

文章编号:1671-251X(2021)01-0049-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020080015

基于捷联惯性导航的矿用单轨吊机车定位算法

郭梁^{1,2}, 宋建成^{1,2}, 宁振兵³, 王明勇³, 吝伶俐^{1,2}, 黄健琦^{1,2}

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室,
山西 太原 030024; 3. 太原矿机电气股份有限公司, 山西 太原 030032)



扫码移动阅读

摘要:针对煤矿井下单轨吊机车常用定位方法存在定位精度低和定位成本高的问题,提出了一种基于捷联惯性导航的矿用单轨吊机车定位算法。采用九轴惯性测量单元(IMU)采集机车加速度数据,并对加速度数据进行限幅滤波和去零偏等预处理,解算并输出姿态角和加速度值;采用方向余弦矩阵法滤除加速度数据中所含的重力分量,消除该分量对数据的干扰;利用加速度变化率阈值法和零速修正法修正稳态误差,使稳态加速度和速度更接近真实值;采用 Lagrange 插值多项式测距法测量单轨吊机车的行驶距离,并利用测距结果定时修正法来补偿测距误差,根据机车的起点和行驶距离实现定位。实验结果表明,当车辆行程为 30.8 m 时,测距误差基本在 0.65 m 以内,可以达到高精度、低成本的定位要求。

关键词:矿用单轨吊机车;定位;捷联惯性导航;九轴惯性测量单元;重力分量;积分测距;加速度传感器

中图分类号:TD524 文献标志码:A

Positioning algorithm of mine-used monorail crane locomotive based on strapdown inertial navigation

GUO Liang^{1,2}, SONG Jiancheng^{1,2}, NING Zhenbing³, WANG Mingyong³,
LIN Lingyan^{1,2}, HUANG Jianqi^{1,2}

(1.College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2.National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3.Taiyuan Kuangji Electrical Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract:A positioning algorithm of mine-used monorail crane locomotive based on strapdown inertial navigation is proposed for the problems of low positioning accuracy and high positioning cost of common positioning methods for underground monorail crane locomotives in coal mines. Nine-axis inertial measurement unit (IMU) is used to collect the acceleration data of the locomotive, and the acceleration data is pre-processed by limiting filtering and zero offset removal to calculate and output the attitude angle and acceleration values. The direction cosine matrix method is applied to filter out the gravity component contained in the acceleration data so as to eliminate the interference of this component to the data. The acceleration rate of change threshold method and zero speed correction method are used to correct the steady-state error so that the steady-state acceleration and speed are closer to the real value. The Lagrange interpolation polynomial distance measurement method is applied to measure the driving distance of the monorail crane locomotive, and the distance measurement result timing correction method is used to

收稿日期:2020-08-04;**修回日期:**2020-11-15;**责任编辑:**张强。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577123)。
作者简介:郭梁(1994—),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为矿用智能电器技术,E-mail:1095192770@qq.com。
引用格式:郭梁,宋建成,宁振兵,等.基于捷联惯性导航的矿用单轨吊机车定位算法[J].工矿自动化,2021,47(1):49-54.

GUO Liang, SONG Jiancheng, NING Zhenbing, et al. Positioning algorithm of mine-used monorail crane locomotive based on strapdown inertial navigation[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(1): 49-54.

compensate the distance measurement error. Therefore, the positioning can be obtained according to the starting point and driving distance of the locomotive. The experimental results show that when the driving distance is 30.8 m, the ranging error is basically within 0.65 m, which can meet the requirements of high-precision and low-cost positioning.

Key words: mine-used monorail crane locomotive; positioning; strapdown inertial navigation; nine-axis inertial measurement unit; gravity component; integral ranging; acceleration sensor

0 引言

单轨吊机车是煤矿井下用来运送材料、设备和人员的先进辅助运输设备。与传统的辅助运输方式相比,单轨吊机车具有运输效率高、坡度大、不受巷道地面影响等特点。尽管这种运输方式优点突出,但其定位方式落后,目前仍以定位精度较低的射频识别(Radio Frequency Identification,RFID)定位和接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication,RSSI)定位为主,难以满足工业应用需求。据 2013—2017 年我国煤矿事故统计,运输事故数占煤矿事故总数的 17.48%,运输事故死亡人数占煤矿事故总死亡人数的 10.85%^[1],这与矿井辅助运输机车无法精确定位有直接关系。此外,在不确定机车位置的情况下,无法实现机车的统一调度,会出现多辆单轨吊机车拥堵的情况,运输效率较低。因此,开发单轨吊机车高精度定位系统具有重要的现实意义。

目前,应用于煤矿井下的定位技术有 RFID、RSSI、超宽带(Ultra Wide Band,UWB)、捷联惯性导航等定位技术。文献[2]设计了一种基于 RFID 和 ZigBee 技术的矿井机车精确定位系统,该系统通过 RFID 技术实现位置的更新,以 ZigBee 技术实现数据的传输,电子标签密度越高,定位精度越高,但这会导致成本上升。文献[3]设计了一种基于 ZigBee 的钨矿井下矿车定位监测系统,该系统利用 RSSI 测距模型和加权质心定位算法实现了矿车定位,与极大似然估计算法相比,定位精度较高,但该系统需要较多的参考节点,定位成本高。文献[4]提出了一种基于 RSSI 的矿山井下机车定位算法,利用最小二乘法 and chan 算法实现机车的定位,最小定位误差为 0.4 m,但该方法也需要较多参考节点才能实现精确定位,定位成本高。文献[5]设计了一种基于 UWB 的矿井机车定位系统,该系统利用 UWB 技术和到达时间差(Time Difference of Arrival,TDOA)定位算法实现机车定位,定位精度达 10 cm,但该系统在实现某一区域的定位时,需要 1 台同步控制器和多台定位基站,成本较高。文献[6]设计了基于惯性导航的煤矿移动车辆定位系统,该系统采

用六轴惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)实现对车辆的定位,然而,六轴 IMU 解算出的航向角误差较大,难以对机车进行长期、准确的定位。

针对以上定位方法存在的问题,本文提出了一种基于捷联惯性导航的矿用单轨吊机车定位算法,该算法不仅提高了单轨吊机车的定位精度,而且降低了定位成本。

1 定位流程

捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System,SINS)是一个将 IMU 固定于载体上的独立定位系统^[7],已广泛应用于需要定位的各种工程领域^[8]。基于 SINS 的矿用单轨吊机车定位流程如图 1 所示。

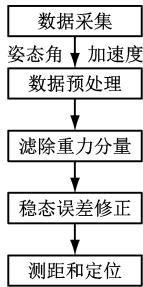


图 1 基于 SINS 的矿用单轨吊机车定位流程

Fig. 1 Positioning process of mine-used monorail crane locomotive based on SINS

利用九轴 IMU(包括三轴加速度传感器、三轴陀螺仪、三轴磁力计)采集机车数据,解算并输出姿态角和加速度值。为了滤除加速度数据中的确定性误差和尖峰噪声,需对其进行预处理。由于加速度数据中含有重力分量,当机车在斜坡上行驶时该分量会对测距造成巨大干扰,因而采用方向余弦矩阵法滤除该分量。在积分测距的过程中,通过加速度变化率阈值法和零速修正法修正稳态误差,根据机车测距结果和初始位置实现定位。

2 数据采集与预处理

2.1 数据采集

采用 WT931 模块采集数据,该模块集成了高精度的微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System,MEMS)加速度计、陀螺仪、磁力计,可分别

采集机车的三轴加速度、三轴角速度、三轴磁场强度数据。对加速度积分可以得到机车的行驶距离。以加速度、角速度、磁场强度数据为基础,利用卡尔曼滤波算法可以精准地输出机车的实时姿态角。

2.2 数据预处理

尽管MEMS加速度传感器具有体积小、质量小、功耗低、成本低、易集成等优点^[9],但其采集到的加速度数据中仍存在误差和噪声,所以,必须对加速度数据进行预处理。

MEMS加速度传感器采集到的加速度数据中的误差和噪声主要包括确定性误差、随机误差、尖峰噪声等^[10]。误差模型为

$$a = a_0 + Ka_r + R + P \tag{1}$$

式中: a 为加速度测量值; a_0 为零偏; K 为刻度因数; a_r 为加速度理论值; R 为随机噪声; P 为尖峰噪声。

WT931模块中集成了高精度的BMI160六轴传感器,该传感器可输出高精度的三轴加速度和三轴角速度数据,加速度中所含的随机噪声很小,因此,可不考虑其影响。零偏、刻度因数、尖峰噪声均会对加速度测量值造成较大干扰。本文分别采用均值法和限幅滤波法滤除零偏和尖峰噪声,采用翻滚法计算刻度因数。

2.2.1 零偏滤除方法

零偏是指加速度传感器输入为0时的输出量,它是由加速度传感器本身的制作工艺引起的误差。对于零偏,可采用均值法滤除。以Y轴为例,首先将WT931模块置于水平台上(Y轴平行于台面),连续采集2 000个加速度数据并求出均值 a_{av} ,此后,用采集到的加速度数据减去 a_{av} 即可滤除零偏^[11]。

2.2.2 尖峰噪声滤除方法

尖峰噪声是由传感器本身的技术问题引起的,它具有幅值大、持续时间短等特点。本文根据限幅滤波的思想来滤除尖峰噪声。已知加速度传感器的量程为 $\pm 2g(g=9.8\text{ m/s}^2)$,假设相邻2次采样值为 a_{n-1} 和 a_n ,如果 a_n 的绝对值超过了 $2g$,则令 a_n 等于前一时刻的值 a_{n-1} ;如果 a_n 的绝对值小于或等于 $2g$,则不对 a_n 进行处理^[12]。

$$a_n = \begin{cases} a_{n-1} & |a_n| > 2g \\ a_n & |a_n| \leq 2g \end{cases} \tag{2}$$

式中 a_n 为 n 时刻的加速度。

2.2.3 刻度因数计算方法

刻度因数是指加速度传感器输出量与输入量之比。由于MEMS加速度传感器的折叠梁加工尺寸不一致和微机械结构质心偏离平衡位置等原因^[13],刻度因数为未知的常数。本文根据12位置重力翻

滚法的思想,采用翻滚法来求取刻度因数。

以Y轴为例,将WT931模块置于水平台上,将Y轴与水平面的夹角依次调整至 90° 和 -90° ,待数据稳定后分别采集2 000个Y轴加速度数据并求取均值 a_{Y1} 和 a_{Y2} ,根据均值可以求出刻度因数,计算公式为

$$K_Y = (|a_{Y1}| + |a_{Y2}|)/2g \tag{3}$$

式中 K_Y 为Y轴的刻度因数。

3 重力分量滤除方法

惯性模块WT931中的加速度传感器既能检测到静态加速度(重力加速度),又能检测到动态加速度(运动加速度)^[14]。当单轨吊机车在斜坡上运动时,重力加速度(即重力分量)的存在会对运动加速度产生干扰,这会严重影响单轨吊机车的定位精度。因此,本文采用方向余弦矩阵法滤除重力分量。

设方向余弦矩阵为 C , C 为3阶方阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \tag{4}$$

设机车所在的坐标系为载体坐标系 $OX_bY_bZ_b(b\text{系})$,用于定位的坐标系为导航坐标系 $OX_nY_nZ_n(n\text{系})$,导航坐标系的方向为东北天,分别对应XYZ轴^[15-16]。从导航坐标系到载体坐标系可视为3个有序的旋转过程,每个旋转过程用绕单轴旋转的余弦矩阵来表示^[17]。

绕X轴旋转 α (俯仰角)得到的余弦矩阵为

$$C_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \tag{5}$$

绕Y轴旋转 γ (横滚角)得到的余弦矩阵为

$$C_Y = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \tag{6}$$

绕Z轴旋转 θ (航向角)得到的余弦矩阵为

$$C_Z = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

假定从导航坐标系到载体坐标系依次绕Z,X,Y轴旋转,相应的姿态矩阵为

$$C_n^b = C_Y C_X C_Z \tag{8}$$

由此可得出重力加速度在载体坐标系各轴上的分量为

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} = C_Y C_X C_Z \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \tag{9}$$

用采集到的加速度值减去重力加速度在载体坐标系各轴上的分量 g_x, g_y, g_z , 即可滤除重力分量。

4 稳态误差修正算法与测距算法

稳态误差修正算法包括稳态加速度误差修正算法和稳态速度误差修正算法, 测距算法包括 Lagrange 插值多项式测距算法和测距结果定时修正算法, 这 2 部分算法对定位精度起决定性作用。

4.1 稳态误差修正算法

4.1.1 稳态加速度误差修正算法

由于 MEMS 加速度传感器的精度有限, 当其静止或匀速运动时的加速度值总在 0 附近小幅波动, 即存在稳态加速度误差。通过分析数据发现, 传感器处于静止与变速运动时的加速度变化率幅值有较大差异, 因此, 本文提出了加速度变化率阈值法, 用以修正此误差。

设 $a_1, a_2, \dots, a_{10}$ 为连续 10 个加速度值, u 为这 10 个数据的均值, T 为采样周期。以 10 个数据为 1 组, 用组内相邻 2 个数据求出 1 个加速度变化率并取绝对值, 由此可得: $b_1 = |(a_2 - a_1)|/T, b_2 = |(a_3 - a_2)|/T, \dots, b_9 = |(a_{10} - a_9)|/T$ 。用 d 表示 9 个数据中大于 w (w 为经验值, 此处取 0.1 m/s^3) 的个数, d 最大为 9。如果 $d < 8$ 且 $|u| < 0.25 \text{ m/s}^2$, 则将这 10 个数据置 0; 否则, 对其不做任何处理^[18]。

加速度修正前后曲线比较如图 2 所示。从图 2 可看出, 在 15~20 s, 加速度修正前, 机车几乎是减速运动, 而此时机车实际是近似匀速运动; 修正后的加速度始终为 0, 修正了稳态加速度误差。

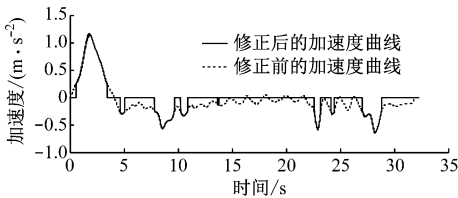


图 2 加速度修正前后曲线比较

Fig. 2 Comparison of curves before and after acceleration correction

4.1.2 稳态速度误差修正算法

机车的速度由加速度积分得来, 因此, 机车在行驶过程中的加速度误差会导致其停车时的速度不为 0^[19], 即存在稳态速度误差。根据停车时的特点, 本文提出零速修正法修正稳态速度误差。

设 a_n 为 n 时刻的加速度, v_n 为 n 时刻的速度, $n=0, 1, \dots, v_{co}$ 为一个速度常数 (此处取 0.005 m/s)。如果 $v_n \leq v_{co}$ 且 a_n, a_{n-1}, a_{n-2} 均小于 0, 则令 $v_n = 0$, 否则不对 v_n 做处理^[20]。

机车运行时要经历静止、变速运动、静止 3 个阶

段。无零速修正与有零速修正时的速度变化曲线分别如图 3、图 4 所示。

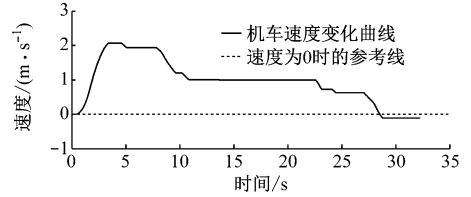


图 3 无零速修正时的速度变化曲线

Fig. 3 Velocity variation curves without zero speed correction

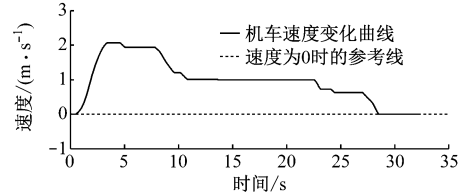


图 4 有零速修正时的速度变化曲线

Fig. 4 Velocity variation curves with zero speed correction

由图 3 和图 4 可知, 无零速修正时, 停车时的速度为负值, 无法正确反映机车的运动状态; 有零速修正时, 停车时的速度为 0, 可正确反映机车的运动状态。

4.2 测距算法

4.2.1 Lagrange 插值多项式测距算法

测距算法是实现准确定位的核心, 它的优劣将直接导致累计误差的产生, 因此, 本文基于 Lagrange 插值多项式测距算法^[21], 提出了含有 4 个插值节点的 Lagrange 插值多项式测距算法。

设 4 个插值节点分别为 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, 对应的插值多项式如下:

$$f(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)}y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)(x_2-x_3)}y_2 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_0)(x_3-x_1)(x_3-x_2)}y_3 \quad (10)$$

在计算机车速度时, 相应插值节点分别为 $(0, a_0), (T, a_1), (2T, a_2), (3T, a_3)$, a_0-a_3 为按时间顺序采集到的 4 个加速度, a_3 为当前时刻的加速度。将这 4 个插值节点代入 $f(x)$ 中, 得到函数 $A(x)$, 对 $A(x)$ 进行积分即可计算出机车速度。

$$v_{no} = v_{la} + \int_0^T A(x) dx \quad (11)$$

式中: v_{no} 为当前时刻机车速度; v_{la} 为上一时刻机车速度。

在计算机车行驶距离时,相应的插值节点分别为 $(0, v_0), (T, v_1), (2T, v_2), (3T, v_3)$, v_0-v_3 为按时间顺序求得的4个速度, v_3 为当前时刻的速度。将这4个插值节点代入 $f(x)$ 中,得到函数 $V(x)$ 。对 $V(x)$ 进行积分即可计算出机车的行驶距离。

$$h_{no} = h_{la} + \int_0^T V(x)dx$$

(12)

式中: h_{no} 为当前时刻的行驶距离; h_{la} 为上一时刻的行驶距离。

4.2.2 测距结果定时修正算法

为了提高测距精度,防止测距时出现过大的误差,提出测距结果定时修正法来修正测距误差。因为单轨吊机车的行驶速度通常为1~2 m/s,所以可通过实验数据对其在给定时间内的测距结果进行估计。如果给定时间内的测距结果与其估计值的差的绝对值大于阈值 h_{th} (h_{th} 为常数,此处取0.8 m),则可将测距结果修正为估计值,否则保持原测距结果。

$$\Delta H = \begin{cases} \Delta h_{es} & |\Delta H - \Delta h_{es}| > h_{th} \\ \Delta H & |\Delta H - \Delta h_{es}| \leq h_{th} \end{cases}$$

(13)

式中: ΔH 为给定时间内的测距结果; Δh_{es} 为给定时间内的测距结果估计值。

5 测距实验

为了验证定位算法的准确性,以WT931模块和汽车为实验平台,将WT931模块安装于汽车上用于采集运行数据,以汽车在平坦路面的行驶来模拟单轨吊机车在平直轨道上的行驶。

5.1 实验方案

由于单轨吊机车的最大行驶速度约为2 m/s,所以,本实验将汽车的最高速度控制在2 m/s左右;加速度传感器采样频率设为200 Hz;行驶路线为30.8 m的直线路段,汽车经历静止、变速运动、静止3个阶段。实验现场如图5所示。反复实验10次,实时采集加速度数据,利用Matlab软件计算测距结果。



图5 实验现场
Fig.5 Experimental site

5.2 测距结果及分析

将10次实验测距结果进行统计并计算出相应的测距误差,结果见表1。由表1可知,有4次测距误差范围为0.1~1.3 m;4次测距误差范围为

12.3~16.7 m;有2次测距误差分别为3.90 m和8.60 m,误差波动范围较大。

表1 测距结果
Table 1 Ranging results

实验次数	测距结果/m	误差/m	实验次数	测距结果/m	误差/m
1	31.22	0.42	6	45.10	14.30
2	18.00	12.80	7	34.70	3.90
3	47.50	16.70	8	18.50	12.30
4	39.40	8.60	9	30.70	0.10
5	31.54	0.74	10	29.50	1.30

5.3 测距结果定时修正

为了提高测距精度,采用测距结果定时修正法修正测距误差。通过分析大量实验数据发现,当给定时间为27.5 s时,机车行驶距离约为30 m,因此设 $\Delta h_{es}=30$ m,以此为基础,应用测距结果定时修正法对表1中的测距结果进行修正,结果见表2。

表2 修正后的测距结果
Table 2 Corrected ranging results

实验次数	测距结果/m	误差/m	实验次数	测距结果/m	误差/m
1	—	—	6	30.97	0.17
2	—	—	7	30.24	0.56
3	30.19	0.61	8	30.25	0.55
4	35.26	4.46	9	30.70	0.10
5	30.15	0.65	10	30.30	0.50

由于表2中前2次实验测距时间小于27.5 s,所以,不对其进行修正。第4次测距误差较大,为4.46 m,这是由汽车急停导致的。其余7次测距误差范围为0.10~0.65 m。与现有的定位方法相比,该算法不仅有较高的定位精度,而且定位成本较低。

6 结论

- (1) 利用加速度变化率阈值法对稳态加速度误差进行修正,提高了加速度数据的准确性。
- (2) 测距结果定时修正法可以补偿大量测距误差,提高测距精度与定位精度。
- (3) 实验结果表明,当汽车行程为30.8 m时,测距误差基本在0.65 m以内,占总行程的2%,定位精度较高。
- (4) 算法未对机车急停时带来的加速度误差进行分析,在后续工作中,将着重对其进行分析与研究。

参考文献(References):

[1] 蒋星星,李春香. 2013—2017 年全国煤矿事故统计分析 & 对策[J]. 煤炭工程,2019,51(1):101-105.
JIANG Xingxing, LI Chunxiang. Statistical analysis on coal mine accidents in China from 2013 to 2017 and discussion on the countermeasures [J]. Coal Engineering,2019,51(1):101-105.

[2] 杨勇,王方杰,周思维. 基于 RFID 和 ZigBee 技术的矿井机车定位系统设计[J]. 煤炭技术,2017,36(1):245-247.
YANG Yong, WANG Fangjie, ZHOU Siwei. Design of mine locomotive positioning system based on RFID and ZigBee technology [J]. Coal Technology,2017,36(1):245-247.

[3] 何学文,曹清梅,樊宽刚. 基于 ZigBee 的钨矿井下矿车定位监测系统研究与设计[J]. 金属矿山,2015,44(2):127-132.
HE Xuewen, CAO Qingmei, FAN Kuangang. Research and design of underground tramcar positioning and monitoring system in tungsten mine based on ZigBee [J]. Metal Mine,2015,44(2):127-132.

[4] 朱泽朋,王凯,岳雨俭. 基于 RSSI 的矿山井下机车定位算法的改进[J]. 计算机与数字工程,2015,43(4):554-557.
ZHU Zepeng, WANG Kai, YUE Yujian. Improved location algorithm of underground mine locomotive based on RSSI[J]. Computer & Digital Engineering,2015,43(4):554-557.

[5] 张麦玲,吴延昌. 基于超宽带的矿井机车定位系统设计[J]. 煤矿机械,2015,36(8):21-23.
ZHANG Mailing, WU Yanchang. Design of mine locomotive positioning system based on ultra-wideband technology[J]. Coal Mine Machinery,2015,36(8):21-23.

[6] 王玮,吕攀,王琪,等. 惯性导航下煤矿移动车辆动态定位研究[J]. 煤炭工程,2016,48(10):138-141.
WANG Wei, LYU Pan, WANG Qi, et al. Research on dynamic positioning of mobile vehicle in underground coal mine based on inertial navigation [J]. Coal Engineering,2016,48(10):138-141.

[7] CHANG Lubin, LI Jingshu, CHEN Shengyong. Initial alignment by attitude estimation for strapdown inertial navigation systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2015,64(3):784-794.

[8] 程向红,赵莹,田芸. 一种自适应 H_{∞} 滤波的运动学约束惯性导航方法[J]. 中国惯性技术学报,2019,27(3):295-300.
CHENG Xianghong, ZHAO Ying, TIAN Yun. An adaptive H_{∞} filtering approach for inertial navigation with motion constrained [J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2019,27(3):295-300.

[9] 燕斌. MEMS 加速度传感器在矿用随钻轨迹测量系统中的误差校正[J]. 煤田地质与勘探,2017,45(4):144-148.
YAN Bin. Error correction of MEMS acceleration sensor used for trajectory measurement while drilling system [J]. Coal Geology & Exploration,2017,45(4):144-148.

[10] 于学鑫. 基于 MPU6050 的微小型无人机 AHRS 设计研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2016.
YU Xuexin. Research on design of MUAV's AHRS based on MPU6050 [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology,2016.

[11] 韩盈党,李哲. MEMS 加速度传感器的数据采集和预处理[J]. 仪表技术与传感器,2015(2):16-19.
HAN Yingdang, LI Zhe. Data acquisition and pre-processing based on MEMS accelerometer [J]. Instrument Technique and Sensor,2015(2):16-19.

[12] 刘琪芳. 单片机测控系统的数字滤波算法研究[J]. 机械工程与自动化,2011(3):165-166.
LIU Qifang. Algorithms of digital filter in SCM control system [J]. Mechanical Engineering & Automation,2011(3):165-166.

[13] 杨庆江,李国庆. 低精度 MEMS IMU 的标定方法及误差分析[J]. 自动化与仪器仪表,2018(10):153-157.
YANG Qingjiang, LI Guoqing. MEMS IMU error analysis and calibration method [J]. Automation & Instrumentation,2018(10):153-157.

[14] 都悦来,史丽萍,李桂英,等. 基于加速度计和弯曲传感器的手指运动姿态监测[J]. 纳米技术与精密工程,2017,15(1):61-66.
DU Yuelai, SHI Liping, LI Guiying, et al. Finger motion monitoring based on accelerometer and flex sensor [J]. Nanotechnology and Precision Engineering,2017,15(1):61-66.

[15] 李森. 基于惯性导航的工作面直线度测控与定位技术[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):169-174.
LI Sen. Measurement & control and localisation for fully-mechanized working face alignment based on inertial navigation[J]. Coal Science and Technology,2019,47(8):169-174.

[16] 郝尚清,李昂,王世博,等. 采煤机惯性导航安装偏差对定位误差的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1963-1968.
HAO Shangqing, LI Ang, WANG Shibo, et al. Effects

- of shearer inertial navigation installation noncoincidence on shearer positioning error [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (8): 1963-1968.
- [17] 王嘉骏,杨录,张元军. 基于 MPU-6050 运动传感器的惯性导航定位系统[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18):253-257.
WANG Jiajun, YANG Lu, ZHANG Yuanjun. Inertial navigation and positioning system based on MPU-6050 motion sensor [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18):253-257.
- [18] ZHANG Ruixiao, LIU Xiaodong, QU Zhiyi. The research of distance measurement method based on mobile phone MEMS accelerometer [C]// International Conference on Intelligent Human-machine Systems & Cybernetics, 2016.
- [19] 张健敏,修春娣,杨威,等. 一种多运动模式下自适应阈值零速修正算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3):636-644.
ZHANG Jianmin, XIU Chundi, YANG Wei, et al. Adaptive threshold zero-velocity update algorithm under multi-movement patterns[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3):636-644.
- [20] 徐旭,何昆鹏,张琳. 在水池中精确测量潜器模型运动参数方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(7): 1010-1015.
XU Xu, HE Kunpeng, ZHANG Lin. Method for accurately measuring motion parameters of underwater vehicle model in a pool [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41 (7): 1010-1015.
- [21] 王剑,王璋奇. 振动加速度数值积分的 Lagrange 多项式拟合方法[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(6): 191-196.
WANG Jian, WANG Zhangqi. Lagrange polynomial fitting method for numerical integration of the vibration acceleration [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(6):191-196.