

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513951

采煤机双 IMU 位姿解算方法*

代卫卫¹, 王世博¹, 王世佳²

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116; 2. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘 要: 惯性测量单元(IMU)可实现自主全参数导航的优点,具有在井下 GPS 拒止环境应用的技术优势。基于冗余 IMU 的采煤机定位是综采装备可行的低成本定位方法,但也面临 IMU 随时间漂移大的问题。当 2 个 IMU 安装在采煤机载体后,其各自输出位置和姿态的差值均应该是常数,即应满足双 IMU 位姿约束条件。基于位姿约束条件,以信息滤波为基本框架,提出了采煤机双 IMU 位姿解算方法。以 IMU-1 和 IMU-2 的姿态四元数作为状态量,基于四元数更新方程建立信息滤波状态方程。以加速度计原始输出、磁力计原始输出、位置差值和姿态差值作为量测量,推导各量测量与姿态四元数转换的雅克比矩阵,分别构建量测方程。采用移动机器人模拟采煤机截割 4 刀实验,每刀 52 m。对于 IMU-1,算法处理后第 3、4 刀的球概率误差由 3.618 0、8.220 2 m 分别减小到 1.545 2、2.882 8 m,定位精度提升约 64.9%。对于 IMU-2,算法处理后第 3、4 刀的球概率误差由 4.342 0、5.736 8 m 分别减小到 1.617 8、2.352 3 m,定位精度提升约 59.0%。对于移动机器人,对 IMU-1 和 IMU-2 算法处理后的姿态求取平均值,采用航位推算法解算位置坐标,得到第 3、4 刀的球概率误差分别为 0.790 7 和 1.431 7 m。该方法为冗余 IMU 定位提供了底层解算算法,提高了定位精度。

关键词: 采煤机;双 IMU;位姿约束

中图分类号: TH701 TD421 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 440.60

Shearer double-IMU position and attitude calculation method

Dai Weiwei¹, Wang Shibo¹, Wang Shijia²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The inertial measurement unit (IMU) can achieve the advantages of autonomous full-parameter navigation and has the technical advantage of being applied in underground GPS-denied environments. The shearer positioning based on redundant IMUs is a feasible and low-cost positioning method for longwall mining equipment. However, it also faces the problem of a large drift of IMUs over time. When two IMUs are installed on the carrier of a coal mining machine, the differences in their respective output positions and attitudes should all be constants. They should meet the dual-IMU pose constraint conditions. Based on the constraints of position and attitude, a method for calculating the shearer double-IMU position and attitude is proposed based on the information filter. Taking the attitude quaternions of IMU-1 and IMU-2 as state quantities, the information filtering state equation is established based on the quaternion update equation. Using the raw output of the accelerometer, the raw output of the magnetometer, the position difference, and the attitude difference as the measurement values, the Jacobian matrices for converting the measurement values into attitude quaternions are derived, and the measurement equations are constructed. In the experiment of four cutting cycles, for IMU-1, the spherical probability errors (SPEs) of the third and fourth cutting cycles after processing by the algorithm are reduced from 3.618 0 m and 8.220 2 m to 1.545 2 m and 2.882 8 m. The positioning accuracy is improved by 64.9%. For IMU-2, the SPEs of the third and fourth cutting cycles after processing are reduced from 4.342 0 m and 5.736 8 m to 1.617 8 m and 2.352 3 m. The positioning accuracy is improved by 59.0%. The average values of the attitude angles processed by the IMU-1 and IMU-2 algorithms are obtained. The position

收稿日期:2025-04-21 Received Date: 2025-04-21

* 基金项目:国家自然科学基金项目(52304180)、河北省中央引导地方科技发展资金项目(246Z1911G)资助

coordinates of the mobile robot are calculated using the position estimation algorithm, and the SPEs of the third and fourth cuts are 0.790 7 m and 1.431 7 m, respectively. This method provides a low-level solution algorithm for redundant IMU positioning and improves positioning accuracy.

Keywords: shearer; double-IMU; position and attitude constraint

0 引言

惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)可实现自主全参数导航的优点,具有在井下全球定位系统(global positioning system, GPS)拒止环境应用的技术优势,采煤机惯性测量单元定位逐渐被国内外学者、煤矿装备制造制造商等普遍认可^[1-2]。目前,国内外所研制的采煤机定位系统主要以惯性导航系统(inertial navigation system, INS)为核心。澳大利亚联邦科学与工业研究组织2001年启动了一项为期3年的“Landmark”计划^[3-4],开发了采煤机位置测量系统(shearer position measurement system, SPMS)。李昂等^[5-6]以微处理器芯片为核心处理单元研发了第1代采煤机定位定姿装置(longwall mining workface navigation system, LMWNS),其中惯性导航安装于采煤机机身,轴编码器安装于采煤机行走部。王世佳^[7]以嵌入式工控机为核心处理单元研发了第2代LMWNS,嵌入了包括安装偏差校准、卡尔曼滤波等多种误差消减算法。郑州煤矿机械集团股份有限公司研发了基于国产光纤惯导的采煤机定位系统^[8]。该系统硬件由光纤惯导、计算板、电源系统、电池等组成。中国煤炭科工集团太原研究院自主研发了矿用惯导系统,融合光学测量、机器视觉等多感知技术,提出适应性修正算法及补偿方案(<https://www.ccteg.cn/zh/article/infoDetails/973>)。

不同于IMU只包括陀螺仪、加速度计、磁力计等传感单元,INS还具有导航解算单元,内嵌了通用的位姿解算算法。也就是说,IMU只能输出旋转角速度、移动加速度等原始传感器数据,而INS还能输出角度、速度、位置等导航信息。但INS价格高昂,不利于工业化推广应用。IMU价格只有INS的约1/40,但IMU面临随时间漂移误差大的问题。冗余定位是解决INS和IMU漂移误差的有效方法^[9-12]。针对冗余INS定位,杨金衡等^[13]以2个IMU之间的距离和夹角为量测量,提出了双惯导定位方法。利用模糊判别函数动态调整噪声协方差矩阵,建立了自适应卡尔曼滤波的双惯导定位模型。Wang^[14]和鲁程等^[15-16]分别针对双惯导和三惯导,以惯导间的距离为约束条件,建立了冗余惯导定位模型,分析了影响定位精度的因素,获得了冗余惯导最佳安装位置。以上研究均是从惯性导航输出的导航参数入手,并未深入到底层解算层面。针对冗余IMU

定位,王忠宾等^[17-18]对多个IMU进行了平面和空间的阵列分布布置,通过坐标轴的反向布局及坐标轴之间成一定角度的空间结构,对输出参数进行分解和多个传感轴取平均的方法融合多个IMU数据,进而消除确定性偏差,降低漂移误差。张鹏辉^[19]针对冗余IMU的6种布局,提出了冗余IMU解算方法,通过仿真和实验验证了正四棱锥式布局具有更好的误差消除能力。以上方法并未将多个IMU之间的位置和姿态关系的约束条件融入姿态解算中。

当多个IMU安装在采煤机上时,其各自输出位置和姿态的差值均应该是常数,但由于漂移误差的存在,位置和姿态的差值均随时间而发生变化。本研究以双IMU为研究对象,利用距离和姿态差值为常数的约束条件,从姿态解算的底层层面,研究采煤机双IMU位姿解算方法,并进行了实验验证。

1 IMU 姿态解算算法

IMU主要由三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计组成。陀螺仪感知角速度信息,加速度计感知加速度信息,而磁力计可感知当地的地磁方向。IMU姿态解算算法主要有梯度下降法^[20-22]、互补滤波法^[23-25]和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法^[26-28]。梯度下降法是对转换到地理坐标系的加速度计和磁力计数据,与对应参考的重力向量和地磁向量构造误差向量,利用目标函数求取误差向量最小值,用于校正陀螺仪输出,进而利用四元数更新方程解算姿态。互补滤波法与梯度下降法的区别在于求取误差向量的方法不同,前者是利用叉乘运算求取误差向量值,而后者是构造目标函数使用梯度下降法求取误差向量最小值。EKF算法是利用扩展卡尔曼滤波基本框架,以姿态更新四元数方程作为状态方程,以加速度计和磁力计输出数据与参考重力向量和地磁向量的转换关系建立量测方程,通过迭代优化得到姿态角。EKF算法由于在处理过程中迭代地进行预测和修正,具有较高的解算精度,其主要算法见后文。

姿态更新的四元数微分方程可表示为式(1),即:

$$\dot{\mathbf{Q}} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega}_{nb}^n \mathbf{Q} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ 为四元数; $\boldsymbol{\Omega}_{nb}^n$ 为旋转矩阵,其可具体表示为式(2)。

$$\mathbf{\Omega}_{nb}^n = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别为惯导组件陀螺仪测量的载体坐标系下 X, Y, Z 轴角速度。

求解式(1), 可得四元数更新的递推方程为式(3), 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_k &= \left(\mathbf{I} + \frac{1}{2} \mathbf{\Omega}_{nb}^n T_g \right) \mathbf{Q}_{k-1} \\ &\Downarrow \\ \begin{bmatrix} (q_0)_k \\ (q_1)_k \\ (q_2)_k \\ (q_3)_k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \omega_x T_g & -\frac{1}{2} \omega_y T_g & -\frac{1}{2} \omega_z T_g \\ \frac{1}{2} \omega_x T_g & 1 & \frac{1}{2} \omega_z T_g & -\frac{1}{2} \omega_y T_g \\ \frac{1}{2} \omega_y T_g & -\frac{1}{2} \omega_z T_g & 1 & \frac{1}{2} \omega_x T_g \\ \frac{1}{2} \omega_z T_g & \frac{1}{2} \omega_y T_g & -\frac{1}{2} \omega_x T_g & 1 \end{bmatrix} \\ &\vdots \\ \begin{bmatrix} (q_0)_{k-1} \\ (q_1)_{k-1} \\ (q_2)_{k-1} \\ (q_3)_{k-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; T_g 为陀螺仪数据采样周期。

EKF 的状态量为式(4), 即:

$$\mathbf{X}_k^e = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T \quad (4)$$

根据式(3), 可得 EKF 中的 $\Delta \mathbf{F}$ 为式(5)。

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \omega_x T & -\frac{1}{2} \omega_y T & -\frac{1}{2} \omega_z T \\ \frac{1}{2} \omega_x T & 1 & \frac{1}{2} \omega_z T & -\frac{1}{2} \omega_y T \\ \frac{1}{2} \omega_y T & -\frac{1}{2} \omega_z T & 1 & \frac{1}{2} \omega_x T \\ \frac{1}{2} \omega_z T & \frac{1}{2} \omega_y T & -\frac{1}{2} \omega_x T & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

理想情况下, 载体静止状态下的重力加速度应沿东北天坐标系下天方向的负方向, 利用方向余弦矩阵 $\mathbf{C}_n^b$ (式6) 将重力加速度 $\mathbf{g}$ 转换到载体坐标系, 得到载体静止状态下的加速度计三轴测量数据 a_x, a_y, a_z (式7)。

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 + 2q_0q_2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ |\mathbf{g}| \end{bmatrix} = |\mathbf{g}| \begin{bmatrix} 2q_1q_3 - 2q_0q_2 \\ 2q_2q_3 + 2q_0q_1 \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

EKF 的加速度计量测量为式(8), 即:

$$\mathbf{Z}_a^e(k) = [a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (8)$$

根据式(3), 可得 EKF 中的 $\Delta \mathbf{H}_a$ 为式(9), 即:

$$\Delta \mathbf{H}_a = |\mathbf{g}| \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 2q_0 & -2q_1 & -2q_2 & 2q_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

理论上, 地球磁场在水平方向上只有北向有值, 而垂直方向则可被忽略。因此, 利用方向余弦矩阵 $\mathbf{C}_n^b$ (式6), 可将归一化为1的磁场转换到载体坐标系为式(10), 即:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2q_1q_2 + 2q_0q_3 \\ q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 \\ 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

EKF 的磁力计量测量为式(11), 即:

$$\mathbf{Z}_m^e(k) = [m_x \ m_y \ m_z]^T \quad (11)$$

根据式(10), 可得 EKF 中的 $\Delta \mathbf{H}_m$ 为式(12), 即:

$$\Delta \mathbf{H}_m = \begin{bmatrix} 2q_3 & 2q_2 & 2q_1 & 2q_0 \\ 2q_0 & -2q_1 & 2q_2 & -2q_3 \\ -2q_1 & -2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于加速度计只能校正横滚角和俯仰角, 而磁力计只能校正航向角。因此, 基于 EKF 的姿态解算过程分为2个步骤: 1) 根据加速度计量测方程和四元数状态方程, 更新解算周期内的四元数增量, 并将该元数增量中的第4个元素设为0; 2) 根据磁力计量测方程和四元数状态方程, 同样地更新四元数增量, 并将该四元数的第2和第3个元素设为0。最后, 将1)和2)所得到的四元数增量相加, 得到最优估计的四元数增量值, 再结合上一时刻的最优估计四元数, 获得该时刻的最优估计四元数。

2 双 IMU 姿态解算算法

2.1 信息滤波状态方程

双惯导位姿解算模型的状态向量为 IMU-1 和 IMU-2 的姿态四元数, 如式(13)所示, 即:

$$\mathbf{X}_k = [q_0^1 \ q_1^1 \ q_2^1 \ q_3^1 \ q_0^2 \ q_1^2 \ q_2^2 \ q_3^2]^T \quad (13)$$

式中: $q_0^1, q_1^1, q_2^1, q_3^1$ 为 IMU-1 姿态四元数中的元素; $q_0^2, q_1^2, q_2^2, q_3^2$ 为 IMU-2 姿态四元数中的元素。

根据式(3)的四元数更新递推方程和式(13)的状态向量, 可得双惯导位姿解算模型的状态方程为式(14), 即:

$$\mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{F}_q \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_q \quad (14)$$

式中: $\mathbf{F}_q$ 为状态转移矩阵, 具体可表示为式(15); $\mathbf{W}_q$ 为状态噪声。

$$\mathbf{F}_q = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2}\omega_x^1 T & -\frac{1}{2}\omega_y^1 T & -\frac{1}{2}\omega_z^1 T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\omega_x^1 T & 1 & \frac{1}{2}\omega_z^1 T & -\frac{1}{2}\omega_y^1 T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\omega_y^1 T & -\frac{1}{2}\omega_z^1 T & 1 & \frac{1}{2}\omega_x^1 T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}\omega_z^1 T & \frac{1}{2}\omega_y^1 T & -\frac{1}{2}\omega_x^1 T & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{2}\omega_x^2 T & -\frac{1}{2}\omega_y^2 T & -\frac{1}{2}\omega_z^2 T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\omega_x^2 T & 1 & \frac{1}{2}\omega_z^2 T & -\frac{1}{2}\omega_y^2 T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\omega_y^2 T & -\frac{1}{2}\omega_z^2 T & 1 & \frac{1}{2}\omega_x^2 T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}\omega_z^2 T & \frac{1}{2}\omega_y^2 T & -\frac{1}{2}\omega_x^2 T & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.2 信息滤波量测方程

$$\mathbf{Z}_a = \mathbf{H}_1(\mathbf{X}) + \mathbf{V}_a$$

↓

1) 加速度计量测方程

由于 IMU 安装在采煤机上,其加速度计不仅会测量重力,而且还会测量采煤机加速度。因此,利用采样周期内编码器测量速度的增量来表示这一周期内的采煤机载体加速度,故式(7)可修改为式(16),即:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y - \frac{v_t - v_{t-1}}{\Delta t} \\ a_z \end{bmatrix} = \mathbf{C}_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ |\mathbf{g}| \end{bmatrix} = |\mathbf{g}| \begin{bmatrix} 2q_1 q_3 - 2q_0 q_2 \\ 2q_2 q_3 + 2q_0 q_1 \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: v_t 为编码器测量的 t 时刻速度值; Δt 为编码器采样周期。

根据式(16),对于双惯导定位系统,可得信息滤波加速度计的量测方程为式(17),即:

$$\begin{bmatrix} a_x^1 \\ a_y^1 \frac{v_t - v_{t-1}}{\Delta t} \\ a_z^1 \\ a_x^2 \\ a_y^2 \frac{v_t - v_{t-1}}{\Delta t} \\ a_z^2 \end{bmatrix} = |\mathbf{g}| \begin{bmatrix} 2q_1^1 q_3^1 - 2q_0^1 q_2^1 \\ 2q_2^1 q_3^1 + 2q_0^1 q_1^1 \\ (q_0^1)^2 - (q_1^1)^2 - (q_2^1)^2 + (q_3^1)^2 \\ 2q_1^2 q_3^2 - 2q_0^2 q_2^2 \\ 2q_2^2 q_3^2 + 2q_0^2 q_1^2 \\ (q_0^2)^2 - (q_1^2)^2 - (q_2^2)^2 + (q_3^2)^2 \end{bmatrix} + \mathbf{V}_a \quad (17)$$

式中: $\mathbf{Z}_a$ 为加速度计量测量; a_x^1 、 a_y^1 、 a_z^1 为 IMU-1 加速度计三轴测量数据; a_x^2 、 a_y^2 、 a_z^2 为 IMU-2 加速度计三轴测量数据; $\mathbf{V}_a$ 为加速度计量测噪声。

故加速度计量测方程的雅克比矩阵 $\mathbf{H}_a$ 为式(18)。

$$\mathbf{H}_a = \frac{\partial[\mathbf{H}_1(\mathbf{X})]}{\partial(\mathbf{X})} = |\mathbf{g}| \begin{bmatrix} -2q_2^1 & 2q_3^1 & -2q_0^1 & 2q_1^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2q_1^1 & 2q_0^1 & 2q_3^1 & 2q_2^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2q_0^1 & -2q_1^1 & -2q_2^1 & 2q_3^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2q_2^1 & 2q_3^1 & -2q_0^1 & 2q_1^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2q_1^1 & 2q_0^1 & 2q_3^1 & 2q_2^1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2q_0^1 & -2q_1^1 & -2q_2^1 & 2q_3^1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2) 磁力计量测方程

根据式(10),对于双惯导定位系统,可得信息滤波加速度计量测方程为式(19),即:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{H}_2(\mathbf{X}) + \mathbf{V}_m$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} m_x^1 \\ m_y^1 \\ m_z^1 \\ m_x^2 \\ m_y^2 \\ m_z^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2q_1^1 q_2^1 + 2q_0^1 q_3^1 \\ (q_0^1)^2 - (q_1^1)^2 + (q_2^1)^2 - (q_3^1)^2 \\ 2q_2^1 q_3^1 - 2q_0^1 q_1^1 \\ 2q_1^2 q_2^2 + 2q_0^2 q_3^2 \\ (q_0^2)^2 - (q_1^2)^2 + (q_2^2)^2 - (q_3^2)^2 \\ 2q_2^2 q_3^2 - 2q_0^2 q_1^2 \end{bmatrix} + \mathbf{V}_m \quad (19)$$

式中: $\mathbf{Z}_m$ 为磁力计测量; m_x^1, m_y^1, m_z^1 为 IMU-1 磁力计三轴测量数据; m_x^2, m_y^2, m_z^2 为 IMU-2 磁力计三轴测量数据;

$\mathbf{V}_m$ 为磁力计测量噪声。

故磁力计测量方程的雅克比矩阵 $\mathbf{H}_m$ 为式(20)。

$$\mathbf{H}_m = \frac{\partial[\mathbf{H}_2(\mathbf{X})]}{\partial(\mathbf{X})} = \begin{bmatrix} 2q_3^1 & 2q_2^1 & 2q_1^1 & 2q_0^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2q_0^1 & -2q_1^1 & 2q_2^1 & -2q_3^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2q_1^1 & -2q_0^1 & 2q_3^1 & 2q_2^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2q_3^2 & 2q_2^2 & 2q_1^2 & 2q_0^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2q_0^2 & -2q_1^2 & 2q_2^2 & -2q_3^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2q_1^2 & -2q_0^2 & 2q_3^2 & 2q_2^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3) 姿态约束量测方程

双惯导系统中 IMU-1 和 IMU-2 的姿态四元数差值 $q_0^d, q_1^d, q_2^d, q_3^d$ 可分别表示为式(21), 即:

$$\begin{aligned} q_0^d &= q_0^1 - q_0^2 \\ q_1^d &= q_1^1 - q_1^2 \\ q_2^d &= q_2^1 - q_2^2 \\ q_3^d &= q_3^1 - q_3^2 \end{aligned} \quad (21)$$

由于 IMU-1 和 IMU-2 安装在同一个载体上, 故各自姿态四元数中元素之差应该是常数。因此, 姿态约束量测方程为式(22), 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_z &= \mathbf{H}_3(\mathbf{X}) + \mathbf{V}_z \\ \Downarrow \\ \begin{bmatrix} q_0^d \\ q_1^d \\ q_2^d \\ q_3^d \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} q_0^1 - q_0^2 \\ q_1^1 - q_1^2 \\ q_2^1 - q_2^2 \\ q_3^1 - q_3^2 \end{bmatrix} + \mathbf{V}_z \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{Z}_z$ 为姿态约束量测量; $\mathbf{V}_z$ 为姿态约束量测噪声。

故姿态约束量测方程的雅克比矩阵 $\mathbf{H}_z$ 为式(23), 即:

$$\mathbf{H}_z = \frac{\partial[\mathbf{H}_3(\mathbf{X})]}{\partial(\mathbf{X})} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

4) 位置约束量测方程

根据航位推算法和四元数与方向余弦矩阵的转换关系(式6), 得到用四元数表式的 IMU-1 和 IMU-2 位置 $(Pn\ 1)_k$ 和 $(Pn\ 2)_k$ 分别为式(24)和(25), 即:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \frac{v_{t-1}\Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(2q_3^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_0^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_1^1)] \\ d_{12} &= \frac{v_{t-1}\Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(-2q_2^1) + 2(N_2 - N_1)(2q_1^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_0^1)] \\ d_{13} &= \frac{v_{t-1}\Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(-2q_1^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_2^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_3^1)] \end{aligned}$$

$$(\mathbf{P}_1^n)_t = \begin{bmatrix} (E_1)_t \\ (N_1)_t \\ (U_1)_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (E_1)_{t-1} \\ (N_1)_{t-1} \\ (U_1)_{t-1} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} v_{t-1}\Delta t(2q_1^1q_2^1 - 2q_0^1q_3^1) \\ v_{t-1}\Delta t[(q_0^1)^2 - (q_1^1)^2 + (q_2^1)^2 - (q_3^1)^2] \\ v_{t-1}\Delta t(2q_2^1q_3^1 + 2q_0^1q_1^1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$(\mathbf{P}_2^n)_t = \begin{bmatrix} (E_2)_t \\ (N_2)_t \\ (U_2)_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (E_2)_{t-1} \\ (N_2)_{t-1} \\ (U_2)_{t-1} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} v_{t-1}\Delta t(2q_1^2q_2^2 - 2q_0^2q_3^2) \\ v_{t-1}\Delta t[(q_0^2)^2 - (q_1^2)^2 + (q_2^2)^2 - (q_3^2)^2] \\ v_{t-1}\Delta t(2q_2^2q_3^2 + 2q_0^2q_1^2) \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中: v_{t-1} 为编码器测量的 $t-1$ 时刻速度值。

当 IMU-1 和 IMU-2 安装在采煤机后, 其解算位置之间的差值应该是常数。因此, 位置约束量测方程为式(26), 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_p &= \mathbf{H}_4(\mathbf{X}) + \mathbf{V}_p \\ \Downarrow \\ r_{12} &= T_o v \sqrt{\{(2q_1^2q_2^2 - 2q_0^2q_3^2) - (2q_1^1q_2^1 - 2q_0^1q_3^1)\}^2 + \dots} \\ &\quad \sqrt{\{[(q_0^2)^2 - (q_1^2)^2 + (q_2^2)^2 - (q_3^2)^2] - [(q_0^1)^2 - (q_1^1)^2 + (q_2^1)^2 - (q_3^1)^2]\}^2 + \dots} \\ &\quad \sqrt{\{(2q_2^2q_3^2 + 2q_0^2q_1^2) - (2q_2^1q_3^1 + 2q_0^1q_1^1)\}^2 + \mathbf{V}_p} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{Z}_p$ 为位置约束量测量; $\mathbf{V}_p$ 为位置约束量测噪声。

故位置约束量测方程的雅克比矩阵 $\mathbf{H}_p$ 为式(27), 即:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_p &= \frac{\partial[\mathbf{H}_4(\mathbf{X})]}{\partial(\mathbf{X})} = \\ &[d_{11} \ d_{12} \ d_{13} \ d_{14} \ d_{15} \ d_{16} \ d_{17} \ d_{18}] \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $d_{11} \sim d_{18}$ 具体描述为式(28)。

$$\begin{aligned}
 d_{14} &= \frac{v_{t-1} \Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(2q_0^1) + 2(N_2 - N_1)(2q_3^1) + 2(N_2 - N_1)(-2q_2^1)] \\
 d_{15} &= \frac{v_{t-1} \Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(2q_3^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_0^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_1^2)] \\
 d_{16} &= \frac{v_{t-1} \Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(2q_2^2) + 2(N_2 - N_1)(-2q_1^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_0^2)] \\
 d_{17} &= \frac{v_{t-1} \Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(2q_1^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_2^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_3^2)] \\
 d_{18} &= \frac{v_{t-1} \Delta t}{2r_{12}} [2(E_2 - E_1)(-2q_0^2) + 2(N_2 - N_1)(-2q_3^2) + 2(N_2 - N_1)(2q_2^2)]
 \end{aligned} \tag{28}$$

根据以上所建立的信息滤波状态方程和量测方程,滤波之后得到 IMU-1 和 IMU-2 最优姿态,求取其平均值,获得采煤机最优姿态。结合轴编码器测量

的速度信息,采用航位推算法解算采煤机最优位置。图 1 为双惯导位姿解算方法流程图。

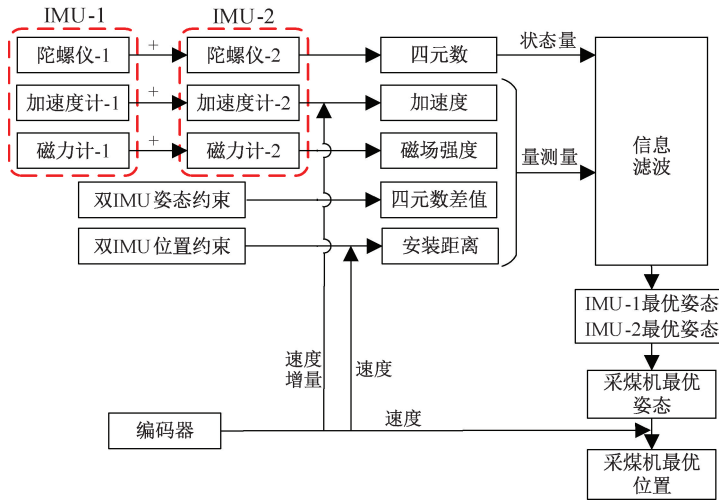


图 1 双 IMU 位姿解算方法流程

Fig. 1 Flow chart of double-IMU position and the attitude calculation method

3 实验验证

为了验证本文算法的有效性,利用图 2 的实验装置进行实验。实验装置包括移动机器人、GPS 接收器、惯性导航和上位机。移动机器人能够模拟采煤机运动,作为惯性导航的安装载体。GPS 能够提供移动机器人的准确轨迹。惯性导航采用国产的 IMU720-A 型号。由于移动机器人四轮电机已经集成轴编码器,速度信息由移动机器人通过 USB 传输给上位机。上位机用于接收惯性导航姿态数据和移动机器人速度数据,并进行算法处理。

实验进行 4 刀,每刀 52 m,相邻刀之间的推进距离为 1.2 m。每刀均尽可能的沿直线行驶,速度大约保持在 0.2~0.3 m/s。由于 IMU 磁力计感知的初始航向角偏差较大,以 GPS 第 1 刀起始点和终点之间连线的航向角为 IMU 初始航向角。图 3 和 4 分别为 IMU-1 和 IMU-2 姿态

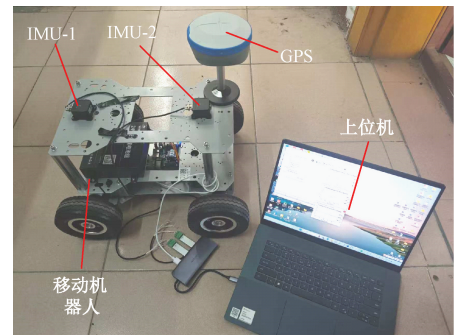


图 2 实验装置

Fig. 2 The experimental device

角。由于本次实验存在 3 次斜切进刀,故图 3(a)和 4(a)的航向角均发生了 3 次较大的突变。由图可知,相比于 EKF 算法,经过本文算法处理后的航向角漂移明显减小,俯仰角和横滚角的波动明显减弱。

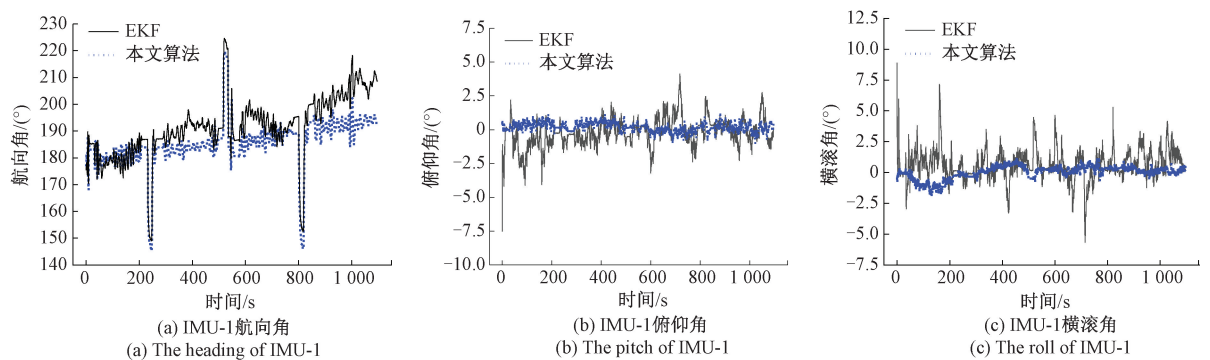


图 3 IMU-1 姿态角
Fig. 3 The attitude angles of IMU-1

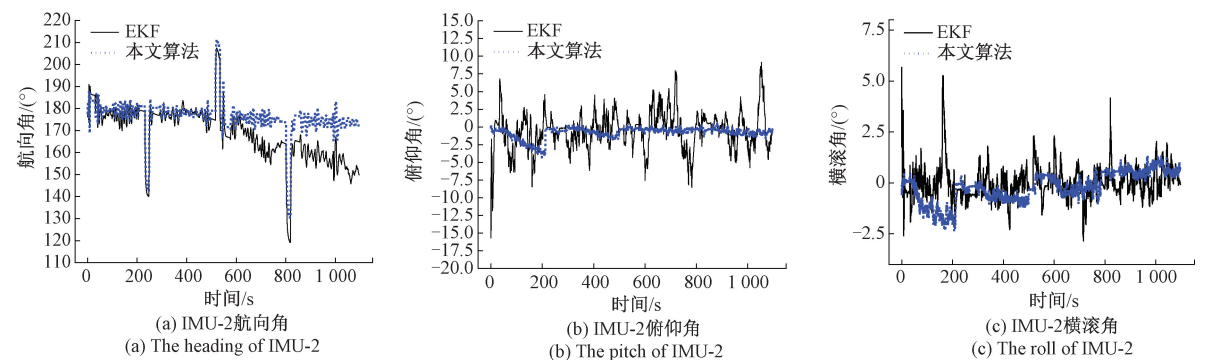


图 4 IMU-2 姿态角
Fig. 4 The attitude angles of IMU-2

为了定量分析定位效果,解算了 IMU 位置坐标。图 5 为 IMU-1 经过 EKF 和本文算法处理后的轨迹,其 3 个方向的误差如图 6 所示。图 7 为 IMU-2 经过 EKF 和本文算法处理后的轨迹,其 3 个方向的误差如图 8 所示。由 IMU-1 和 IMU-2 轨迹图可知,相比于 EKF 算法,经过本文算法处理后的轨迹曲线更加接近 GPS 曲线。需要说明的是,为了尽可能模拟采煤机行进特点,移动机器人完成第 1 刀后,不进行掉头,而是后退行进完成第 2 刀,依次类推完成第 3 和第 4 刀。由于 4 刀实验中航向角漂移

趋势不变(图 3(a)和 4(a)),因此图 5(a)和 7(a)中经过 EKF 和本文算法处理后的轨迹曲线在相邻刀的漂移趋势相反,这也解释了图 6(a)、(b)和图 8(a)、(b)中北方向和东方向误差在相邻刀的变化趋势相反。由于只关心每刀轨迹的定位误差,故在图 6 和 8 中的斜切轨迹误差设为 0。表 1 和 2 分别列出了 IMU-1 和 IMU-2 每刀在东、北、天 3 个方向的最大误差值以及每刀的球概率误差。由表可知,无论对于 IMU-1 还是 IMU-2,本文算法相比于 EKF 算法能够显著减小定位误差。以第 4 刀为例,对于

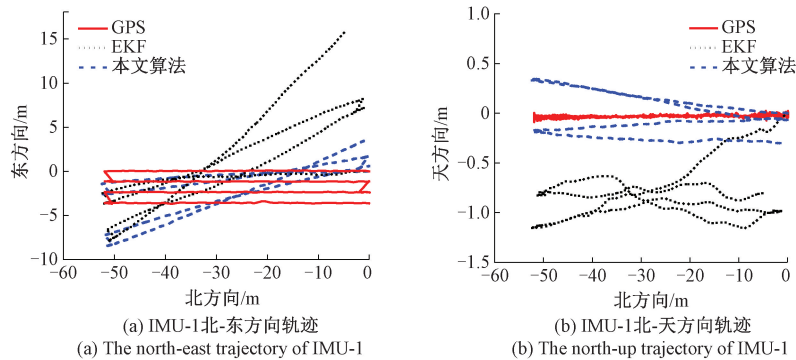


图 5 IMU-1 轨迹
Fig. 5 The trajectory of IMU-1

IMU-1,EKF 算法处理后的 3 个方向误差分别为 4.910 8、19.357 3 和 0.854 6 m,本文算法处理后的误差分别为 1.235 3、7.032 8 和 0.315 4 m。对于 IMU-2,EKF 算法处理后的 3 个方向误差分别为 3.511 7、11.560 9 和 1.470 7 m,本文算法处理后的误差分别为 1.076 0、3.069 6 和 1.503 5 m。本文以球概率误差来评价定位精度。球概率误差是在以天线真实位置为球心的球内,偏离球心概率为 50% 的三维点位精度分布度量。对于

IMU-1,EKF 算法处理后 4 刀轨迹的球概率误差分别为 0.936 3、4.092 7、3.618 0 和 8.220 2 m,本文算法处理后的球概率误差分别减小到 0.480 0、1.245 0、1.545 2 和 2.882 8 m,定位精度提升了约 64.9%。同样的,对于 IMU-2,EKF 算法处理后 4 刀轨迹的球概率误差分别为 0.964 3、1.261 3、4.342 0 和 5.736 8 m,本文算法处理后的球概率误差分别减小到 0.571 6、1.682 3、1.617 8 和 2.352 3 m,定位精度提升了 59.0%。

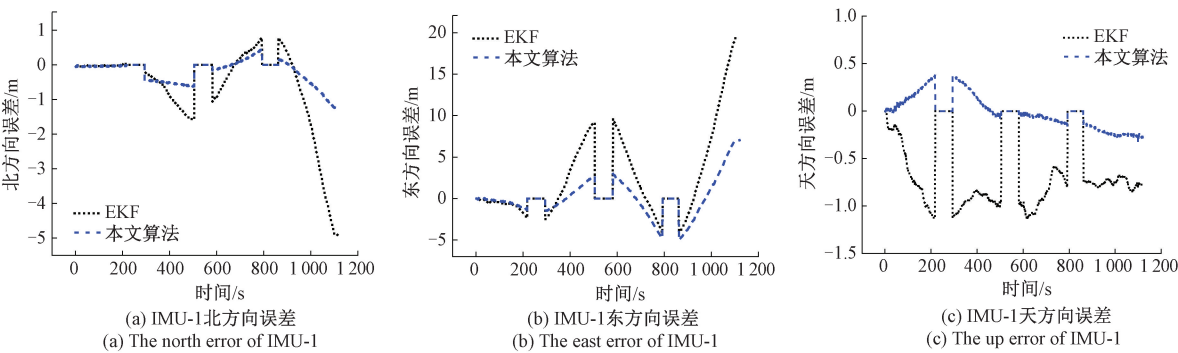


图 6 IMU-1 位置误差
Fig. 6 The position error of IMU-1

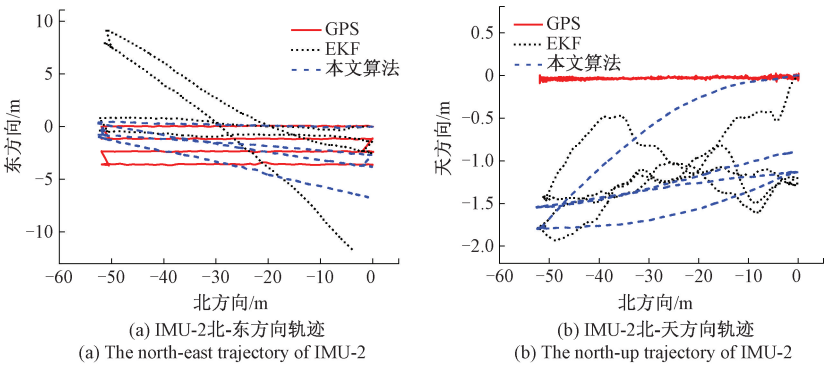


图 7 IMU-2 轨迹
Fig. 7 The trajectory of IMU-2

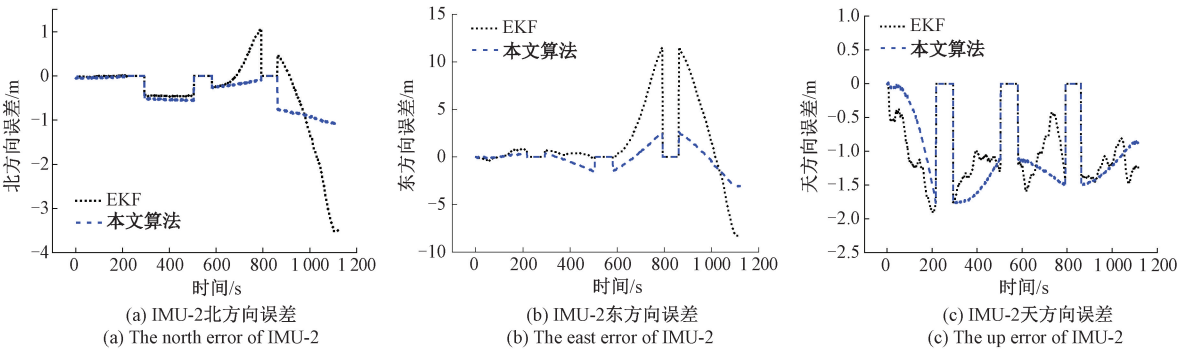


图 8 IMU-2 位置误差
Fig. 8 The position error of IMU-2

表 1 IMU-1 最大误差

Table 1		The maximum errors of IMU-1 (m)			
	截割次数	北方向	东方向	天方向	球概率误差
EKF	第 1 刀	0.050 8	2.387 0	1.129 3	0.936 3
	第 2 刀	1.580 8	9.247 3	1.115 7	4.092 7
	第 3 刀	1.504 7	9.574 7	1.129 1	3.618 0
	第 4 刀	4.910 8	19.357 3	0.854 6	8.220 2
本文 算法	第 1 刀	0.051 8	1.367 7	0.374 3	0.480 0
	第 2 刀	0.630 9	2.759 0	0.369 0	1.245 0
	第 3 刀	0.440 1	4.813 8	0.152 1	1.545 2
	第 4 刀	1.235 3	7.032 8	0.315 4	2.882 8

表 2 IMU-2 最大误差

Table 2		The maximum errors of IMU-2				(m)
	截割次数	北方向	东方向	天方向	球概率误差	
EKF	第 1 刀	0.050 2	0.823 6	1.911 7	0.964 3	
	第 2 刀	0.472 3	0.761 6	1.755 2	1.261 3	
	第 3 刀	1.079 3	11.515 9	1.585 9	4.342 0	
	第 4 刀	3.511 7	11.560 9	1.470 7	5.736 8	
本文 算法	第 1 刀	0.051 9	0.428 2	1.762 9	0.571 6	
	第 2 刀	0.563 3	1.535 3	1.766 6	1.682 3	
	第 3 刀	0.264 2	2.608 9	1.520 5	1.617 8	
	第 4 刀	1.076 0	3.069 6	1.503 5	2.352 3	

将本文所提算法处理后的 IMU-1 姿态角和 IMU-2 姿态角求取平均值作为移动机器人的最优姿态角 (图 9)。结合移动机器人速度信息,利用航位推算算法解算最优轨迹,其在北-东方向和北-天方向平面的投影如图 10 所示。图 11 为移动机器人最优轨迹的误

差图,其在每刀 3 个方向的最大值和每刀的球概率误差列于表 3 中。以第 4 刀为例,北、东、天方向的最大误差分别为 0.672 2、2.006 8 和 0.828 1 m。4 刀的球概率误差分别为 0.312 5、0.935 8、0.790 7 和 1.431 7 m。

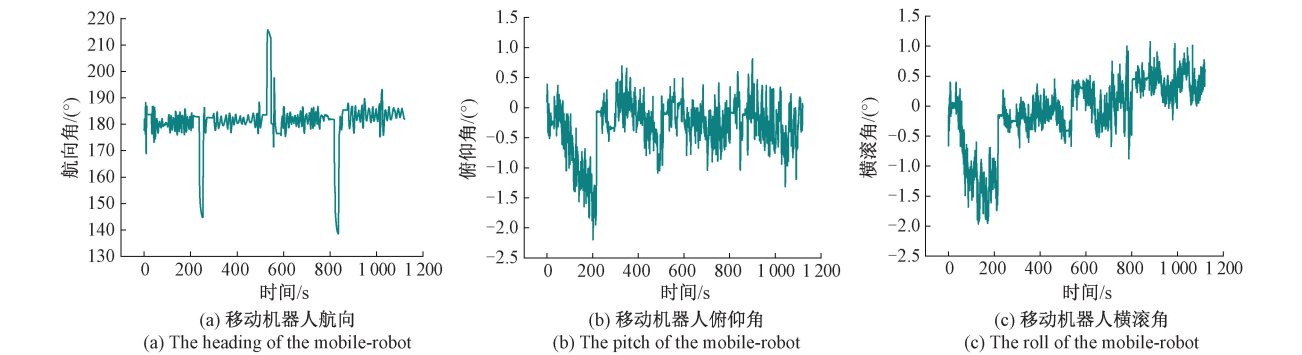


图 9 移动机器人姿态角
Fig. 9 The attitude angle of the mobile-robot

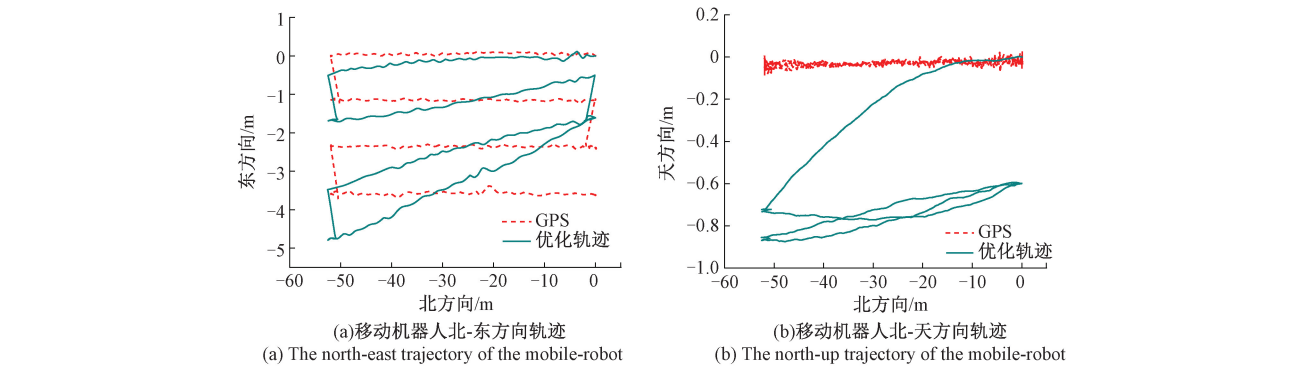


图 10 移动机器人轨迹
Fig. 10 The trajectory of the mobile-robot

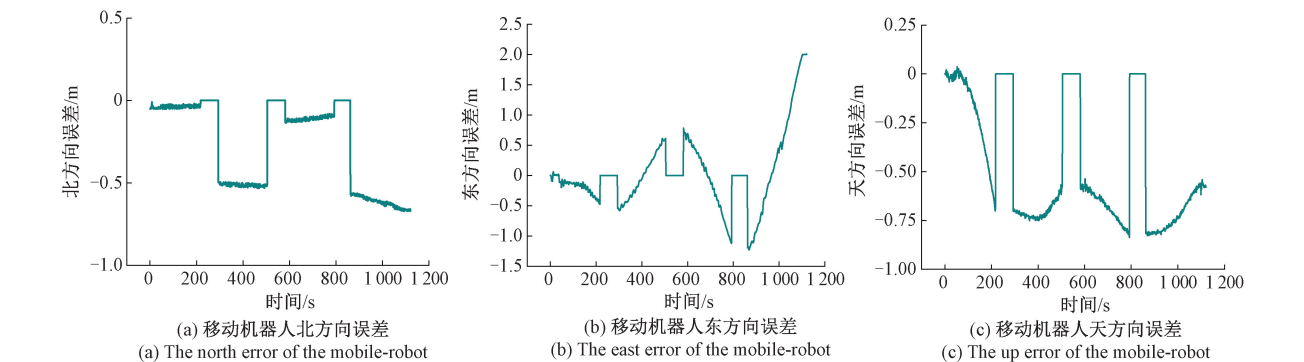


图 11 移动机器人位置误差
Fig. 11 The position error of the mobile-robot

表 3 移动机器人最大误差

Table 3 The maximum errors of the mobile robot (m)

截割次数	北方向	东方向	天方向	球概率误差
第 1 刀	0.051 8	0.474 6	0.700 5	0.312 5
第 2 刀	0.533 7	0.613 5	0.750 4	0.935 8
第 3 刀	0.136 9	1.122 1	0.836 6	0.790 7
第 4 刀	0.672 2	2.006 8	0.828 1	1.431 7

4 结 论

本文以双 IMU 的姿态四元数作为状态量建立状态方程,以双 IMU 的加速度计、磁力计、位置差值、姿态差值为量测量建立量测方程,结合信息滤波基本框架,提出了采煤机双 IMU 位姿解算方法。实验结果表明,IMU-1 定位精度提升了约 64.9%,IMU-2 定位精度提升了约 59.0%。经过算法处理后的移动机器人模拟 4 刀实验的球概率误差分别为 0.312 5、0.935 8、0.790 7 和 1.431 7 m。由此可以看出,双 IMU 定位精度虽然有了有一定程度的提升,但 IMU 随时间误差增长的问题依然存在。后续将分析 IMU 中陀螺仪和加速度计的安装偏差和漂移误差,建立相应的模型,提出陀螺仪和加速度计安装偏差和漂移误差估计方法。

参考文献

[1] 葛世荣,王世佳,曹波,等. 智能采运机组自主定位原理与技术[J]. 煤炭学报,2022,47(1): 75-86.
GE SH R, WANG SH J, CAO B, et al. Autonomous positioning principle and technology of intelligent shearer and conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 75-86.

[2] DAI W W, WANG SH J, WANG SH B. Longwall mining automation—the shearer positioning methods

between the Longwall Automation Steering Committee and China University of Mining and Technology[J]. Applied Sciences, 2023, 13(22): 12168.

[3] REID D C, DUNN M T, REID P B, et al. A practical inertial navigation solution for continuous miner automation[C]. Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012, 12: 114-119.

[4] DUNN M T, THOMPSON J P, REID P B, et al. High accuracy inertial navigation for underground mining machinery[C]. 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2012: 1179-1183.

[5] 李昂,郝尚清,王世博,等. 基于SINS/轴编码器组合的采煤机定位方法与试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 95-100.
LI ANG, HAO SH Q, WANG SH B, et al. Experimental study on shearer positioning method based on SINS and Encoder[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 95-100.

[6] 李昂. 采煤机采区绝对定位定姿技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
LI ANG. Research on shearer absolute positioning and attitude technology in mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2015.

[7] 王世佳. 异类多源信息融合的采煤机定位技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
WANG SH J. Research on shearer positioning technology with heterogeneous multi-source information fusion[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2021.

[8] 李国威,常亚军,连东辉,等. 基于惯导系统的煤矿综采工作面自动调直系统及方法:CN111441812B[P]. 2021-09-07.
LI G W, CHANG Y J, LIAN D H, et al. Automatic

- alignment system and method of longwall mining face in coal mine based on inertial navigation system; CN111441812B[P]. 2021-09-07.
- [9] XUAN J W, ZHU T, PENG G, et al. A review on the inertial measurement unit array of micro electro-mechanical systems[J]. *Sensors*, 2024, 24(22): 7140.
- [10] 廖亚桢, 刘昱, 张立强, 等. 面向PDR定位系统的多层感知机IMU阵列数据融合方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8): 35-42.
- LIAO Y ZH, LIU Y, ZHANG L Q, et al. Multi-layer sensor IMU array data fusion method for PDR positioning system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(8): 35-42.
- [11] SHEN K, ZUO J W, LI Y L, et al. Observability analysis and optimization of cooperative navigation system with a low-cost inertial sensor array[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(11): 9863-9877.
- [12] 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.
- [13] 杨金衡, 宋单阳, 田慕琴, 等. 基于自适应卡尔曼滤波的双惯导采煤机定位方法[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(7): 14-20, 28.
- YANG J H, SONG D Y, TIAN M Q, et al. Double inertial navigation shearer positioning method based on adaptive Kalman filter[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(7): 14-20, 28.
- [14] WANG SH J. Research on shearer positioning with double-INS[J]. *Sensor Review*, 2019, 39(4): 577-585.
- [15] 鲁程, 王世博, 葛世荣, 等. 多惯导冗余的采煤机定位原理及其合理性分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 746-753.
- LU CH, WANG SH B, GE SH R, et al. Redundant multi-INS positioning algorithm of shearer and analysis of its rationality[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 746-753.
- [16] LU CH, WANG SH B, SHIN K, et al. Experimental research of triple inertial navigation system shearer positioning[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7): 1474.
- [17] 王忠宾, 司垒, 王浩, 等. 基于空间阵列式惯性单元的防冲钻孔机器人位姿解算方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 598-610.
- WANG ZH B, SI L, WANG H, et al. Position and attitude calculation method of anti-impact drilling robot based on spatial array inertial units[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 598-610.
- [18] 司垒, 王忠宾, 谭超, 等. 基于差分式惯性传感组件的采煤机位姿解算法[J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(2): 220-227, 406.
- SI L, WANG ZH B, TAN CH, et al. Position and attitude calculation algorithm of shearer based on differential inertial sensors[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*. 2021, 41(2): 220-227, 406.
- [19] 张鹏辉. 基于UWB和IMU的防冲钻孔机器人融合定位方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHANG P H. Research on fusion positioning method of drilling robot for rockburst prevention based on UWB and IMU[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2023.
- [20] ZHAO G L, WANG Y, LIANG W D, et al. A UAV attitude fusion algorithm based on gradient descent-improved EKF[J]. *Earth Science Informatics*, 2025, 18(2): 1-13.
- [21] RADAK H, SCHEUNERT C, REISSLEIN M, et al. QGD-OE: IMU orientation estimation based on gradient descent in the quaternion field[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9503816.
- [22] LI SH L, LI L J, SHI D W, et al. Multikernel correntropy-based orientation estimation of IMUs: Gradient descent methods[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 73: 1-16.
- [23] WANG D D. Analysis of a mahony algorithm-based system for monitoring swimming 3D motion data[C]. 2023 IEEE International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems, 2023: 1-5.
- [24] 魏韡, 宋晓东, 王刚. 改进型自适应互补滤波MEMS-IMU姿态解算实现[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(24): 81-86.
- WEI W, SONG X D, WANG G. Implementation of MEMS-IMU attitude calculation based on improved adaptive complementary filter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(24): 81-86.
- [25] LAN J P, WANG K X, SONG S J, et al. Method for measuring non-stationary motion attitude based on MEMS-IMU array data fusion and adaptive filtering[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(8): 086304.
- [26] 储开斌, 赵爽, 冯成涛. 基于Mahony-EKF的无人机

姿态解算算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12): 12-18.

CHU K B, ZHAO SH, FENG CH T. UAV attitude calculation algorithm based on Mahony-EKF[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(12): 12-18.

[27] LI H, CHANG SH, YAO Q, et al. Robust heading and attitude estimation of MEMS IMU in magnetic anomaly field using a partially adaptive decoupled extended Kalman filter and LSTM algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.

[28] WEI X F, FAN SH W, ZHANG Y, et al. A robust adaptive error state Kalman filter for MEMS IMU attitude estimation under dynamic acceleration [J]. Measurement, 2025, 242: 116097.

作者简介



代卫卫,2009 年于太原理工大学获得学士学位,2012 年于太原理工大学获得硕士学位,现为中国矿业大学博士研究生,主要研究方向为矿山装备智能化。

E-mail: D18649519857@ 163. com

Dai Weiwei received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2009, and received his

M. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2012. He is currently a Ph. D. candidate at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.



王世博(通信作者),2007 年于中国矿业大学获得博士学位,现为中国矿业大学教授,主要研究方位为矿山装备智能化。

E-mail: wangshb@ cumt. edu. cn

Wang Shibo (Corresponding author) received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2007. He is currently a professor at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.



王世佳,2021 年于中国矿业大学获得博士学位,现为燕山大学讲师,主要研究方向为矿山装备智能化。

E-mail: sjwang@ ysu. edu. cn

Wang Shijia received his Ph. D. degree from China University of Mining and Technology in 2021. He is currently a lecturer at Yanshan University. His main research interest is intelligent mining equipment.