c)。假设某两站之间的地铁列车轨道分为 5 段:第 1 段是长为 560 m 的直线轨道;第 2 段为弧长 700 m、半径 573 m 的圆弧轨道;第 3 段为 400 m 的直线轨道;第 4 段为弧长 700 m、半径 573 m 的圆弧轨道;第 5 段为 560 m 的直线轨道。由于地铁列车不会像公交车等在运行的途中进行剧烈的加减速运动,一般只在出站和进站时进行匀加速和匀减速运动,因此,假设第 1 段初始时刻,列车以  $1.25 \text{ m/s}^2$  的加速度加速至  $20 \text{ m/s}$ ,然后进入匀速行驶;第 2 段地铁列车以  $2 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  的角速度右转弯;第 3 段地铁列车匀速行驶;第 4 段以  $2 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  的角速度左转弯;第 5 段初期匀速行驶,然后以  $1.25 \text{ m/s}^2$  的加速度减速至停车并入站。

综合轨迹的部分轨迹点数据见表 1 所列。

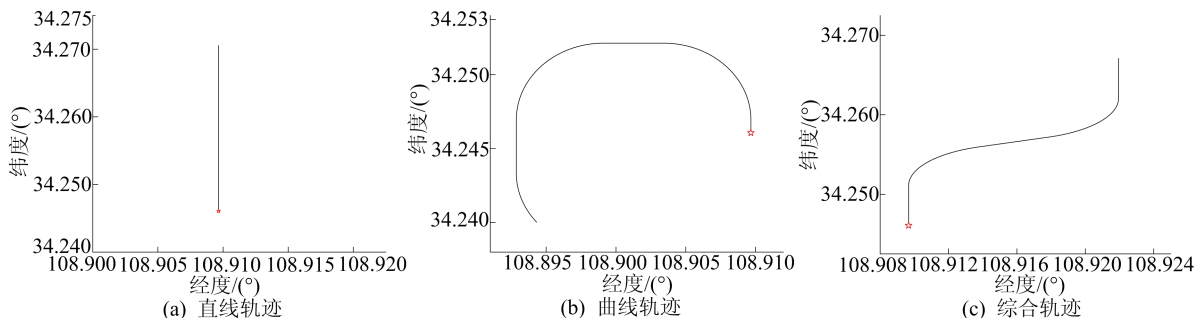


图 4 地铁列车 3 种轨迹仿真曲线

表 1 综合轨迹的部分轨迹点数据

序号	轨迹点	
	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)
1	108.909 664	34.246 048
2	108.909 664	34.246 053
⋮	⋮	⋮
100	108.919 543	34.257 972
101	108.919 712	34.258 086
102	108.919 876	34.258 204
⋮	⋮	⋮

### 3.2 组合导航精度分析

模拟 SINS 传感器的三轴陀螺仪角度随机游走为  $0.001 \text{ (}^\circ\text{)/h}^{1/2}$ ,陀螺测量随机常值漂移为  $3 \text{ (}^\circ\text{)/h}$ ;三轴加速度计测量零偏为  $10^{-4} \text{ g}$ ,速度随机游走为  $10^{-5} \text{ g/Hz}^{1/2}$ ;里程计刻度系数误差为 1%;SINS 与载体之间无安装误差角;SINS 初始

水平姿态误差角为  $0.5^\circ$ ,航向误差角为  $5^\circ$ ;初始位置误差为 10 m。采用 3 种设定轨迹下行驶的地铁列车惯性传感器数据及其对应噪声误差,进行 SINS 更新算法、SINS-里程计组合导航算法及地图匹配修正的仿真,记录姿态、速度和位置信息,最终得到的仿真轨迹如图 5 所示。

SINS、组合导航及地图匹配 3 种定位方法轨迹与设定理想轨迹的误差曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,在经过组合导航和地图匹配后,系统在校准间隔内抑制了定位误差的发散趋势,使定位误差明显减小。

综合轨迹下组合导航定位点与地图匹配点数据见表 2 所列。

本文选取误差平均值、误差最大值及 RMSE 3 个评价指标对定位效果做进一步评判,评价结果见表 3 所列。

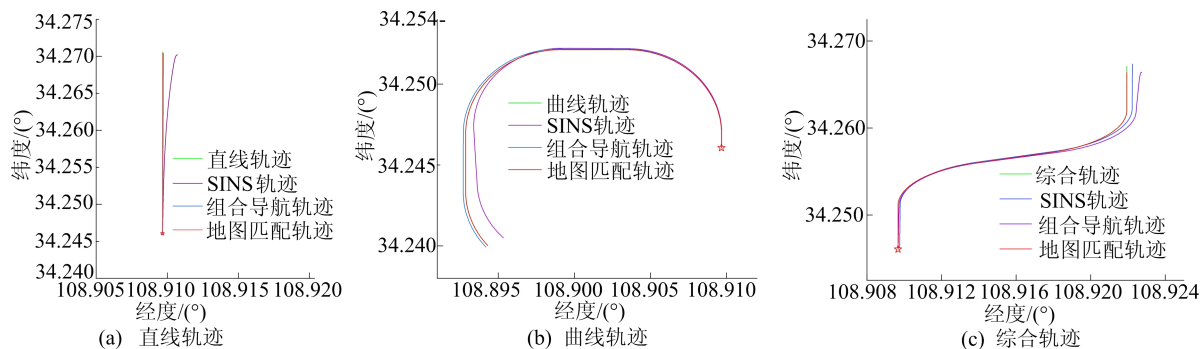


图 5 3 种设定理想轨迹与 3 种定位方法仿真轨迹

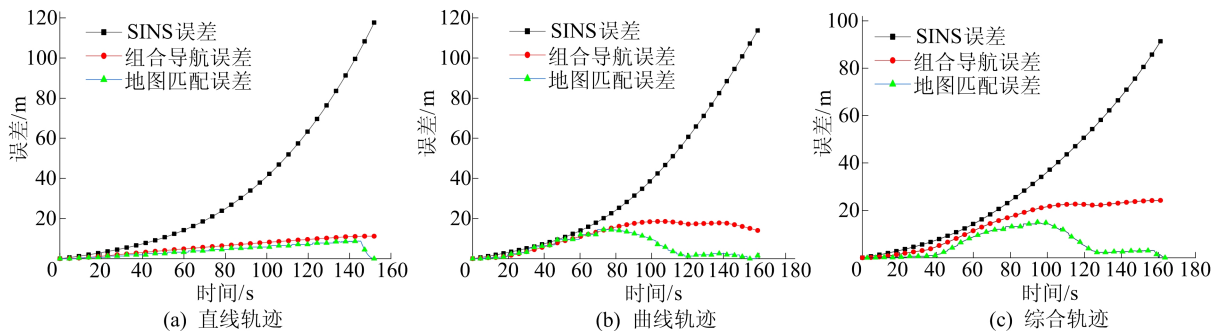


图 6 3 种定位方法轨迹与理想轨迹的误差曲线

表 2 综合轨迹下组合导航定位点与地图匹配点数据

序号	组合导航定位点		地图匹配点	
	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)
1	108.909 75	34.246 13	108.909 66	34.246 13
2	108.909 75	34.246 14	108.909 66	34.246 14
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	108.919 82	34.258 13	108.919 81	34.258 15
101	108.919 99	34.258 25	108.919 97	34.258 27
102	108.920 16	34.258 37	108.920 12	34.258 40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 3 种定位方法定位误差评价结果 单位:m

轨迹	评价指标	SINS 误差	组合导航误差	地图匹配误差
直线轨迹	平均值	34.554 7	5.988 7	4.219 1
	最大值	117.820 6	11.220 5	8.825 4
	RMSE	47.760 1	6.959 8	5.011 8
曲线轨迹	平均值	36.137 2	11.896 7	5.879 9
	最大值	114.893 6	18.572 6	14.485 4
	RMSE	49.225 3	13.570 6	7.640 7
综合轨迹	平均值	31.577 6	14.397 9	5.807 2
	最大值	92.045 0	24.192 8	15.145 0
	RMSE	41.285 4	16.872 1	7.759 0

由表 3 可知:对于只依靠 SINS 定位的场景, SINS 定位误差最大可达到 117 m;加入里程计位置信息后,配合卡尔曼滤波算法能达到 10 m 级别的定位误差;在组合导航联合地图匹配算法后,3 种轨迹的定位误差平均值均减小到 10 m 以内,均在 5 m 左右,相较于组合导航,直线轨迹、曲线

轨迹、综合轨迹的 RMSE 分别减小 27.99%、43.70%、54.01%,平均 RMSE 相比于纯 SINS 定位、组合导航分别提高约 85.24%和 45.43%。上述结果表明,地图匹配修正后的组合导航方法对于 3 种轨迹场景均有较好的适应性且有较高的定位精度。

为了分析 3 种轨迹下定位方法的误差减小效果,考察 3 种轨迹下组合导航算法、地图匹配修正后相对于纯 SINS 方法的误差减小率,3 种定位方法定位误差效果对比如图 7 所示。

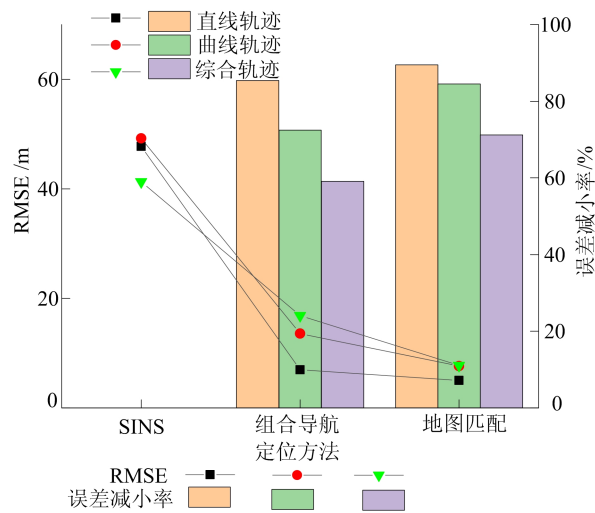


图 7 3 种定位方法定位误差效果对比

从图 7 可以看出:组合导航算法直线轨迹的误差减小率超过 80%,曲线轨迹误差减小率在 60%~80%之间,综合轨迹的误差减小率低于 60%;地图匹配修正后直线轨迹和曲线轨迹的误差减小率均超过 80%,综合轨迹的误差减小率也超过 60%。由此可见,对于 3 种地铁行驶轨迹,使用地图匹配修正后各轨迹定位精度改善效果相较于组合导航算法均有提升,直线轨迹效果最好,曲线轨迹效果较差,综合轨迹效果最差。

本文设计 3 种地铁列车轨迹,通过仿真实验得到纯 SINS 定位、SINS-里程计组合定位及 SINS-里程计-地图匹配定位 3 种定位方法的行驶轨迹数据。经过分析对比后发现,地图匹配修正的定位方法相较于其他 2 种方法克服了定位误差的发散,精度和稳定性最高,但定位精度改善效果会受地铁行驶轨迹影响,越复杂的轨迹,地图匹配修正的定位方法效果越差。

#### 4 结 论

本文通过 SINS-里程计组合导航与地图匹配算法的联合使用,实现无卫星信号情况下的地铁列车定位,通过直线轨迹、曲线轨迹及综合轨迹 3 种轨迹下的仿真实验,得到以下结论。

1) 在 3 种不同轨迹下,地铁列车依靠纯 SINS 定位行驶超过 150 s 后,产生的误差可达 100 m,误差较大。

2) 加入里程计位置信息后进行卡尔曼滤波组合导航,定位误差能减小到 10 m 左右,相较于纯 SINS 定位在导航性能上有很大的提升,但定位误差依然会随时间逐渐发散。

3) 通过对组合导航的结果进行地图匹配,在定位精度上相对于只进行组合导航又有很大的提升,3 种轨迹的平均误差均在 5 m 左右,平均 RMSE 相比于纯 SINS 定位、组合导航分别提高约 85.24%和 45.43%,抑制了误差的发散,显著提高了定位精度。

4) 对于不同的行驶轨迹,使用地图匹配算法的效果不同,轨迹越复杂,算法效果越差,但相较于纯 SINS 定位误差最大可减小 80%以上。因此,基于 SINS-里程计的组合定位方法在隧道环境内对于地铁列车位置信息的获取是行之有效的,再经过地图匹配后,更能抑制定位误差的发散,进一步提高定位精度,能够满足地铁列车行驶

环境下的定位需求。

#### [参 考 文 献]

- [1] 段亚鸣. 城市轨道交通列车定位设备[J]. 交通世界(运输车辆), 2015(3):50-51,65.
- [2] 柏靖基. 基于惯导/地磁的地铁列车定位系统研究[D]. 南京:南京理工大学,2019.
- [3] 孟琳,魏涛. 基于 BDS/SINS 紧组合导航的列车定位方法研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(9):37-42.
- [4] 姜维,余义志,蔡伯根,等. LSSVM 增强的受限环境列车定位精度优化方法[J]. 铁道学报, 2022, 44(1):65-70.
- [5] 仲腾. 基于卡尔曼滤波的多传感器信息融合的列车定位方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [6] 李四辉. 基于自主感知的列车完整性检测方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [7] 安毅. 数字轨道地图辅助的北斗/INS 深组合列车定位方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
- [8] 王维. 数字电子地图辅助的 BDS/INS 列车组合定位方法研究[D]. 西安:西北工业大学,2019.
- [9] 王浩然,王宏伟,李正龙,等. 基于捷联惯导与差速里程计的掘进机组合定位方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(9):148-156.
- [10] 严恭敏,李思锦,郭正东. 一种求解等效旋转矢量高阶误差补偿系数的新方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(3):347-352,396.
- [11] 张小康,肖本贤,肖献强,等. 基于 bounding-box 与卡尔曼滤波的优化压缩感知算法的目标定位[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(12):1623-1629,1642.
- [12] 付强文,秦永元,周琪. 改进量测的车载捷联惯导/里程计组合导航算法[J]. 测控技术, 2013, 32(7):134-137,141.
- [13] 秦永元. 惯性导航[M]. 2 版. 北京:科学出版社, 2020:290-318.
- [14] 王彪. 基于 GPS 车辆轨迹数据的地图匹配算法及应用研究[D]. 福州:福州大学,2018.
- [15] 李卫东,王霞,梁腾飞,等. 基于点到点的列车地图匹配算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(19):63-67.
- [16] LI F, BONNIFAIT P, IBÁÑEZ-GUZMÁN J. Map-aided dead-reckoning with lane-level maps and integrity monitoring[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2018, 3(1):81-91.
- [17] 石庆升,刘帅帅,尚庆松. 基于紧耦合 GNSS/INS 的高速列车精准定位研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(13):7-13.
- [18] 北京城建设计研究总院有限责任公司,中国地铁工程咨询有限公司. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. [出版地不详:出版者不详], 2013:35-50.

(责任编辑 张淑艳)