



## 基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法

江帆 康静静 皇行涛 朱真才 周公博 彭玉兴

### 引用本文:

江帆, 康静静, 皇行涛, 等. 基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 284–293.  
JIANG Fan, KANG Jingjing, HUANG Xingtao. A positioning method for underground trackless rubber wheel vehicle based on fusion of multiple encoders and strapdown inertial navigation system[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 284–293.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1944>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 惯导与视觉信息融合的掘进机精确定位方法

Precise positioning method of tunneling machine for inertial navigation and visual information fusion

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 236–248 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1003>

#### 基于惯导/全站仪组合的掘进机自主定位定向方法

Automatic positioning and orientation method of roadheader based on combination of ins and digital total station

煤炭科学技术. 2022, 50(8): 189–195 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f670d9dd-9d9c-4e0b-b623-2e4cc9b7e548>

#### 煤矿掘进装备光纤惯导多源异构噪声降噪方法研究

Study on noise reduction method of multiple heterogeneous noise of optical fiber inertial navigation for coal mine excavation equipment

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 390–399 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0850>

#### 基于惯性技术的掘进机组合定位方法

Integrated positioning method of roadheader based on inertial technology

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 300–310 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1648>

#### 基于IMU/UWB的井下采煤工作面端头采煤机定位试验研究

Research on shearer positioning experiment based on IMU and UWB at the end of underground coal mining working face

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 217–228 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0992>

#### 基于超宽带系统的采煤机端头定位策略及定位技术研究

Study on positioning strategy and technology at end of shearer based on ultra-wideband system

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 257–266 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ccd28950-5001-4341-ac92-06eacec24b59>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

江帆,康静静,皇行涛,等.基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法[J].煤炭科学技术,2024,52(S2):284-293.

JIANG Fan, KANG Jingjing, HUANG Xingtao, *et al.* A positioning method for underground trackless rubber wheel vehicle based on fusion of multiple encoders and strapdown inertial navigation system[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 284-293.

## 基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法

江帆<sup>1,2,3</sup>,康静静<sup>1</sup>,皇行涛<sup>4</sup>,朱真才<sup>1,2</sup>,周公博<sup>1,2</sup>,彭玉兴<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学机电工程学院,江苏徐州 221116;2.智能采矿装备技术全国重点实验室,江苏徐州 221116;3.徐州矿务集团有限公司博士后科研工作站,江苏徐州 221018;4.郑州恒达智控科技股份有限公司,河南郑州 450016)

**摘要:**针对煤矿井下传统无轨胶轮车定位定向技术精度低、可靠性差等问题,提出了一种基于多编码器与惯导融合的无轨胶轮车定位方法。根据多编码器数据特性,建立了无轨胶轮车轮式里程计运动学模型,进而推导了基于多编码器的航位推算算法。针对上述航位推算算法单独依赖编码器数据易导致定位发散的问题,将轮式里程计与捷联惯导姿态数据相结合,设计基于多编码器和捷联惯导的航位推算算法,该算法可以有效抑制航位推算误差的快速累积。在此基础上,采用扩展卡尔曼滤波算法对基于轮式里程计运动学模型解算的姿态数据和捷联惯导解算的姿态数据进行融合,通过提高航向精度来提高航位推算的定位精度。基于扩展卡尔曼滤波算法建立了捷联惯导/航位推算组合定位模型,针对建模不准确时扩展卡尔曼滤波存在滤波精度下降甚至发散的问题,提出了一种改进的自适应扩展卡尔曼滤波算法,通过实时估计并调整量测噪声来提高滤波的精度和稳定性。针对无轨胶轮车出现打滑或滑行等异常行驶状况导致的轮式里程计失效问题,建立了一种容错模型,实现了无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况的检测与隔离。搭建了移动小车实验系统,并将UWB定位结果作为参考真值,开展了综合跑车实验研究。实验结果表明:所提出的组合定位方法能够满足煤矿井下无轨胶轮车定位需求。

**关键词:**无轨胶轮车;航位推算;捷联惯导系统;组合定位;自适应扩展卡尔曼滤波

**中图分类号:**TD525

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2024)S2-0284-10

### A positioning method for underground trackless rubber wheel vehicle based on fusion of multiple encoders and strapdown inertial navigation system

JIANG Fan<sup>1,2,3</sup>, KANG Jingjing<sup>1</sup>, HUANG Xingtao<sup>4</sup>, ZHU Zhencai<sup>1,2</sup>, ZHOU Gongbo<sup>1,2</sup>, PENG Yuxing<sup>1,2</sup>

(1.School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.National Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Xuzhou 221116, China; 3.Postdoctoral Scientific Research Workstation of Xuzhou Mining Group Co., Ltd., Xuzhou 221018, China; 4.Zhengzhou Hengda Intelligent Control Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low accuracy and poor reliability of traditional trackless rubber tire vehicle positioning and orientation technology in coal mines, a trackless rubber tire vehicle positioning method based on the fusion of multiple encoders and inertial navigation is proposed. Based on the characteristics of multi encoder data, a kinematic model of a trackless rubber wheel odometer was established, and a heading calculation algorithm based on multi encoder was derived. In response to the problem of positioning divergence caused by relying solely on encoder data in the aforementioned dead reckoning algorithm, a dead reckoning algorithm based on multiple encoders and strapdown inertial navigation is designed by combining wheel odometry with attitude data. This algorithm can effectively suppress the rapid accumulation of dead reckoning errors. On this basis, the extended Kalman filtering algorithm is adopted to fuse the attitude data calculated based on the kinematic model of the wheel odometer and the attitude data calculated by the strapdown inertial navigation, and improve the positioning accuracy of the heading calculation by improving the heading accuracy. Based on the extended Kalman

收稿日期:2023-12-20

责任编辑:常琛

DOI: 10.12438/cst.2023-1944

**基金项目:**国家自然科学基金面上资助项目(52374163);江苏省自然科学基金杰出青年基金资助项目(BK20230047);中国博士后科学基金面上资助项目(2023M732966)

**作者简介:**江帆(1987—),男,湖南祁东人,副教授,博士。E-mail: jiangfan25709@163.com

filtering algorithm, a combined positioning model for strapdown inertial navigation/dead reckoning was established. To address the problem of decreased or even divergent filtering accuracy when modeling is inaccurate, an improved adaptive extended Kalman filtering algorithm was proposed. By estimating and adjusting measurement noise in real time, the accuracy and stability of the filtering were improved. A fault-tolerant model was established to detect and isolate abnormal driving conditions such as slipping or sliding of trackless rubber wheeled vehicles, which resulted in the failure of wheel odometers. We built a mobile car experimental system and used UWB positioning results as reference truth values to conduct comprehensive sports car experimental research. The experimental results show that the proposed combination positioning method can meet the positioning requirements of trackless rubber wheeled vehicles in coal mines underground.

**Key words:** trackless rubber wheel vehicle; dead reckoning; strapdown inertial navigation system; integrated positioning; adaptive extended Kalman filtering

## 0 引 言

在井工煤炭实际生产过程中,辅助运输工作是最重要的环节之一<sup>[1]</sup>。无轨胶轮车具有机动灵活、爬坡能力强、运行成本低以及运输效率高等优势,正逐步取代有轨电车成为煤矿井下主要的辅助运输设备<sup>[2-3]</sup>。由于煤矿井下巷道为半封闭空间,地质条件复杂多变、工作环境恶劣且巷道狭长多分支,传统人工主观驾驶存在堵车、撞车等安全隐患,影响煤炭安全高效生产和智慧矿山建设<sup>[4]</sup>。针对上述问题,亟须研究无轨胶轮车实时精确定位技术,为煤矿井下无轨胶轮车安全驾驶和智能调度提供基础<sup>[5-7]</sup>。

目前应用在煤矿井下的定位技术主要有无线定位技术以及惯性导航技术,其中无线定位技术包括激光扫描定位技术、蓝牙定位技术、Wi-Fi 定位技术、RFID 定位技术、ZigBee 定位技术以及 UWB 定位技术等<sup>[8-9]</sup>。虽然上述技术的应用促进了煤矿井下定位技术的发展,但由于无线信号反射引起的信号衰减、非视距场景以及多路径效应等问题使得无线定位技术在煤矿井下的应用受到一定限制<sup>[10]</sup>。惯性导航技术虽然自主性强且不受外界环境干扰,但存在累积误差问题<sup>[11]</sup>。

传统定位技术均有缺点及适用场景局限性等问题,一种有效的解决方案是通过组合具有不同特性的定位技术来提高定位系统在特定应用环境中的精度、稳定性和适应性<sup>[12]</sup>。牛小骥等<sup>[13]</sup>提出了基于视觉二维码和惯性导航的室内高精度定位定姿方法,采用反向平滑算法融合视觉观测信息,并结合惯导推算以提升系统定位精度及鲁棒性。马宏伟等<sup>[14]</sup>提出了基于惯导与全站仪的组合定位方法,并采用卡尔曼滤波进行组合定位系统的数据融合。周李兵<sup>[15]</sup>提出了基于激光 SLAM 和 UWB/INS 的组合定位技术,提高了定位系统的精度和可靠性。贺海涛等<sup>[16]</sup>提出了基于激光 SLAM 的组合定位方案,通过融合

激光雷达、里程计及 IMU 数据为车辆提供高精度定位数据。郭梁等<sup>[17]</sup>提出了基于捷联惯性导航和 RFID 技术的组合定位系统,利用 RFID 技术对车辆进行初始位置估计,设计了加速度误差补偿算法,提高了基于捷联惯性导航的车辆定位精度。LI 等<sup>[18]</sup>提出了 ESKF-Fusion 算法,将 UWB 定位系统与捷联惯导系统融合,提高了定位系统的鲁棒性和准确性。KAI 等<sup>[19]</sup>提出了结合超声波测距和双目机器视觉的定位策略,提高了系统避障精度。杜京义等<sup>[20]</sup>结合光电传感器和惯性传感器数据,通过双阈值算法来判断车辆行驶异常情况,提高了定位系统的可靠性。杨洁等<sup>[21]</sup>针对车辆打滑或滑行导致里程计失效的问题,设计了基于序贯卡尔曼滤波的 SINS/里程计组合定位模型,提高了定位系统的容错能力。UIIAH 等<sup>[22]</sup>提出了基于全球定位系统与惯性导航系统的融合算法,提高了系统的定位精度和可靠性。

综上所述,针对煤矿井下组合定位技术的研究取得了不少成果,所提方法也各有特点,但针对煤矿井下无轨胶轮车定位技术的研究尚不深入,且未能充分考虑车轮打滑或滑行等异常状况对定位精度的影响,存在自主性差、定向难以及可靠性不足等问题。针对复杂环境下无轨胶轮车精确定位问题,结合运动学建模、航位推算算法、捷联惯导算法、自适应扩展卡尔曼滤波算法、组合定位容错模型以及区间定位策略,提出一种基于多编码器与惯导融合的定位方法,该方法利用扩展卡尔曼滤波算法对二者数据进行融合,通过建立组合定位容错模型,实现煤矿井下无轨胶轮车的低成本、高精度可靠定位,为煤矿智能辅助运输系统建设提供理论基础。

## 1 航位推算算法

### 1.1 基于多编码器的车辆运动学建模

轮式编码器模块安装在无轨胶轮车的 2 个非转向轮连接轴上,可以同时测得无轨胶轮车在行驶过

程中2个车轮的前向速度。已知车体的基本尺寸,建立基于多编码器的无轨胶轮车运动学模型如图1所示,  $v_A$  为无轨胶轮车左轮的速度;  $v_B$  为无轨胶轮车右轮的速度;  $v_D$  为无轨胶轮车整体的前向速度;  $\psi$  为2相邻时刻无轨胶轮车航向角的变化量;  $\psi_1$  为下一时刻2轮轴心连接线与上一时刻2轮轴心连接线的夹角;  $\psi_2$  为2相邻时刻无轨胶轮车左右轮轴延长线的夹角;  $r$  为2车轮中心点距无轨胶轮车转动中心的距离;  $d$  为相邻2时刻右比左轮多走的距离;  $L$  为左右轮的间距;  $\Delta t$  为2个相邻时刻的时间差;  $\omega$  为无轨胶轮车绕两非转向轮连接轴中心点运动的角速度。

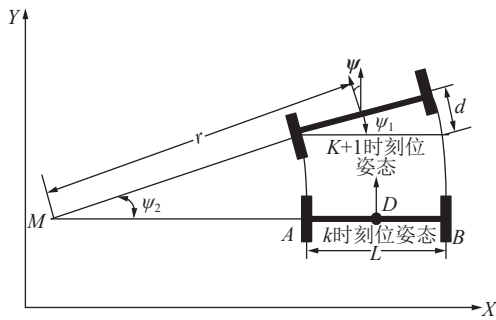


图1 基于多编码器的轮式里程计运动学模型

Fig.1 Kinematic model of wheel odometer based on multiple encoders

可得基于多编码器的无轨胶轮车的轮式里程计运动学模型输出:

$$\begin{bmatrix} v_D & \psi & \omega \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中,  $v_D = \frac{v_A + v_B}{2}$ ,  $\psi = \frac{(v_B - v_A) \cdot \Delta t}{L}$ ,  $\omega = \frac{v_B - v_A}{L}$ 。

## 1.2 基于多编码器和捷联惯导的航位推算

基于多编码器的航位推算算法仅依赖编码器数据,故容易导致其定位误差快速累积甚至发散,因此单独采用该航位推算算法难以满足定位精度要求。捷联惯导具有动态稳定性强的特点,在短时期内能够提供较高精度的姿态信息。利用轮式里程计和捷联惯导姿态信息构成航位推算算法,可以在一定程度上克服单独使用编码器进行航位推算引起的定位误差快速累积问题。

假设无轨胶轮车在正常行驶时未发生打滑或滑行等异常状况,轮式编码器测量的是无轨胶轮车的前向速度大小,构成车辆定位轮式里程计。由于里程计坐标系(简称  $m$  系)与车体固定,所以也称车体坐标系,其原点为无轨胶轮车非转向轮连接轴的中心,  $ox_m$  轴指向车体的正右方,  $oy_m$  轴指向车体的正前方,  $oz_m$  轴垂直于地面向上。根据里程计坐标系定义,可以得到在里程计坐标下的轮式里程计速度

输出:

$$v_D^m = \begin{bmatrix} 0 & v_D & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

其中,  $v_D$  为里程计坐标系下无轨胶轮车的前向速度。右向和天向速度均为0,可作为无轨胶轮车正常行驶时的非完整性运动学约束(NHC)条件。

假设载体坐标系( $b$ 系)与车体坐标系( $m$ 系)重合安装,通过IMU中的三轴陀螺仪可以实时解算出无轨胶轮车的姿态矩阵,记为  $C_b^m$ ,利用  $C_b^m$  对  $v_D^m$  进行坐标变换,可以得到导航坐标系( $n$ 系)下轮式里程计的速度输出:

$$v_D^n = C_b^n v_D^m \quad (3)$$

由轮式里程计速度输出  $v_D^n$  可得航位推算位置更新的微分方程:

$$\begin{aligned} \dot{L}_D &= \frac{v_{DN}^n}{R_M + h_D} \\ \dot{\lambda}_D &= \frac{v_{DE}^n \sec L_D}{R_N + h_D} \\ \dot{h}_D &= v_{DU}^n \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $L_D$ ,  $\lambda_D$  和  $h_D$  分别为无轨胶轮车所处位置的地理纬度、经度和海拔高度;  $R_M$  为地球子午圈主曲率半径;  $R_N$  为地球卯酉圈主曲率半径。

进一步,可得到航位推算位置更新递推公式:

$$\begin{aligned} L_{D(k)} &= L_{D(k-1)} + \frac{T_D \cdot v_{D(k)N}^n}{R_M + h_{D(k-1)}} \\ \lambda_{D(k)} &= \lambda_{D(k-1)} + \frac{T_D \cdot v_{D(k)E}^n \sec L_{D(k-1)}}{R_N + h_{D(k-1)}} \\ h_{D(k)} &= h_{D(k-1)} + T_D \cdot v_{D(k)U}^n \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $T_D = t_k - t_{k-1}$  为航位推算的更新周期。

## 1.3 基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法

为了进一步提高航位推算算法的定位精度和稳定性,采用扩展卡尔曼滤波算法对基于轮式里程计运动学模型解算的姿态数据和捷联惯导系统解算的姿态数据进行融合。将无轨胶轮车位姿  $\begin{bmatrix} x_k & y_k & z_k & \theta_k & \gamma_k & \psi_k \end{bmatrix}^T$  定义为扩展卡尔曼滤波的状态变量,其中,  $\psi$  为航向角,  $\theta$  为俯仰角,  $\gamma$  为横滚角,利用轮式里程计航位推算得到的位姿数据作为预测模型。由轮式里程计运动学模型得到系统状态方程的矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \psi_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \psi_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta d \cos \psi_{k-1} \\ \Delta d \sin \psi_{k-1} \\ \Delta \psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

建立扩展卡尔曼滤波系统的状态方程:



$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} \\ \mathbf{y}_{k-1} \\ \mathbf{z}_{k-1} \\ \boldsymbol{\theta}_{k-1} \\ \boldsymbol{\gamma}_{k-1} \\ \boldsymbol{\psi}_{k-1} \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}_{k-1}) + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}$$

其中,  $\boldsymbol{\Gamma}_{k-1}$  为系统噪声分配矩阵;  $\mathbf{W}_{k-1}$  为轮式里程计的噪声向量。

对应的雅克比矩阵为

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Delta d \sin \boldsymbol{\psi}_{k-1} \\ 0 & 1 & \Delta d \cos \boldsymbol{\psi}_{k-1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

然后, 利用捷联惯导系统解算的姿态数据作为量测模型, 建立扩展卡尔曼滤波的量测方程:

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k-1} \\ \mathbf{y}_{k-1} \\ \mathbf{z}_{k-1} \\ \boldsymbol{\theta}_{k-1} \\ \boldsymbol{\gamma}_{k-1} \\ \boldsymbol{\psi}_{k-1} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{H}_k$  为量测矩阵;  $\mathbf{v}_k$  为惯性测量单元的噪声向量, 且该噪声符合高斯分布。

最后, 根据所建立的系统模型和相关参数设置就可以利用扩展卡尔曼滤波算法基本方程进行系统状态预测和更新, 得到融合轮式里程计和捷联惯导数据的航位推算定位结果。

## 2 捷联惯导/航位推算组合定位模型

### 2.1 状态方程和量测方程

在进行捷联惯导/航位推算组合定位模型设计时, 首先对捷联惯导和航位推算误差进行建模分析, 得到误差方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varphi}} &= -\boldsymbol{\omega}_{in}^n \times \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{M}_1 \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{M}_2 \delta \mathbf{p} - \mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\varepsilon}^b \\ \delta \dot{\mathbf{v}}^n &= \mathbf{f}_{sf}^n \times \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{M}_3 \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{M}_4 \delta \mathbf{p} + \mathbf{C}_b^n \nabla^b \\ \delta \dot{\mathbf{p}} &= \mathbf{M}_5 \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{M}_6 \delta \mathbf{p} \\ \delta \dot{\mathbf{p}}_D &= \mathbf{M}_{D5} (\mathbf{v}_D^n \times \boldsymbol{\varphi}_D) + \mathbf{M}_{D6} \delta \mathbf{p}_D + \mathbf{M}_{D5} \mathbf{v}_D^n \delta k_D \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $\boldsymbol{\varphi}$  为姿态误差角;  $\mathbf{f}_{sf}^n$  为加速度计常值漂移标定误差。

假设陀螺漂移误差  $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 、加速度计偏置误差  $\nabla^b$  和轮式里程计刻度系数误差  $\delta k_D$  都为随机常值, 将捷联惯导和航位推算误差合并, 组成 19 维状态向量  $[\boldsymbol{\varphi} \ \delta \mathbf{v}^n \ \delta \mathbf{p} \ \boldsymbol{\varepsilon}^b \ \nabla^b \ \delta \mathbf{p}_D \ k_D]^T$ , 则捷联惯导/航位推算组合定位模型误差状态方程可以表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F} \mathbf{X} + \mathbf{G} \mathbf{W} \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{F}$  为系统状态转移矩阵;  $\mathbf{X}$  为卡尔曼滤波状态

向量;  $\mathbf{W}$  为系统状态噪声;  $\mathbf{G}$  为噪声分配向量。

将捷联惯导解算位置与航位推算位置之差作为卡尔曼滤波的量测量, 可以得到捷联惯导/航位推算组合定位模型量测方程如下:

$$\mathbf{Z} = \delta \mathbf{p}_{SINS} - \delta \mathbf{p}_{OD} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{V}$  为量测噪声; 量测噪声矩阵  $\mathbf{H}$  的取值为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & -\mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

综上, 可以得到捷联惯导/航位推算组合定位模型的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F} \mathbf{X} + \mathbf{G} \mathbf{W} \\ \mathbf{Z} = \mathbf{H} \mathbf{X} + \mathbf{V} \end{cases} \quad (14)$$

为了解决系统中存在的非线性问题, 以扩展卡尔曼滤波算法为基础, 对捷联惯导/航位推算组合定位模型进行线性化处理。将式(13)中连续的非线性方程改写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_k = \mathbf{f}(\mathbf{X}_k) + \mathbf{G}_k \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (15)$$

在最优估计  $\hat{\mathbf{X}}_k$  处进行线性化泰勒级数展开, 并取一阶近似值, 如下所示:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_k &= \mathbf{f}(\mathbf{X}_k)|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k} + \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \bigg|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k} \cdot \Delta \mathbf{X}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{h}(\mathbf{X}_k)|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k} + \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} \bigg|_{\mathbf{X}_k=\hat{\mathbf{X}}_k} \cdot \Delta \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (16)$$

在线性化后的系统方程中, 状态转移矩阵  $\boldsymbol{\Phi}_k$  和量测矩阵  $\mathbf{H}_k$  由  $\mathbf{f}()$  和  $\mathbf{h}()$  的雅克比矩阵替代, 分别记为

$$\boldsymbol{\Phi}_k = \mathbf{J}(\mathbf{f}(\hat{\mathbf{X}}_k)), \quad \mathbf{H}_k = \mathbf{J}(\mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_k)) \quad (17)$$

### 2.2 自适应扩展卡尔曼滤波

扩展卡尔曼滤波是一种非线性滤波方法, 其核心思想是将非线性系统近似线性化, 故其实质上是一种次优滤波方法。对于强非线性系统, 容易导致扩展卡尔曼滤波精度下降。此外, 如果系统建模不准确, 也会导致扩展卡尔曼滤波发散。即使在非平稳过程中, 准确的建模也会因为环境干扰使得  $\mathbf{R}, \mathbf{H}, \mathbf{Q}, \boldsymbol{\Phi}$  矩阵剧烈变化, 进而引起滤波发散。因此, 提出一种给定状态噪声协方差阵  $\hat{\mathbf{Q}}_k$ , 估计量测噪声协方差阵  $\hat{\mathbf{R}}_k$  的改进自适应扩展卡尔曼滤波算法 (IAEKF)。

滤波计算回路:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} &= \mathbf{f}(\hat{\mathbf{X}}_{k-1}) \\ \hat{\mathbf{X}}_k &= \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{e}_k \\ \mathbf{e}_k &= \mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) - \hat{\mathbf{r}}_{k-1} \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $\mathbf{e}_k$  为量测预测误差(新息),  $\mathbf{K}_k$  为卡尔曼滤波增益。

增益计算回路:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \hat{\mathbf{R}}_{k-1})^{-1} \\ \mathbf{P}_{k/k-1} &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \end{aligned} \quad (19)$$

其中,  $\mathbf{P}_k$  为状态估计的均方误差阵。

自适应估计器:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{r}}_k &= (1 - d_k) \hat{\mathbf{r}}_{k-1} + d_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_{k-1})] \\ \hat{\mathbf{R}}_k &= (1 - d_k) \hat{\mathbf{R}}_{k-1} + d_k \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \\ d_k &= \frac{1 - b}{1 - b^{k+1}} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $d_k$  为矫正因子,  $0 < b < 1$  称为渐消因子。当  $k$  无限大时,  $d_k \approx 1 - b$ , 渐消因子  $b$  取值越小,  $d_k$  越接近原值, 则对量测噪声变化的自适应能力就越强。渐消因子  $b$  也不能取得过小, 否则噪声估计结果会发生较大波动而影响滤波效果。根据经验, 其取值范围一般在  $[0.95, 0.995]$ 。改进自适应扩展卡尔曼滤波算法框架如图2所示。

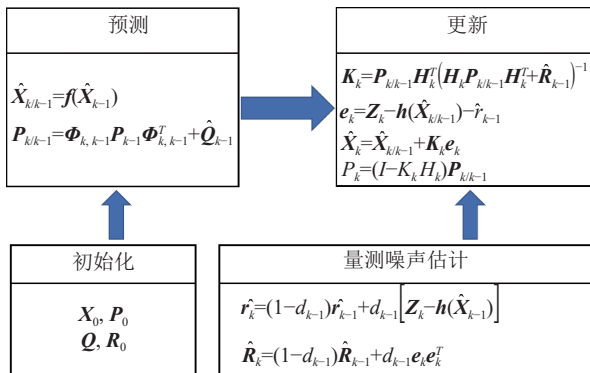


图2 改进的自适应扩展卡尔曼滤波算法流程

Fig.2 Flow chart of improved adaptive extended Kalman filtering algorithm

### 3 组合定位模型

#### 3.1 无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况的检测与隔离

无轨胶轮车在煤矿井下巷道内行驶时, 容易受行驶地面路况、车辆启停、工作载荷超载等因素影响而出现打滑或滑行等异常行驶状况。轮式编码器安装在无轨胶轮车非转向轮连接轴上, 故车轮打滑或滑行会使得编码器的输出数据不能反映无轨胶轮车的真实运动状态。在这种不良行驶状况下, 建模不准确会导致航位推算定位精度显著降低, 进而影响捷联惯导/航位推算组合定位模型的性能。

通过分析无轨胶轮车出现打滑或滑行等异常行驶状况时的特性和机理, 利用残差  $\chi^2$  检验法对无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况进行检测与隔离, 该方法是一种系统级的故障检测与隔离方法, 可以在滤波的同时判断量测信息是否有效, 从而实现无轨胶轮车出现打滑或滑行等异常行驶状况时的量测信息隔离。

在扩展卡尔曼滤波过程中, 将实际量测值  $\mathbf{Z}_k$  与量测预测值  $\hat{\mathbf{Z}}_{k/k-1}$  之间的差值  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  定义为残差(也称新息), 其表达式如下:

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k/k-1} = \mathbf{Z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) \quad (21)$$

当无轨胶轮车未发生打滑或滑行等异常行驶状况时, 残差  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  应满足零均值高斯白噪声分布, 其方差  $\sigma_k$  为

$$\sigma_k = \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{P}_{k/k-1}$  为扩展卡尔曼滤波状态一步预测均方误差阵;  $\mathbf{R}_k$  为量测噪声协方差矩阵。

当无轨胶轮车未发生打滑或滑行等异常行驶状况时, 残差  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  就不再符合零均值高斯白噪声分布。因此, 可以通过残差  $\tilde{\mathbf{Z}}_k$  的统计特性来判断无轨胶轮车是否发生打滑或滑行等异常行驶状况。

构造系统检测函数为

$$\lambda_k = \tilde{\mathbf{Z}}_k^T \sigma_k^{-1} \tilde{\mathbf{Z}}_k \quad (23)$$

式中,  $\lambda_k$  是服从自由度为  $m$  的  $\chi^2$  分布, 即  $\lambda_k \sim \chi^2(m)$ ,  $m$  为量测维数。

因此, 可以使用以下准则进行无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况的检测: 若  $\lambda_k \geq \chi_\alpha^2$ , 则认为无轨胶轮车出现打滑或滑行等异常行驶状况; 若  $\lambda_k < \chi_\alpha^2$ , 则认为无轨胶轮车行驶状况正常。

$\chi_\alpha^2$  为提前设定好的检测门限, 其值可通过查阅误差率  $\chi^2$  分布表获取。当检测得到系统某时刻无轨胶轮车出现打滑或滑行等异常行驶状况, 则认为该时刻轮式里程计量测信息异常, 从而隔离当前量测信息, 只进行状态更新。

#### 3.2 基于无轨胶轮车运输路线的区间定位技术

辅助运输巷道具有狭窄绵长、蜿蜒曲折且存在多巷道分支的结构特点, 给煤矿井下无轨胶轮车的实时精确定位带来很大挑战。通过对煤矿井下巷道进行结构分析, 提出基于无轨胶轮车运输路线的区间定位技术。首先, 通过建立煤矿井下巷道分布地图, 确定无轨胶轮车的运输路线; 然后, 根据运输路线内避车硐室的分布情况将无轨胶轮车的运输路线划分为若干个闭锁区间; 最后, 将每段闭锁区间定义

为无轨胶轮车的定位区间。

具体实施策略如图 3 所示,将双车道直线巷道同侧的 2 个避车硐室之间的区域划为定位区间,记为 $i_n(n=1,2,3\cdots)$ ,即避车硐室 $i$ 和避车硐室 $i+1$ 之间的定位区间为 $i_1$ ,避车硐室 $i+1$ 和避车硐室 $i+2$ 之间的定位区间为 $i_2$ 。同理,将单车道直线巷道的定位区间记为 $j_n$ ,将拐弯后的直线巷道的定位区间记为 $k_n$ 。为了处理三岔巷道区和拐弯区的定位区间划分,将三岔巷道区域内的避车硐室 $i+1$ 和避车硐室 $j$ 之间的定位区间记为 $j_0$ ,将拐弯巷道区域内的避车硐室 $i+n$ 和避车硐室 $k+1$ 之间的定位区间记为 $k_0$ 。此外,为了更好的满足实际工程需求,可以将定位区间界定为 2 个或 2 个以上避车硐室之间的区域。综上分析,采用区间定位技术可以实现无轨胶轮车在煤矿井下巷道的精细化定位,对于组合定位系统的累积误差具有很好的抑制作用。

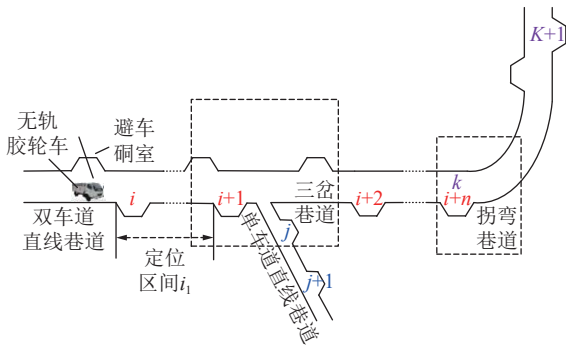


图 3 巷道区间定位策略

Fig.3 Positioning strategy diagram for underground tunnels

## 4 实验验证与分析

### 4.1 实验平台及实验场景设计

搭建基于 ROS 的移动小车实验平台进行综合跑车实验,该平台主要包括 MEMS 惯性传感器、双编码器、底层控制器和上位机等,并搭建 UWB 定位系统获取定位信息的参考真值。在矩形区域的 4 个角布置 UWB 定位基站,将 UWB 定位终端安装在移动小车实验平台上,以其中的一个定位基站为基准,建立二维平面直角坐标系。具体的实验平台和实验场景如图 4 所示。

### 4.2 航位推算定位精度测试

第 1 节分别介绍了基于多编码的航位推算算法、基于多编码器与捷联惯导的航位推算算法以及基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法。为了评估并比较这 3 种航位推算算法的定位精度,利用所搭建的移动小车实验平台进行跑车实验。在定位

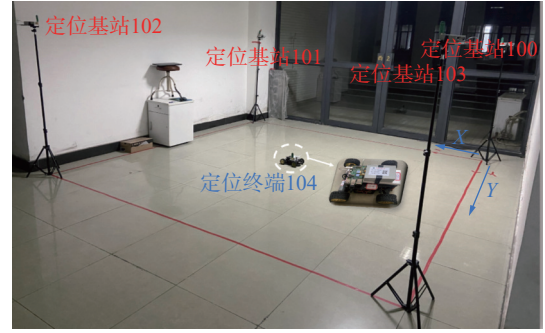


图 4 移动小车实验平台及实验场景

Fig.4 Mobile car experimental platform and experimental scenarios

精度评估环节,主要从航向精度和水平位置精度 2 个维度进行横向比较。实验场景设计如图 5 所示,控制移动小车实验平台从原点 A 曲线行驶到 B 点。

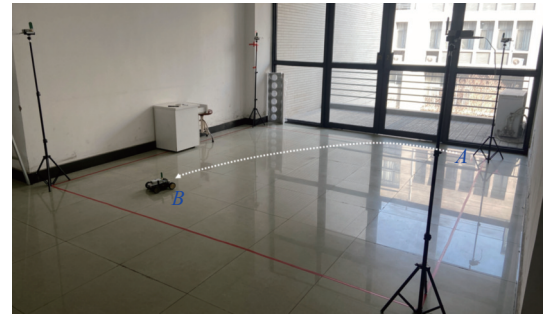


图 5 航位推算精度测试实验场景

Fig.5 Experimental scene of accuracy test of DR

由于实验所采用的 UWB 定位系统无法实时获取小车在移动过程中的姿态数据,采用 1 种简化的方式,即通过获取三者在小车运动结束时的姿态来评估各自的姿态解算精度。以实验场景里的地板刻线为基准,建立以小车定位参考点为原点,各坐标轴分别与主坐标轴平行的平面直角坐标系,如图 6 所示。此时小车前向轴与 x 轴的夹角即为小车的参考真实航向角 $\psi$ ,使用测角仪量得 $\psi \approx 72.8^\circ$ 。

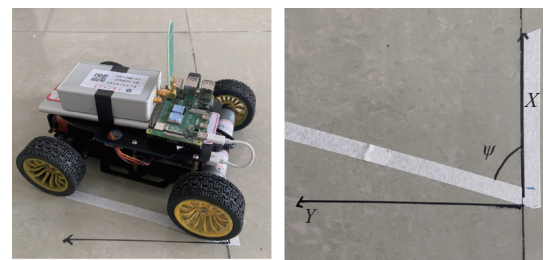


图 6 航向角参考真值获取示意

Fig.6 Schematic diagram for obtaining reference truth value of heading angle

接下来分别获取 3 种航位推算算法在定位结束

时的航向角,结果见表 1。从表 1 中的数据可以看出,基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法

航向精度最高,其在小车运动结束时的航向角为  $71.8886^{\circ}$ ,与真实值相差  $0.9114^{\circ}$ 。

表 1 航向角计算  
Table 1 Heading angle calculation

航位推算算法	姿态四元数	航向角
基于多编码器的航位推算算法	[0,0,0.574 59,0.818 44]	70.146 7
基于多编码器与捷联惯导的航位推算算法	[0,0,0.585 99,0.810 28]	71.745 3
基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法	[0,0,0.586 96,0.809 62]	71.888 6

此外,分别采用表 1 中 3 种航位推算算法进行定位解算,其定位结果如图 7 和图 8 所示,其中蓝色线表示基于多编码器的航位推算定位结果,绿色线表示基于多编码器和捷联惯导的航位推算算法定位结果,黑色线表示基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法定位结果,红色线表示 UWB 系统定位结果。

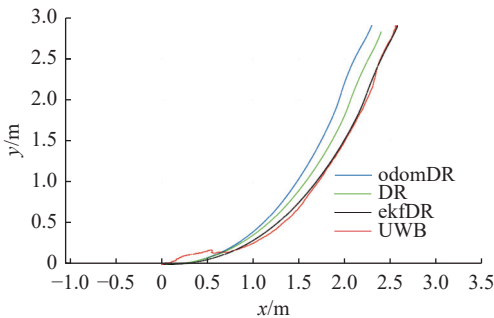


图 7 三种航位推算算法定位结果  
Fig.7 Positioning results of three DR algorithms

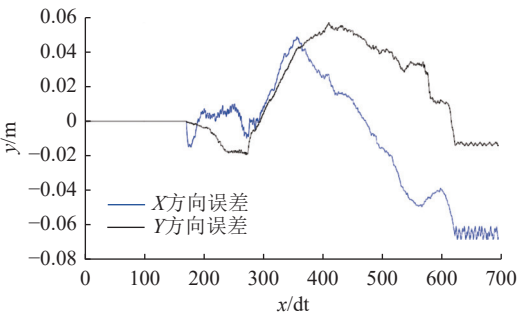


图 8 基于 EKF 融合航向角的航位推算误差  
Fig.8 Error chart of DR based on EKF fusion heading angle

从图 7 可以看出,3 种航位推算的轨迹基本与真实轨迹贴近,体现出这 3 种航位推算算法的有效性,但基于扩展卡尔曼滤波融合航向角的航位推算算法的定位轨迹与真实轨迹基本重合,故相比其他 2 种航位推算算法具有更高的定位精度。从图 8 可以看出,融合后的航位推算算法在整个小车移动过程中

的水平定位误差保持在 10 cm 范围内,故所提方法具有较高的定位精度。

4.3 捷联惯导/航位推算组合定位跑车实验

为了验证捷联惯导/航位推算组合定位方法的有效性,重新进行跑车实验,控制移动小车实验平台在实验场地内从 A 点出发大致沿着如图 9 所示的环形路径行驶,最终停在起点 A 附近的 B 点。



图 9 捷联惯导/航位推算组合定位实验场景  
Fig.9 SINS/DR combined positioning experimental scene

如图 10 和图 11 所示分别为捷联惯导/航位推算组合定位解算结果图以及定位误差图。从图 10 中可以看出,解算得到的行驶轨迹和 UWB 参考真实轨迹很贴近,即使在行驶过程中有大幅度的连续转弯,也能有很好的跟踪效果。图 11 表明,在整个定位过程中,所提组合定位方法的水平位置误差小于 15 cm。

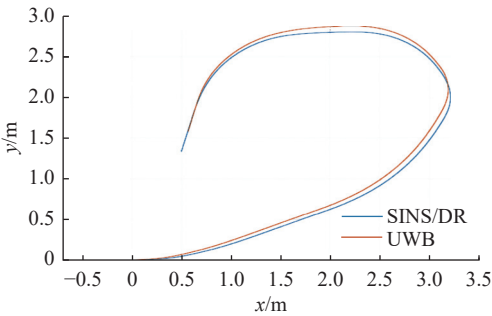


图 10 捷联惯导/航位推算组合定位结果  
Fig.10 SINS/DR integrated positioning result



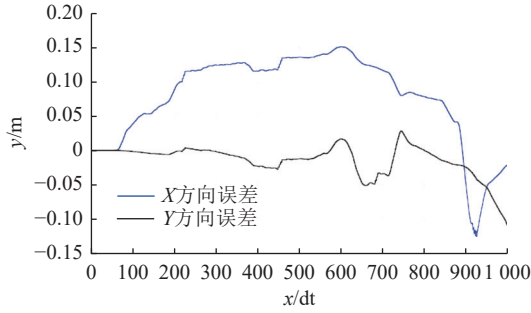


图 11 捷联惯导/航位推算组合定位误差

Fig.11 SINS/DR integrated positioning error

#### 4.4 模拟车轮打滑定位跑车实验

为了获取无轨胶轮车在打滑状态下的传感器数据,利用所搭建的移动小车实验平台进行模拟无轨胶轮车打滑实验。使用 1 根长约 1 m 的绳子固定在小车的尾部,将小车和绳子尾部一起置于定位起点,同时临时固定住绳子尾部。然后控制小车移动,在小车移动到使绳子张紧的时候,小车无法继续前进而发生打滑。在打滑持续几秒后松开绳子使小车恢复正常行驶。对轮式里程计输出的小车前向速度进行绘图,如图 12 所示。可以看出,在 7~13 s 间的速度曲线出现了较大幅度的波动,因为在这几秒中出现了车轮打滑,之后速度曲线趋近平稳并最终降到 0 而停车。

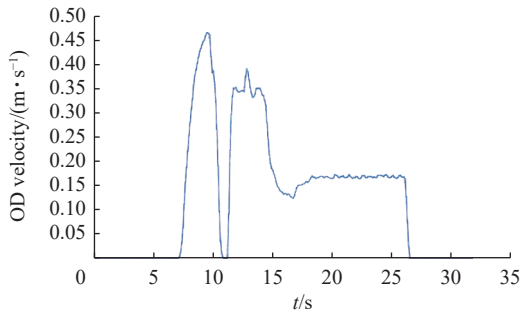


图 12 模拟打滑实验轮式里程计速度输出

Fig.12 Speed output diagram of wheel odometer for simulated slipping test

分别进行未隔离打滑和隔离打滑的定位解算,利用 UWB 定位数据作为参考真值,得到定位结果图、未隔离打滑的误差图以及隔离打滑的误差图如图 13—图 15 所示。从图 13 中可以看出,由于车轮在 7~13 s 间的几秒钟发生了打滑,导致未隔离打滑解算出来的轨迹在  $x=1$  m 左右的里程范围内发生了一些波动,并最终偏离了真实轨迹,而隔离打滑后解算出来的轨迹只在打滑时发生了很小的波动,并且整体轨迹和真实轨迹更接近。

进一步分析未隔离打滑以及隔离打滑的误差图

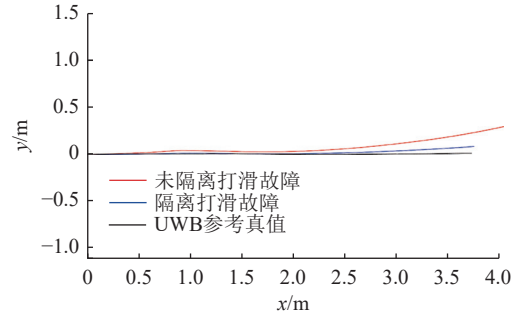


图 13 模拟打滑实验定位结果

Fig.13 Positioning results of simulated sliding test

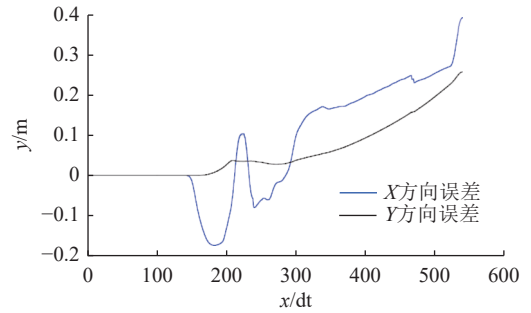


图 14 未隔离打滑定位误差

Fig.14 Unisolated slip positioning error diagram

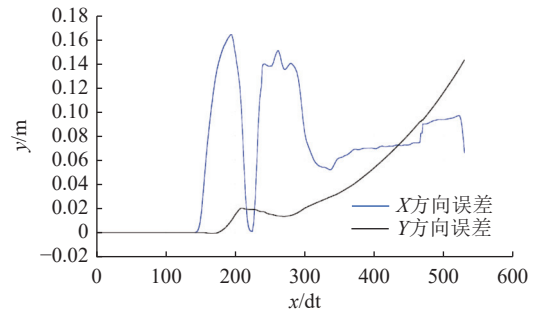


图 15 隔离打滑定位误差

Fig.15 Isolation slip positioning error diagram

可以更好地论证算法的有效性。从图 13 中可以看出,在车轮发生打滑时,水平位置误差特别是  $x$  轴方向误差发生了较大波动,并且在波动之后误差持续增大。未隔离打滑解算出来的行驶轨迹在发生打滑时开始偏离真实轨迹,而隔离打滑后解算出来的轨迹只在打滑时发生了很小的波动,并且整体轨迹和真实轨迹更接近。

从图 14 中可以看出,在车轮发生打滑时,水平位置误差特别是  $x$  轴方向误差发生了较大波动,并且在波动之后误差持续增大。如图 15 所示,在车轮发生打滑后, $x$  轴方向误差同样发生了较大波动,但在波动之后误差得到了收敛,有效降低了车轮打滑对定位精度的影响。

## 5 结 论

1)建立了基于多编码器的无轨胶轮车的轮式里程计运动学模型,并将轮式里程计与捷联惯导进行融合,提出了基于状态噪声协方差阵和估计量测噪声协方差阵的自适应扩展卡尔曼滤波算法。提升了航位推算的精度和稳定性,减少了定位累积误差。

2)建立了打滑或滑行等异常行驶状况下无轨胶轮车组合定位容错模型,实现了无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况的检测与隔离,提高了定位的稳定性。

3)搭建了移动小车实验平台和UWB定位系统进行跑车实验,并将UWB系统定位结果作为参考真值。实验结果表明:基于多编码器与惯导融合的组合定位方法可以获得较优的定位精度,并且能够有效克服无轨胶轮车打滑或滑行等异常行驶状况对定位精度造成的影响,具有一定的稳定性和可靠性,能够满足煤矿井下无轨胶轮车定位需求。

### 参考文献(References):

- [1] 陈晓晶. 井工煤矿运输系统智能化技术现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 6-14, 35.  
CHEN Xiaojing. Current status and development trend of intelligent technology of underground coal mine transportation system[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 6-14, 35.
- [2] 杨利文. 无轨胶轮车在煤矿辅助运输中的应用研究[J]. 能源与节能, 2023(10): 167-169.  
YANG Liwen. Application of trackless rubber wheeled vehicles in auxiliary transportation of coal mines[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(10): 167-169.
- [3] 赵远, 吉庆, 王腾. 煤矿智能无轨辅助运输技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 209-216.  
ZHAO Yuan, JI Qing, WANG Teng. Current status and prospects of intelligent trackless auxiliary transportation technology in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 209-216.
- [4] 杨坤. 矿井无轨胶轮车智能化管理系统研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 162-170.  
YANG Kun. Research on the intelligent management system of the trackless rubber-tyred vehicles in the coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 162-170.
- [5] 鲍久圣, 章全利, 葛世荣, 等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 1085-1098.  
BAO Jiusheng, ZHANG Quanli, GE Shirong, et al. Basic research and application practice of unmanned auxiliary transportation system in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 1085-1098.
- [6] 贾磊. 煤矿中无轨胶轮车的智能调度管理技术[J]. 现代工业经济和信化, 2022, 12(3): 142-143, 159.  
JIA Lei. Intelligent scheduling management technology for trackless rubber wheeled vehicles in coal mines[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(3): 142-143, 159.
- [7] 鲍文亮. 煤矿用无人驾驶辅助运输车辆的蒙特卡罗定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 211-217.  
BAO Wenliang. Monte Carlo Localization for autonomous auxiliary transport vehicles used in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 211-217.
- [8] 叶伟. 煤矿井下目标定位的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 82-89, 105.  
YE Wei. Status and prospects of research on positioning of targets in underground coal mines[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 82-89, 105.
- [9] SEGUEL F, PALACIOS-JÁTIMA P, AZURDIA-MEZA C A, et al. Underground mine positioning: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 4755-4771.
- [10] 胡青松, 张赫男, 王鹏, 等. 目标定位中的非视距传播研究综述[J]. 工矿自动化, 2020, 46(7): 16-27.  
HU Qingsong, ZHANG Henan, WANG Peng, et al. Non-line-of-sight propagation in object localization: A survey[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(7): 16-27.
- [11] 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.  
WANG Haoran, WANG Hongwei, LI Zhenglong, et al. Roadheader combined positioning method based on strapdown inertial navigation and differential odometer[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(9): 148-156.
- [12] 刘送永, 崔玉明. 煤矿井下定位导航技术研究进展[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 114-120.  
LIU Songyong, CUI Yuming. Research progress of positioning and navigation technology in underground coal mine[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 114-120.
- [13] 牛小骥, 王庭蔚, 葛雯雯, 等. 一种基于视觉二维码/惯性融合的室内高精度定位定姿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(11): 1067-1075.  
NIU Xiaoji, WANG Tingwei, GE Wenfei, et al. A high precision indoor positioning and attitude determination method based on visual two-dimensional code/inertial information[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(11): 1067-1075.
- [14] 马宏伟, 毛金根, 毛清华, 等. 基于惯导/全站仪组合的掘进机自主定位定向方法[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 189-195.  
MA Hongwei, MAO Jinggen, MAO Qinghua, et al. Automatic positioning and orientation method of roadheader based on combination of ins and digital total station[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 189-195.
- [15] 周李兵. 煤矿井下无轨胶轮车无人驾驶系统研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 36-48.  
ZHOU Libing. Research on unmanned driving system of underground trackless rubber-tyred vehicle in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 36-48.
- [16] 贺海涛, 廖志伟, 郭卫. 煤矿井下无轨胶轮车无人驾驶技术与探索[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 212-217.  
HE Haitao, LIAO Zhiwei, GUO Wei. Research and exploration

- on driverless technology of trackless rubber-tired vehicle in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S1): 212–217.
- [ 17 ] 郭梁, 宋建成, 宁振兵, 等. 矿用单轨吊机车定位系统开发[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(9): 177–179.
- GUO Liang, SONG Jiancheng, NING Zhenbing, et al. Development of mine monorail crane locomotive positioning system[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(9): 177–179.
- [ 18 ] LI M G, ZHU H, YOU S Z, et al. UWB-based localization system aided with inertial sensor for underground coal mine applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6652–6669.
- [ 19 ] HE K, MA X M. Research on avoidance obstacle strategy of coal underground inspection robot based on binocular vision[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 6732–6737.
- [ 20 ] 杜京义, 郭金宝, 张渤. 井下无人驾驶列车惯性导航定位系统[J]. *工矿自动化*, 2018, 44(9): 5–9.
- DU Jingyi, GUO Jinbao, ZHANG Bo. Inertial navigation and positioning system for underground driverless train[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(9): 5–9.
- [ 21 ] 杨洁, 申亮亮, 王新龙, 等. RSINS/里程计容错组合导航方案设计与性能验证[J]. *航空兵器*, 2021, 28(2): 93–99.
- YANG Jie, SHEN Liangliang, WANG Xinlong, et al. Design and performance verification of RSINS/odometer fault-tolerant integrated navigation scheme[J]. *Aero Weaponry*, 2021, 28( 2 ) : 93–99.
- [ 22 ] ULLAH I, ZAIDI B H, NISAR S, et al. An inertial and global positioning system based algorithm for ownship navigation[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2021, 37(4): 209–218.