

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107815

二维里程辅助的掘进机自主导航方法研究*

沈 阳, 王鹏江, 吉晓冬, 郑伟雄, 吴 淼

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083)

摘 要:针对掘进工作面恶劣的环境以及掘进机时常发生滑移运动造成掘进机导航参数不能精准获取的难题,提出了基于二维里程辅助的掘进机自主导航方法。研制了二维里程测量装置,搭建了二维里程辅助的掘进机自主导航系统;建立了二维里程测量装置和捷联惯导误差方程,推导了二维里程辅助的组合导航算法。为了应对量测噪声统计特性时变导致系统估计误差变大的问题,提出了基于模糊理论的数据融合算法,实时在线调整噪声协方差矩阵。仿真实验结果表明模糊融合算法相对于传统融合算法将航向角误差降低了 34.78%;3 个方向的定位误差分别降低了 44.33%、41.82% 和 42.26%。进行了掘进机导航定位实验,实现了 0.052 m 的定位精度,满足无人掘进工作面对掘进机自主导航的要求。

关键词: 二维里程;捷联惯导系统;掘进机;模糊推理系统;组合导航

中图分类号: TD421 TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on autonomous navigation method of roadheader aided by two-dimensional mileage

Shen Yang, Wang Pengjiang, Ji Xiaodong, Zheng Weixiong, Wu Miao

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the difficulties of the harsh environment of the tunneling working face and the frequently happened slippage movement of the roadheader, which results in the fact that the navigation parameters of the roadheader cannot be accurately obtained, an autonomous navigation method of roadheader aided by two-dimensional mileage is proposed. A two-dimensional mileage measuring device is developed and an autonomous navigation system of roadheader aided by two-dimensional mileage is built. The error equations of the two-dimensional mileage measuring device and strapdown inertial navigation system are established, and a two-dimensional mileage-assisted integrated navigation algorithm is derived. Then, to deal with the problem that the time-varying statistical characteristic of the measurement noise leads to the increase of the system estimation error, a data fusion algorithm based on fuzzy theory is proposed to adjust the noise covariance matrix on line and in real time. The simulation experiment results show that compared with the traditional fusion algorithm, the fuzzy fusion algorithm can reduce the heading angle error by 34.78%, and the positioning errors of three directions by 44.33%, 41.82% and 42.26%, respectively. The navigation and positioning experiment of roadheader was conducted, a positioning accuracy of 0.052 m is achieved, which meets the autonomous navigation requirements of roadheader in unmanned tunneling working face.

Keywords: two-dimensional mileage; strapdown inertial navigation system; roadheader; fuzzy inference system; integrated navigation

0 引 言

近年来,在多项关于促进煤矿智能化发展政策的指

引和要求下,我国煤炭工业自动化、智能化水平显著提高。已有几百处不同层次的智能化采煤工作面进入实践阶段,并且日渐成熟^[1-2]。与之相比,巷道掘进工作面由于作业空间狭小、工艺流程繁琐、环境复杂多变等因素发

收稿日期:2021-04-24 Received Date: 2021-04-24

* 基金项目:国家自然科学基金(51874308)、2019 山西省科技重大专项(20181102027)资助

展滞后,造成了“采掘失衡”的局面,直接影响煤矿的生产效率^[3-4]。为实现煤矿智能化的均衡发展,亟需提高综掘工作面的无人程度^[5-6]。悬臂式掘进机作为综掘工作面的核心装备,实现其智能化导控的关键基础是实时获取精准的机身位姿参数。因此,实现掘进机自主导航是综掘工作面无人化的前提。

由于综掘工作面环境恶劣、空间狭小、装备众多、工艺繁琐,掘进机自主导航技术成为了煤矿装备智能化领域的研究难点及热点。符世琛等^[7-8]利用超宽带测距技术并采用协同定位算法,实现了掘进机机身位姿参数的获取,然而煤矿巷道属于狭长密闭空间,其定位性能受到限制,横向定位误差和姿态角误差都随定位距离的增大而线性增加。Du 等^[9-10]提出了利用机器视觉技术的掘进机空间位姿的检测方法,在实验室环境中取得了良好效果,然而综掘工作面粉尘大,湿度高,振动强,光线弱,很难获得精准的定位图像。陶云飞^[11]采用全自动全站仪和自主研发的自平整平台以及多个棱镜,实现了掘进机多个位姿参数的精确获取,然而该方法存在局限性,全站仪每次只能测量一个棱镜的位置,属于实现静态测量。李睿^[12]研制了基于激光导向的掘进机位姿检测系统,实现了偏向角和偏距的检测,然而该方法受机身振动影响大,且不能生成动态轨迹。马宏伟等^[13]提出了一种基于捷联惯导和里程计组合的煤矿机器人定位方法,通过里程计的量测信息抑制捷联惯导定位误差随时间的漂移,一定程度上提高了煤矿机器人定位精度。

捷联惯导根据惯性原理可以实时测得载体的位置、速度、姿态等信息,且不需要与外界环境发生信息交互,恰恰适合煤矿巷道复杂恶劣的环境,然而其定位误差随时间增大发散严重^[14-15]。里程计通过轴编码器测得载体的里程信息,但不能提供载体的绝对位置信息。捷联惯导和里程计的组合导航可以优势互补,提高导航精度,且这种组合方案在陆地轮式车辆的自主导航中已经较为成熟^[16-19]。然而,煤矿综掘工作面工况更加复杂,悬臂式掘进机采用履带驱动且行驶速度缓慢(约为 7 m/min),在工作过程中时常发生履带的打滑以及整机的侧向滑移,造成定位误差,传统捷联惯导和里程计组合导航方式不再适用掘进机。

针对上述问题,本文在传统捷联惯导和里程计组合导航方法的基础上,提出基于二维里程辅助的掘进机自主导航方法。根据悬臂式掘进机在工作过程中时常发生滑移特点,研制了一种外置式二维里程的测量装置,推导了二维里程辅助的组合导航算法;并根据掘进工作面复杂多变的干扰环境,提出了一种基于模糊理论的数据融合算法,提高了导航精度。通过仿真和掘进机导航定位实验验证了所提方法的可行性,定位精度达到了掘进机自主导航的要求。

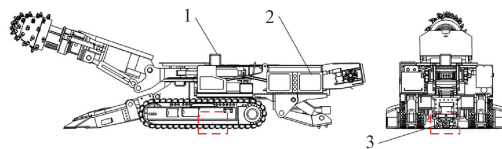
1 二维里程辅助导航系统

传统捷联惯导与里程计组合导航方法用于陆地轮式车时,传统的里程计只能测量沿车辆前进方向的速度。车辆在水平面正常行驶中没有跳跃和侧滑的运动约束下,车体横向及天向的速度分量均为 0。所以,仅靠里程计输出的沿前进方向的量测信息就得到车辆准确地行驶轨迹。悬臂式掘进机在综掘巷道内在履带式行走部的驱动下缓慢向前或后退^[20]。不同于轮式车辆在平整路面的运动或综采工作面中采煤机在导轨上的往复运动,掘进机行驶不受任何机构的约束。悬臂式掘进机在掘进作业过程中在截割反作用力的作用下机身会发生侧向滑动、姿态倾斜;或由于巷道底板路面凹凸不平且湿滑也会致使掘进机产生打滑和错位。

因此,在悬臂式掘进机的组合导航中需要前进和侧向速度作为量测信息辅助惯性测量单元;同时需要具有强自适应性能的数据融合算法,以应对恶劣环境造成的各传感器量测噪声统计特性的变化。

1.1 导航系统配置

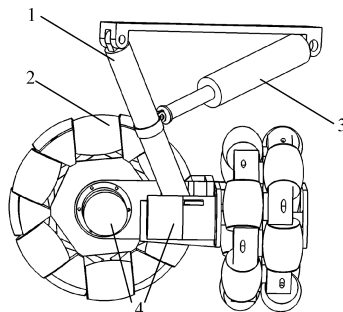
本文所提的二维里程辅助的掘进机自主导航系统布置,如图 1 所示。系统主要由捷联惯导和二维里程测量装置组成。捷联惯导安装在掘进机机身上部形心处,主要由三轴光纤陀螺仪、三轴加速度计和导航芯片组成。二维里程测量装置固定在掘进机底盘,主要由两个相互正交的光电编码器、两个全向测量轮、张紧装置以及支架构成,如图 2 所示。



1. 捷联惯导, 2. 掘进机, 3. 二维里程测量装置

图 1 导航系统布置图

Fig. 1 Layout diagram of the navigation system



1. 支架, 2. 测量轮, 3. 张紧装置, 4. 编码器

图 2 二维里程测量装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of two-dimensional mileage measuring device

二维里程测量装置两正交测量轮的角平分线与掘进机身纵轴线重合,单个编码器输出速度方向与掘进机前进方向呈 45° 角,如图3所示。两测量轮跟随掘进机的前进转动,带动编码器旋转,得到测量轮的旋转圈数,通过计算可得掘进机在单位时间内沿机身纵轴前进方向和横轴方向的里程增量。假设单个编码器在单位时间 Δt 内测得的里程增量 ΔS 为,可得速度增量:

$$v_{od} = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (1)$$

设由二维里程测量装置所得速度分别为 v_{od1} 和 v_{od2} ,根据两编码器的位置关系,将两速度矢量合并,可得二维速度矢量为:

$$V_{od} = \begin{bmatrix} v_{bx} \\ v_{by} \\ 0 \end{bmatrix} = C_{od} \begin{bmatrix} v_{od1} \\ v_{od2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: v_{bx} 为掘进机横轴方向速度; v_{by} 为掘进机前进方向速度; C_{od} 为速度转换矩阵,且

$$C_{od} = \begin{bmatrix} \sin 45^\circ & -\cos 45^\circ & 0 \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

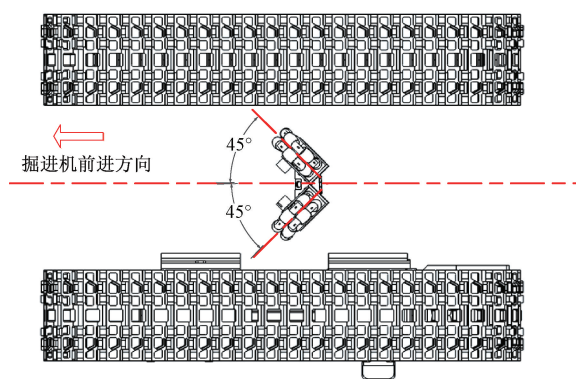


图3 二维里程测量装置安装位置图

Fig. 3 Installation location diagram of two-dimensional mileage measuring device

1.2 导航系统原理

捷联惯导通过光纤陀螺仪和加速度计可以测得掘进机在3个方向上的角速度和加速度,利用捷联惯导解算算法可以解算出掘进机的位置、速度以及姿态信息。二维里程测量装置测量掘进机一定时间内在前进方向和侧向的里程信息,并将其转化为导航坐标系下的速度矢量。将导航坐标系下捷联惯导和二维里程测量装置的速度差作为量测信息来估计卡尔曼滤波器的状态变量。同时,将观测变量残差的实际协方差矩与理论协方差相比较,将其比值输入到模糊推理系统。模糊推理系统通过一定的模糊规则推算出观测噪声协方差调整系数,以实时调

整观测噪声协方差,克服煤矿井下恶劣环境造成的观测噪声统计特性实时变化的影响,提高误差估计精度。最后,卡尔曼滤波器输出的误差估计变量对捷联惯导的导航信息以及二维里程测量装置的参数进行反馈校正。

2 导航系统误差模型建立

为了更清晰地阐述本文所提出的方法,定义东-北-天地理坐标系为导航坐标系,记为 n 系;掘进机机体坐标系记为 b 系,其中 y 轴为机体纵轴线,指向机体正前方, x 轴和 z 轴由右手定则确定;二维里程测量装置坐标系记为 m 系, y 轴为两测量轮的角平分线,指向夹角开口方向, x 轴和 z 轴由右手定则确定。

2.1 二维里程测量装置误差模型

在掘进机实际行驶过程中,由于巷道底板凹凸不平、测量轮变形或磨损、掘进机机身振动等因素,会引起里程计的刻度因子的变化,从而引起掘进机速度量测误差,称之为里程计刻度系数误差。在安装二维里程测量装置时应尽量使 m 系与 b 系重合,但于安装工艺水平的限制,一定存在安装误差角,称之为安装角误差。如图1所示,二维里程测量装置安装在捷联惯导的正下方,导致两者输出不在同一个坐标系中,产生臂杆效应,形成臂杆误差。

考虑测量装置的刻度系数误差的情况下,测量装置的输出速度为:

$$\tilde{V}_{od} = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{bx} \\ \tilde{v}_{by} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \delta k_1) v_{bx} \\ (1 + \delta k_2) v_{by} \\ 0 \end{bmatrix} = (1 + \delta k) V_{od} \quad (3)$$

式中: δk 为二维里程测量装置刻度系数误差。

同时,测量装置存在安装误差角,使 m 系与测量装置所在的 b 系之间产生姿态误差角 $\delta \alpha = [\delta \theta \ \delta \gamma \ \delta \varphi]$ 。一般经过标定后,姿态误差角为小角度 $\delta \alpha$,则 m 系和 b 系之间的转换矩阵 C_m^b 为:

$$C_m^b = I - (\delta \alpha \times) \quad (4)$$

将姿态角误差添加到测量装置速度输出,可得掘进机在 b 系下的速度输出为:

$$\tilde{V}_{od}^b = C_m^b \tilde{V}_{od} \quad (5)$$

在 b 系中二维里程测量装置测量点相对于捷联惯导的位置表达为:

$$\delta l^b = [0 \ 0 \ \delta l_z] \quad (6)$$

式中: δl_z 为二维里程测量装置与捷联惯导在竖直方向的距离。

考虑臂杆效应的速度输出为:

$$\tilde{V}_{od}^b = C_m^b (\tilde{V}_{od}^b - \omega_{nb}^b \times \delta l^b) \quad (7)$$

式中: $\omega_{nb}^b \times \delta l^b$ 为由臂杆效应造成的二维里程装置和捷联惯导的速度差异; ω_{nb}^b 为两者间相对角速度。

在 n 系下,测量装置速度表达式为:

$$\tilde{\mathbf{V}}_{OD}^n = \mathbf{C}_b^n \cdot \tilde{\mathbf{V}}_{OD}^b = (\mathbf{I} - \delta\boldsymbol{\alpha} \times) \mathbf{C}_b^n [(1 + \delta k) \mathbf{V}_{OD} - \boldsymbol{\omega}_{nb}^b \times \delta \mathbf{l}^b] \quad (8)$$

式中: $\mathbf{C}_b^n$ 为 n 系和 b 系之间的姿态转换矩阵。

展开上式并略去关于 $\boldsymbol{\alpha}$ 和 δk 的高阶小量,得:

$$\tilde{\mathbf{V}}_{OD}^n \approx \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}_{OD} - (\delta\boldsymbol{\alpha} \times) \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}_{OD} + \delta k \mathbf{C}_b^n \mathbf{V}_{OD} + \mathbf{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{nb}^b \times) \delta \mathbf{l}^b \quad (9)$$

可得,测量装置速度误差方程:

$$\delta \mathbf{V}_{OD}^n = \tilde{\mathbf{V}}_{OD}^n - \mathbf{V}_{OD}^n = -(\delta\boldsymbol{\alpha} \times) \mathbf{V}_{OD}^n + \delta k \mathbf{V}_{OD}^n + \mathbf{C}_b^n (\boldsymbol{\omega}_{nb}^b \times) \delta \mathbf{l}^b \quad (10)$$

2.2 捷联惯导误差方程

由于捷联惯导存在惯性传感器漂移误差,刻度系数误差,安装标定误差,以及各种外界干扰。这些因素都会不可避免的降低捷联惯导的导航精度。

捷联惯导的误差传播方程已经被研究的很成熟^[21-22],可表示为:

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}} = \boldsymbol{\varphi} \times (\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) + \delta\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \delta\boldsymbol{\omega}_{en}^n - \mathbf{C}_b^n \boldsymbol{\varepsilon}^b \quad (11)$$

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = \boldsymbol{\varphi} \times \mathbf{f}_{sf}^n + \delta \mathbf{v}^n \times (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) + \mathbf{v}^n \times (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) + \mathbf{C}_b^n \nabla^b \quad (12)$$

$$\delta \dot{\mathbf{L}} = -\frac{v_N}{(R_M + h)^2} \delta \mathbf{h} + \frac{1}{R_M + h} \delta \mathbf{v}_N \quad (13)$$

$$\delta \dot{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{v_E \tan L \cdot \sec L}{R_N + h} \delta \mathbf{L} - \frac{v_E \sec L}{(R_N + h)^2} \delta \mathbf{h} + \frac{\sec L}{R_N + h} \delta \mathbf{v}_E \quad (14)$$

$$\delta \dot{\mathbf{h}} = \delta \mathbf{v}_U \quad (15)$$

式中: $\mathbf{C}_b^n$ 是 b 系到 n 系的姿态转换矩阵。 $\boldsymbol{\varphi}$ 是姿态误差角矢量; $\delta \mathbf{v}^n$ 是速度误差矢量; $\delta \mathbf{L}$ 、 $\delta \boldsymbol{\lambda}$ 和 $\delta \mathbf{h}$ 分别为纬度误差、经度误差以及高度误差矢量。 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$ 分别是在 n 坐标系中的地球自转角速度和掘进机旋转角速度矢量。 $\mathbf{f}_{sf}^n$ 是在 n 系中的比力向量。 R_N 和 R_M 分别为地球子午圈曲率半径及卯酉圈曲率半径。

陀螺仪在 b 系中的漂移 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$ 和加速度计在 b 系中的漂移 ∇^b 在短时间内可视为常数,则:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = 0 \\ \dot{\nabla} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

3 二维里程辅助的组合导航算法

3.1 系统状态方程和观测方程

在二维里程测量装置误差方程(10)和捷联惯导误差方程(11)~(16)的基础上,将捷联惯导姿态角误差 $\boldsymbol{\varphi}$,速度误差 $\delta \mathbf{v}^n$,位置误差 $\delta \mathbf{L}$ 、 $\delta \boldsymbol{\lambda}$,高度误差 $\delta \mathbf{h}$,陀螺仪漂移误差 $\boldsymbol{\varepsilon}^b$,加速度计漂移误差 ∇^b 以及二维里程测量

装置速度误差 $\delta \mathbf{V}_{OD}^n$,刻度系数误差 δk ,安装角误差 $\delta \boldsymbol{\alpha}$,臂杆效应误差 $\delta \mathbf{l}$,设为状态变量,如下:

$$\mathbf{X}(t) =$$

$$[\boldsymbol{\varphi} \quad \delta \mathbf{v}^n \quad \delta \mathbf{L} \quad \delta \boldsymbol{\lambda} \quad \delta \mathbf{h} \quad \boldsymbol{\varepsilon}^b \quad \nabla^b \quad \delta \mathbf{V}_{OD}^n \quad \delta k \quad \delta \boldsymbol{\alpha}]$$

组合导航算法的状态方程可表示为:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}\mathbf{W}(t) \quad (17)$$

式中: $\mathbf{F}$ 是系统转移矩阵; $\mathbf{G}$ 是系统噪声转移矩阵; $\mathbf{W}(t)$ 是系统噪声向量,可视为高斯白噪声。

将捷联惯导速度和测量装置速度之差值作为观测量,即:

$$\mathbf{Z}(t) = \tilde{\mathbf{V}}_{SINS}^n - \tilde{\mathbf{V}}_{OD}^n \quad (18)$$

可得到系统量测方程:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (19)$$

式中: $\mathbf{V}(t)$ 为量测噪声矢量,其为高斯白噪声; $\mathbf{H}$ 为量测矩阵。

3.2 基于模糊推理系统的数据融合算法

传统卡尔曼滤波算法可以分为时间更新和量测更新两个部分^[23],可用以下方程描述:

1) 时间更新方程:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k+1} \hat{\mathbf{X}}_k \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{k+1/k} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k+1} \mathbf{P}_k \boldsymbol{\Phi}_{k,k+1}^T - \boldsymbol{\Gamma}_k \mathbf{Q}_k \boldsymbol{\Gamma}_k^T \quad (21)$$

2) 量测更新方程:

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

$$\hat{\mathbf{X}}_{k+1} = \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k} + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{Z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}) \quad (23)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k+1/k} [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k]^T + \mathbf{K}_k \mathbf{R}_k \mathbf{K}_k^T \quad (24)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{k+1/k}$ 是对系统状态向量的一步预测; $\mathbf{P}_{k+1/k}$ 是状态估计误差的协方差矩阵; $\mathbf{K}_{k+1}$ 为卡尔曼滤波的增益; $\boldsymbol{\Phi}_{k,k+1}$ 为离散化的系统转移矩阵。

上述算法在系统噪声和量测噪声均为零均值高斯白噪声,且噪声方差已知的情况下,能够实现对系统状态在统计意义下的最优估计。然而由于掘进工作面环境恶劣且多变,使组合导航系统的实际量测噪声具有时变特性,固定的量测噪声参数不能匹配系统实际的滤波要求,造成系统滤波精度下降,甚至发散。通过对量测噪声矩阵进行实时监测和调整,可以大幅提高传统卡尔曼滤波器掘进机导航应用中的滤波性能^[24-25]。为此,本文引入模糊推理系统以实时在线调控量测噪声协方差,使系统量测噪声逐渐逼近真实噪声水平,改进组合导航算法的性能,提高导航的精度。

在传统卡尔曼滤波算法的基础上增加一组量测噪声调整方程:

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1} = S_{k+1} \hat{\mathbf{R}}_k \quad (25)$$

$$S_{k+1}^d = FIS(q(k)) \quad (26)$$

式中: $\hat{\mathbf{R}}_k$ 表示每步观测噪声的估计值; $S(k)$ 为对观测噪

声矩阵 $\hat{R}_k$ 的调节系数。 $S(k)$ 的取值由模糊推理系统得到, $q(k)$ 表示模糊推理系统的输入, 由第 k 步的残差实测协方差和理论协方差的比值确定。

残差理论方差 P_r 定义为:

$$P_r = H_k(\Phi_{k+1/k}P_k\Phi_{k+1/k}^T + Q)H_k^T + \hat{R}_k \quad (27)$$

残差序列表示系统依赖量观测数据的程度, 定义如下:

$$r_{k+1} = Z_{k+1} - H_{k+1}\hat{X}_{k+1/k} \quad (28)$$

其中, Z_{k+1} 为系统实际量测数据; $H_{k+1}\hat{X}_{k+1/k}$ 为量测数据的预测。

残差实测方差 C_r 可以根据残差在平稳滤波状态下的遍历性质, 用最近的 N 个残差样本方差的平均值来近似, 即:

$$C_r = \frac{1}{N} \sum_{i=i_0}^k r_{k+1} \cdot r_{k+1}^T \quad (29)$$

其中, N 表示估计窗口的大小。为了捕捉残差序列的动态变化, N 的取值应该足够大, 从而防止近似偏差的发生和起平滑作。 N 一般取值为 15。 $i_0 = k - N + 1$ 表示估计窗口中的第一个样本。

定义残差实测方差和理论方差的比值 $q(k)$ 为:

$$q(k) = \frac{Tr(C_r(k))}{Tr(P_r(k))} \quad (30)$$

式中: $Tr(\cdot)$ 表示求迹运算。

由式 (28) ~ (30) 可得, $q(k)$ 的值可以通过改变理论量测噪声 $\hat{R}_k$ 来调整。当 $q(k)$ 接近于 1 时, 说明 $C_r(k)$ 和 $P_r(k)$ 的匹配度较高, 滤波系统模型较为准确。当实测量测噪声增大时, C_r 增大, 进而 $q(k)$ 增大。为了使 $q(k)$ 的值维持在 1 附近, 应当增大 $\hat{R}_k$ 。同理, 当实际量测噪声减小时, 应当减小 $\hat{R}_k$ 。

由式 (25) 可知, 通过改变 S_{k+1} 可以实现对 $\hat{R}_k$ 的调整。若 S_{k+1} 的值小于 1 则表示减小 $\hat{R}_k$; 若 S_{k+1}^d 的值大于 1, 则表示增大 $\hat{R}_k$; 若 S_{k+1}^d 的值等于 1, 则表示 $\hat{R}_k$ 不变。定义模糊子集 *equal* 表示在 1 附近, *more* 表示基本大于 1, *less* 表示基本小于 1。进一步, 设定模糊推理系统规则如下:

IF $q(k) \in equal$, then $S(k) \in equal$

IF $q(k) \in more$, then $S(k) \in more$

IF $q(k) \in less$, then $S(k) \in less$

4 仿真实验

为了验证本文提出的二维里程辅助的掘进机自主导航方法的有效性, 完成了两组仿真实验。第 1 组为: 在模糊推理融合算法下分别应用一维里程辅助和二维里程辅助方式进行仿真。第 2 组为: 在二维里程辅助下分别采

用模糊推理融合算法和传统融合算法进行仿真。

4.1 第一组仿真

为了验证本文所提方法对在掘进机发生整机滑移时实时位置跟踪的有效性, 分别应用一维里程辅助和二维里程辅助的导航方式进行对比分析。根据掘进机在掘进作业过程中的典型运动特点, 设定掘进机的运动过程如下:

- 1) 静止 180 s (捷联惯导完成初始对准);
- 2) 以 0.01 m/s^2 的加速度向正东方向加速行驶 10 s;
- 3) 以 0.01 m/s 的速度继续向东匀速行驶 100 s;
- 4) 机身发生横向滑动;
- 5) 以 0.1 m/s 的速度继续向东匀速行驶 100 s;
- 6) 机身发生沿东偏南 55° 方向的滑动;
- 7) 以 0.1 m/s 的速度继续向东匀速行驶 100 s;
- 8) 停止。

仿真实验中所用器件的性能参数设定如下: 捷联惯导陀螺仪零偏稳定性为 $0.02 (^\circ)/\text{h}$, 随机漂移为 $0.005 (^\circ)/\sqrt{\text{h}}$; 捷联惯导加速度计零偏稳定性 $50 \mu\text{g}$, 随机漂移为 $10 \mu\text{g}$; 一维和二维里程测量装置刻度因子为 0.01。地理位置为北纬 45° , 东经 120° 。

将卡尔曼滤波器的初始条件设为:

$P_0 = \text{diag}[1 \times 10^{-4}]$, $Q = \text{diag}[1/12]$, 假设 R 为未知初值选为单位阵 I 。

从图 4 中可以看出, 在掘进机在发生横向滑移前采用一维里程辅助方式和二维里程辅助方式得到的掘进机运动轨迹都能很好的追踪掘进机的设定轨迹, 误差均小于 0.03 m 。在掘进机发生了 1.38 m 的横向滑移后, 二维里程辅助方式能准确地追踪到横向滑移里程, 误差为 0.05 m ; 而一维里程辅助方式得到的滑移轨迹在横向和纵向都出现了较大偏差, 误差分别为 0.35 m 和 0.98 m 。这是由于发生横向滑移时, 一维里程计没有量测信息输出, 只能依靠纯惯性检测, 造成了定位误差。在第二次滑移发生后, 二维里程辅助方式仍能准确地跟踪掘进机的位置, 而一维里程辅助方式已经远偏离了掘进机的设定轨迹。由此可得, 二维里程辅助下的导航方法检测到的轨迹能够较好地跟踪掘进机的设定轨迹, 而一维里程辅助下的导航方法偏差较大。

4.2 第二组仿真

为了验证所提的模糊自适应卡尔曼滤波融合算法的在应对煤矿井下复杂环境时的优越性, 将其与传统卡尔曼滤波算法对比。根据煤矿巷道的走向特点以及掘进机运动的特点, 设置其运动过程如图 4 所示。

- 1) 静止 180 s (捷联惯导完成初始对准);
- 2) 以 0.015 m/s^2 的加速度向正东方向加速行驶 10 s;

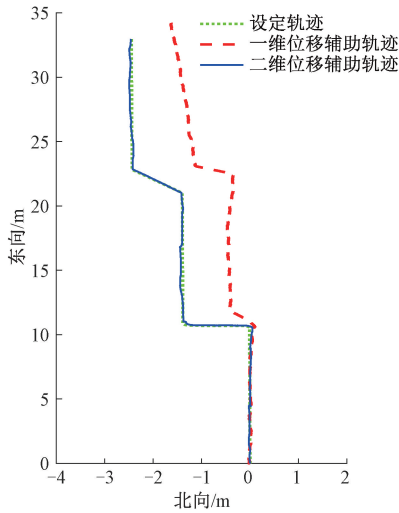


图 4 不同辅助方式下掘进机运动轨迹图

Fig. 4 Roadheader movement trajectory diagram under different assisted means

- 3) 以 0.15 m/s 的速度继续向东匀速行驶 120 s;
- 4) 以 0.15 m/s 的速度沿 45° 的坡向上匀速行驶 120 s;
- 5) 转向水平巷道, 以 0.1 m/s 的速度继续向东匀速行驶 100 s;
- 6) 机身转动 90°, 向正南方向行驶;
- 7) 以 0.15 m/s 的速度继续向南匀速行驶 100 s;
- 8) 停止。

其他设置与第一组仿真一致。

图 5 为掘进机移动轨迹。

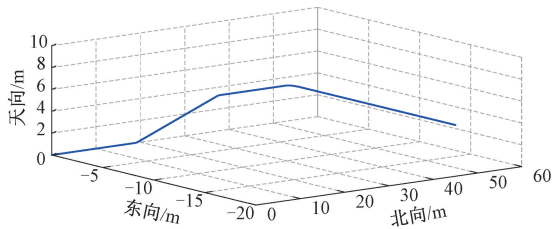


图 5 掘进机设定运动轨迹图

Fig. 5 Roadheader predetermined movement trajectory diagram

仿真结果如图 6 和 7 所示。图 6 为姿态角误差曲线, 依次为俯仰角误差、横滚角和航向角误差。从图 7 可以得到两种融合算法下俯仰角和横滚角的误差都近似, 采用模糊融合算法的误差略低于采用传统融合算法的误差, 而采用模糊融合算法的航向角误差要明显优于传统融合算法。经过多次仿真, 模糊融合算法和传统融合算法所得航向角误差分别为: 0.015° 和 0.023°, 可见模糊融合算法将航向角误差减小了 34.78%。图 7 为位置误差曲线, 依次为东向位置误差、北向位置误差和天向位置误差。

差。经多次仿真, 可以得采用模糊融合算法在 3 个方向上的位置误差均小于采用传统融合算法的误差, 且将 3 个方向的误差依次减小了 44.33%、41.82% 和 42.26%。

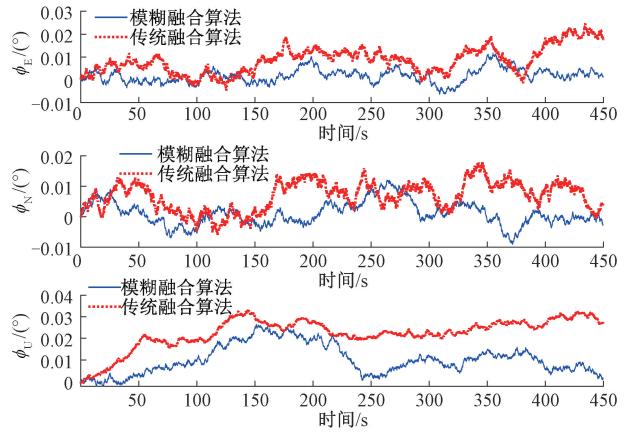


图 6 姿态角误差

Fig. 6 Attitude angle errors

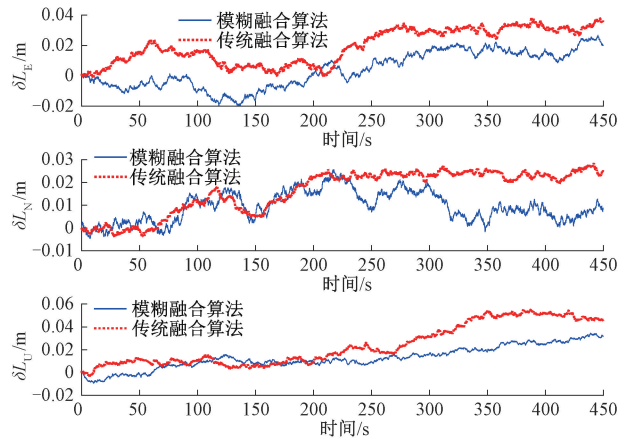


图 7 位置误差

Fig. 7 Position errors

5 实验验证

为了验证本文所提的二维里程辅助的自主导航方法的定位性能, 搭建了掘进机机载导航定位实验系统, 模拟掘进机在井下的实际工况, 进行了掘进机机载定位试验。实验系统如图 8 所示。

5.1 实验配置

定位实验系统设备主要有 EBZ135 型悬臂式掘进机; FOGN 型捷联惯导, 其中陀螺仪零偏稳定性为 0.01(°)/h, 随机噪声为 0.005(°)/√h, 加速度零偏稳定性为 30 μg, 随机噪声为 10 μg; 二维里程测量装置, 其测量轮直径为 0.24 m, 编码器分辨率为 4 000; 导航主机, 内



图8 掘进机定位实验系统图

Fig. 8 The diagram of the roadheader positioning experiment system

置通信模块,为 Rs485 串口通信;远端监测设备。实验地点地理位置为北纬 $37^{\circ}55'$,东经 $114^{\circ}31'$,当地重力加速度为 $g=9.828 \text{ m/s}^2$, $\omega=7.292 \text{ 105 rad/s}$;数据传输频率 100 Hz 。

5.2 实验方案

捷联惯导及二维里程测量装置按照本文第一节所述要求安装,其采集到的原始导航数据通过串口传输至导航主机。导航主机将采集的原始导航数据,通过四元数位姿解算方法以及本文所提出的融合算法解算出掘进机的位置坐标并通过通信模块发送至远端监控设备。

以掘进机起始点为坐标原点,初始朝向为巷道中线设计方向,建立巷道坐标系。其中,以巷道中线为 y 轴,掘进前进方向为正方向,其它轴符合右手定则。将导航参数从“东-北-天”坐标系切换到巷道坐标系。

1) 地面实验

悬臂式掘进机每完成一次断面的截割作业,需要重新调整机身的姿态和位置,为下一次截割作业做准备。由于巷道空间狭小,掘进机位置和姿态的调整过程中需要多种行驶方式。本次实验以掘进机实际工作中所需的行驶方式操控,包括直线行驶、行进转向、原地转向、停留等运动动作;并且在行驶过程中采用单履带驱动转向的方式模拟掘进机在巷道中的滑移运动。通过远程遥控操掘进机,以 0.12 m/s 左右的速度行驶,实验时间为 300 s 。

在二维里程测量装置的中心处固定一根尖头金属弹杆,使其与地面接触,跟随二维里程测量装置移动,并在地面实时划出掘进机的移动轨迹。在掘进机行驶过程中,人为不定时控制金属弹杆左右小幅摆动形成标记点,记录标记时刻并对其编号。这样可得到一系列掘进机实测移动轨迹标记点。图9为标记点坐标测量完成后,人为加粗后的掘进机行进轨迹图。

2) 井下实验

为了进一步证实本文所提方法的在实际掘进机工作现场的性能,在实际掘进工作面进行了掘进机调动路

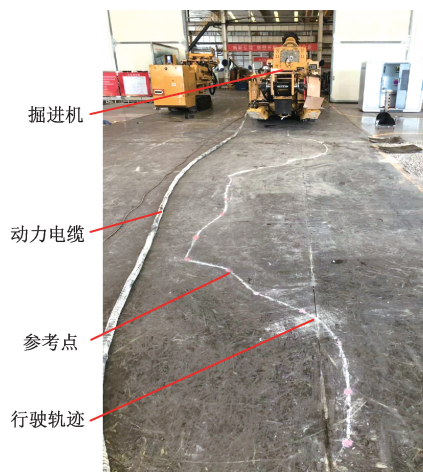


图9 掘进机实际行驶轨迹图

Fig. 9 The diagram of roadheader actual running trajectory

径定位实验。实验环境如图10所示,为保证实验人员安全,以及更好的获取掘进机真实轨迹参考点,实验过程中没用进行截割作业,只在已掘巷道前端进行掘进机调动操作。按照煤矿井下掘进工艺流程操控掘进机运动,首先掘进机向前行驶至巷道断面前,以进行一个断面的截割作业;随后掘进机后退一定距离为巷道临时支护腾出空间;支护完成后再次向前行驶以进行断面截割作业,以此循环两次。

采用与实验一类似方法标记定位参考点。

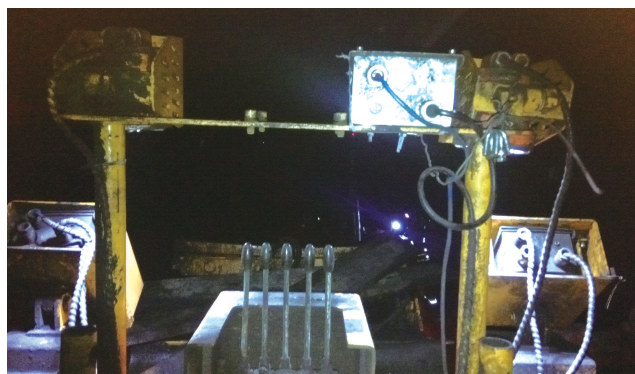


图10 掘进工作面环境图

Fig. 10 The diagram of tunneling working face environment

5.3 实验结果与分析

将掘进机实测移动轨迹标记点作为定位参考点,与本文所提方法解算所得轨迹对应点坐标进行比较分析。对于地面实验,图11和12分别为巷道坐标系下掘进机在 x 轴定位误差和 y 轴定位误差。从图11和12可以看出,采用本文所提出的二维里程辅助导航方式所测得的掘进机行驶轨迹在 x 轴方向和 y 轴方向的定位误差均没有随时间发散,对实际轨迹具有良好的追踪性能。 x 轴

方向的定位误差最大值为 0.076 m,均值为 0.037 m,方差为 0.023 m; y 轴方向的定位误差最大值为 0.063 m,均值为 0.026 m,方差为 0.019 m。对于井下实验,实验结果如图 13 所示,其中蓝色曲线为本文所提系统所测得的掘进机行轨迹,红色星点为掘进机实际行进轨迹参考点。位置误差均值为 0.052 m 方差为 0.029 m。可以得出,本文所提方法的定位精度满足无人综采工作面对掘进机定位的要求。

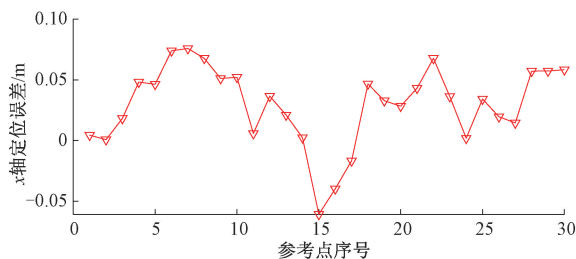
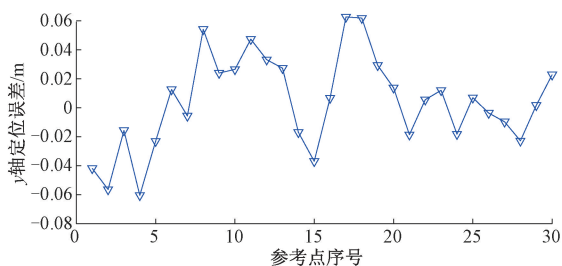
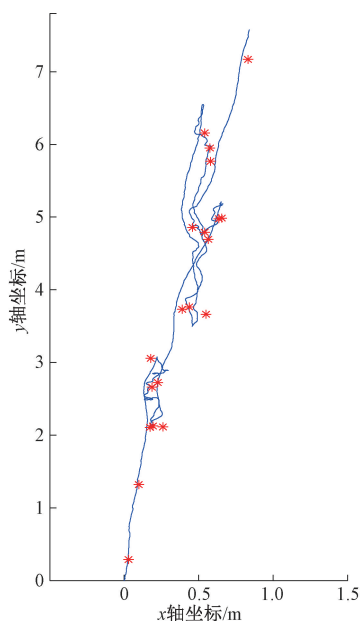
图 11 x 轴向定位误差Fig. 11 Positioning error on x axis图 12 y 轴向定位误差Fig. 12 Positioning error on y axis

图 13 掘进机井下行驶轨迹图

Fig. 13 The diagram of roadheader underground running trajectory

6 结 论

根据掘进机工作过程中的典型运动,在传统捷联惯导与里程计组合导航的基础上,提出了一种二维里程辅助的掘进机自主导航方法,提高了对掘进机行进轨迹的追踪进度精度。

提出了基于模糊推理系统的数据融合算法,将模糊推理系统引入卡尔曼滤波器,实时在线调整量测噪声协方差矩阵,增强了导航系统的环境适应能力,提高了系统误差估计精度。

仿真表明,该方法可以准确追踪掘进机发生侧向滑移时的轨迹;相对于传统数据融合算法,模糊融合算法将航向角误差降低了 34.78%,3 个方向的定位误差分别降低了 44.33%、41.82% 和 42.26%。地面及井下导航定位实验表明,该方法满足掘进机自主导航所需的定位精度。验证了所提方法的可行性和优越性,为实现无人综掘工作面奠定了基础。

参考文献

- [1] 王国法,杜毅博,任怀伟,等. 智能化煤矿顶层设计 研究与实践[J]. 煤炭学报,2020,45(6):1909-1924.
WANG G F, DU Y B, REN H W, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1909-1924.
- [2] 葛世荣. 煤矿机器人现状及发展方向[J]. 中国煤炭, 2019, 45(7): 18-27.
GE SH R. Present situation and development direction of coal mine robots[J]. China Coal, 2019, 45(7): 18-27.
- [3] 杨健健,张强,王超,等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2995-3005.
YANG J J, ZHANG Q, WANG CH, et al. Current status and development of research on robotization of coal mine boring machine [J]. Journal of Coal, 2020, 45(8): 2995-3005.
- [4] 闫魏锋,石 亮. 我国煤巷掘进技术与装备发展现状[J]. 煤矿机械,2018,39(12):1-3.
YAN W F, SHI L. Development status of coal roadway tunneling equipment and technology in China[J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(12): 1-3.
- [5] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40 a[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1815-1820.
WANG H. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China [J]. Journal of Coal, 2010, 35(11): 1815-1820.
- [6] 王国法,刘峰,庞义辉,等. 煤矿智能化——煤炭工

- 业高质量发展的核心技术支持[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349-357.
- WANG G F, LIU F, PANG Y H, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [7] 符世琛, 李一鸣, 宗凯, 等. 面向掘进机的超宽带位姿检测系统精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1978-1987.
- FU S CH, LI Y M, ZONG K. Accuracy analysis of UWB pose detection system for roadheader [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (8): 1978-1987.
- [8] FU S CH, LI Y M, ZHANG M J, et al. Ultra-wideband pose detection system for boom-type roadheader based on Caffery transform and Taylor series expansion[J]. Meas. Sci. Technol. 2018, 29(1): 1-12.
- [9] DU Y X, TONG M M, LIU T, et al. Visual measurement system for roadheaders pose detection in mines [J]. Optical Engineering, 2016, 55 (10): 104107.
- [10] DU Y X, TONG M M, LIU T, et al. Edge detection based on Retinex theory and wavelet multiscale product for mine images [J]. Applied Optics, 2016, 55(34): 9625.
- [11] 陶云飞. 掘进机位姿激光自动测量方法及系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- TAO Y F. Research on automatic measurement method and system of position and attitude of roadheader based on laser measurement system[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2017.
- [12] 李睿. 悬臂掘进机机身位姿参数检测系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.
- LI R. Research on an automatic detection system for the positoon and orientation parameters detection method of boom-type roadheader body [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), China, 2012.
- [13] 马宏伟, 张璞, 毛清华, 等. 基于捷联惯导和里程计的井下机器人定位方法研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(4): 35-42.
- MA H W, ZHANG P, MAO Q H, et al. Research on positioning method of underground robot based on strapdown inertial navigation and odometer[J]. Industrial and mining automation, 2019, 45(4): 35-42.
- [14] 冯大龙. 捷联式惯导系统在无人掘进机中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- FENG D L. Application of strapdown inertial navigation system in unmanned roadheader [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [15] DAVID H, TITTERTON, JOHN L W. Strapdown inertial navigation technology [M]. Herts: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [16] 严恭敏, 秦永元, 马建萍. 惯导/里程仪组合导航系统算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(8): 1087-1089.
- YAN G M, QIN Y Y, MA J P. Research on INS/OD integrated navigation system algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(8): 1087-1089.
- [17] 贾晓辉, 徐文枫, 刘今越, 等. 基于惯性测量单元辅助的激光里程计求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 39-48.
- JIA X H, XU W F, LIU J Y. Solving method of lidar odometry based on IMU[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 39-48.
- [18] HUANG Y L, ZHANG Y G, WANG X D. Kalman-filtering-based in-motion coarse alignment for odometer-aided SINS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 1-14.
- [19] GAO J X, LI K, CHEN J Y. Research on the integrated navigation technology of sins with couple odometers for land vehicles[J]. Sensors 2020, 20(2): 546.
- [20] ZONG K, ZHANG P, WANG P J, et al. Multifactor analysis of roadheader's body pose responses during the horizontal cutting process [J]. Shock and Vibration, 2018, 3(1): 1-18.
- [21] 秦永元. 惯性导航(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 243.
- QIN Y Y. Inertial navigation [M]. Beijing: Science Press, 2014: 243.
- [22] 乔文超, 王红雨, 王鸿东. 基于 BP 神经网络的无人机 IMU 多传感器冗余的补偿算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 19-28.
- QIAO W CH, WANG H Y, WANG H D. Compensation algorithm for UAV IMU multi-sensor redundancy based on BP neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 19-28.
- [23] CHANG L B, LI J H, CHEN S Y. Initial alignment by attitude estimation for strapdown inertial navigation systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and

Measurement, 2014, 64(3), 784-794.

- [24] LAI T X. Adaptive Kalman filter for SINS/GPS integrated navigation system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 336(1):332-335.

- [25] 万振源, 杨功流, 涂勇强. 一种新型模糊自适应 Kalman 滤波器在组合导航中的应用[J]. 导航与控制, 2017, 6(2):81-87.

WANG ZH Y, YANG G L, TU Y Q. Application of a new fuzzy adaptive kalman filter to integrated navigation[J]. Navigation and Control, 2017, 6(2): 81-87.

作者简介



沈阳, 2017 年于山东科技大学获得学士学位, 现为中国矿业大学(北京)博士研究生, 主要研究方向为煤矿井下移动装备定位导航。

E-mail: shenyang5008@163.com

Shen Yang received his B.Sc. degree from Shandong University of Science and Technology in 2017. Now, he is a Ph. D. candidate in China University of Mining and Technology (Beijing). His main research interest is positioning and navigation of mobile equipment in underground coal mine.



王鹏江(通信作者), 2016 年于长春工业大学获得学士学位, 现为中国矿业大学(北京)博士研究生, 主要研究方向为矿山装备控制及机器人化。

E-mail: bqt180040100@ student. cumtb. edu. cn

Wang Pengjiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Changchun University of Technology in 2016. Now, he is a Ph. D. candidate in China University of Mining and Technology (Beijing). His main research interest is mining equipment control and robotization.



吴淼, 1992 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学(北京)教授、博士生导师, 主要研究方向为矿山设备机电一体化与智能化仪器。

E-mail: wum@ cumtb. edu. cn

Wu Miao received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 1992. Now, he is a professor and supervisor for doctoral student in China University of Mining and Technology (Beijing). His main research interests include mining equipment electromechanical integration and intelligent instruments.