

荆瑞俊, 冯晨钟, 李昕. 基于多传感器数据融合的煤机行进监测系统[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 189–193. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241027

基于多传感器数据融合的煤机行进监测系统

荆瑞俊¹, 冯晨钟², 李昕³

(1 山西农业大学 软件学院, 山西 太谷 030801; 2 兰州大学 信息科学与工程学院, 兰州 730000;

3 北京龙田华远有限责任公司, 北京 100000)

摘要: 综采工作面作为煤矿生产的核心环节,其智能化水平直接关系到整个煤矿的安全生产和经济效益。采煤机定位及运动轨迹对工作面自动对齐调直具有重要意义,本文描述了一种基于多传感器融合的煤机行进轨迹监测系统。本系统将惯导和倾角传感器采集数据进行融合并通过双圆弧样条曲线拟合技术,实现煤机顶底运动曲线绘制;采用粒子滤波算法对惯导与编码器的数据融合实现对采煤机行进定位及曲线绘制;在阳煤集团新大地煤矿的15404工作面进行了实验验证。实验数据清晰地展示了融合系统如何有效地缓解了因时间延长而导致的惯性导航误差累积问题。系统绘制的采煤机行进曲线与采煤机实际工作曲线基本吻合,满足使用要求。为控制采煤机的运行和优化煤矿生产提供了技术支撑,具有重要的实际应用价值。

关键词: 粒子滤波; 煤机行进轨迹; 多传感器融合

中图分类号: TP18

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0189-05

Coal shearer progress monitoring system based on multi-sensor data fusion

JING Ruijun¹, FENG Chenzhong², LI Xin³

(1 School of Software, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China;

2 School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3 Beijing Longtian Huayuan Limited Liability Company, Beijing 100000, China)

Abstract: As the core segment of coal mining production, the level of intelligence in the fully mechanized mining face is directly related to the overall safety production and economic benefits of the coal mine. The positioning and motion trajectory of the coal shearer are crucial for the automatic alignment and straightening of the working face. This paper proposes a coal shearer progress trajectory monitoring system based on multi-sensor fusion. The system acquires the shearer arm height and generates the top and bottom curves of the shearer in the coal seam through the fusion of an Inertial Navigation System (INS) and an inclination sensor, as well as the bi-arc spline curve fitting method. The particle filter algorithm is used to fuse data from the INS and encoder to achieve shearer progress positioning and curve plotting. Experiments are conducted at the 15404 working face of the New Earth Coal Mine of the Yangmei Group. The results indicate that the fusion positioning accuracy is higher than that of the standalone INS positioning accuracy, overcoming the problem of cumulative inertial navigation error over time. The shearer progress curve plotted by the system closely matches the actual working curve of the shearer, meeting usage requirements. The implementation of the system provides technical support for controlling shearer operation and optimizing coal mine production, offering significant practical application value.

Key words: particle filter; coal shearer progress trajectory; multi-sensor fusion

0 引言

综采面智能化对煤炭安全开采具有重要作用,其智能化水平的提升可以改善煤矿生产条件、减轻劳动强度、降低成本,继而提高生产效率^[1-2]。采煤

机定位技术是实现综采工作面科技赋能的关键技术之一^[3-4]。传统生产活动中,由于缺少高精度监测设备,采煤机的行走轨迹难以实现精准定位^[5]。

捷联惯导系统能够提供连续的、不受外部环境影响的定位信息等优势满足了采煤机定位的需求。

基金项目: 国家自然科学基金(31570436); 山西农业大学青年创新基金(2020QC11)。

作者简介: 荆瑞俊(1987-),男,博士研究生,主要研究方向:数据挖掘,嵌入式设备开发等;冯晨钟(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:机器人技术;李昕(1978-),男,博士,主要研究方向:数据融合技术。

收稿日期: 2023-07-24

这种监测技术使得工作中能够精确地确定采煤机的位置和姿态,并生成其行进轨迹^[6];采煤机自身装配的惯导系统与编码器结合输出采煤机位置数据,借由 CAN 网传输至顺槽主控计算机运算生成采煤机区间行走轨迹^[7]。捷联惯导系统的误差随时间增长而累积,限制了其在长时间作业中的定位精度。融合捷联惯导系统与其他传感器数据可以有效补偿捷联惯导的累积误差,液压支柱可以作为参考物,利用编码器和无线定位进行基于 KALMAN 滤波的惯导传感器数据融合^[8-9];借助采煤机装配的倾斜仪及惯导系统,实现了采煤机摇臂高度的实时计算^[10]。

上述研究虽然取得了一定研究成果,但仍面临

环境干扰、算法鲁棒性低、煤机行进轨迹监测单一等缺点,本文提出基于多传感器融合的煤机行进轨迹监测系统,通过高精度惯导、倾角传感器等,可对其煤机及滚筒进行定位,从而获得了煤机及割煤顶底运行轨迹。

1 采煤机摇臂曲线绘制

为了便于实现摇臂曲线绘制,由惯导输出姿态角数据,并计算其捷联矩阵,通过坐标系变换方式将数据的坐标系转换至地理坐标下^[11]。绘制采煤机运行过程中顶底曲线需要实时得到滚筒至行走槽的相对高度值,即图 1 中的 H 。

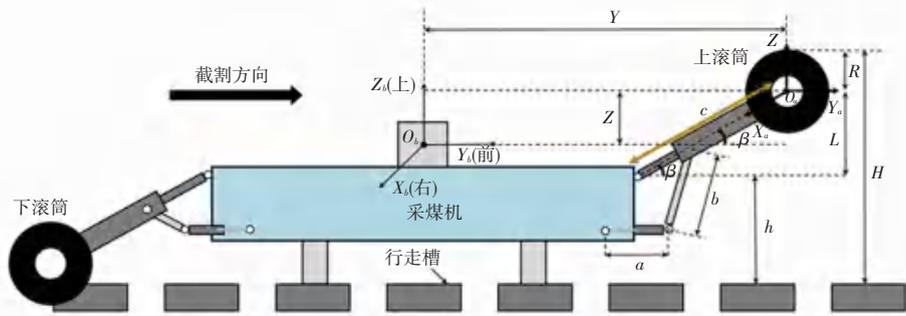


图 1 传感器与采煤机相对位置关系图

Fig. 1 Diagram of the relative positions of sensors to the coal mining machine

由图 1 可看到,测试摇臂相对于采煤机机身 X_b 轴的俯仰角度 β ,由倾角传感器给出。

绘制顶底曲线,需要实时计算距离 H ,由图 1 几何关系可知:

$$H = h + L + R \quad (1)$$

$$L = c \cdot \sin \beta \quad (2)$$

其中, R 表示滚筒半径(已知量); h 表示 C 点至行走槽垂直距离(测量获得,已知量); c 表示摇臂长度(已知量)。式(1)中,假设采煤机所在工作面是严

格水平状态,而实际工作面在采煤机载体坐标系中的 X_b 和 Y_b 两个轴向都有一定的倾角,如图 2 所示,沿 X_b 轴为俯仰角 θ ,沿 Y_b 轴定为横滚角 γ ,2 个角度对高度模型产生影响。若工作面向下倾斜,则补偿后的 H 为:

$$H = H - R \cdot \cos(\theta) \quad (3)$$

若工作面向上倾斜,补偿公式类似,但方向相反。

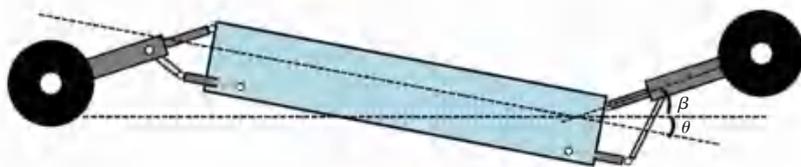


图 2 采煤机倾斜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coal mining machine tilt

机滚筒截深 C ,从综合采煤面的入口开始,按照采煤机滚筒的截深长度,将预设的煤层模型沿工作面向前进方向切割成 n 片,用 $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示。由此可以推断,在每个特定的切片 S_i 煤层的顶板和底

板曲线分布可以通过函数 $R(x)$ 和 $D(x)$ 表示^[12]。割煤曲线切片模型如图 3 所示。采煤机上部滚筒的采煤路径的离散点位将按照下式进行计算:

$$P(x_{ij}) = R(x_{ij}), x_{i0} \leq x_{ij} \leq x_{im}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

那么下滚筒曲线离散点坐标可表示如下:

$$Q(x_{ij}) = D(x_{ij}), x_{i0} \leq x_{ij} \leq x_{im}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

其中, x_{i0} 表示切片 S_i 起点的横坐标, x_{im} 表示切片 S_i 终点的横坐标。

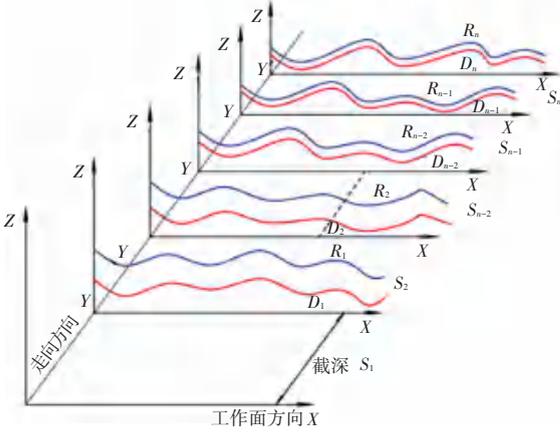


图 3 割煤曲线切片模型

Fig. 3 Coal cutting curve slicing model

输出切片 S_i 采煤路径上的所有散点输出,接着应用双圆弧样条曲线函数^[13]对上下方的采煤路径散点进行拟合,以此生成的曲线即为预定的采煤轨迹。曲线绘制示意如图 4 所示。

每个区段的起始点紧接前一区段的终点,这一过程从工作面的起始线开始,连续进行直至达到设定的停采线,确保所有预定的区段都被依次处理。

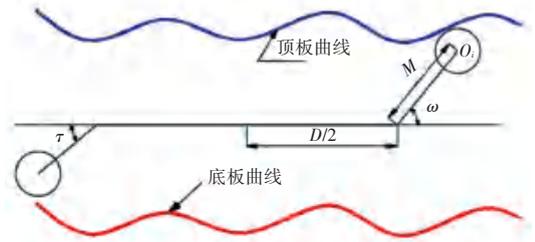


图 4 曲线绘制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of curve plotting

2 基于粒子滤波传感器融合煤机定位系统

2.1 粒子滤波算法

惯导系统能够自主、实时地输出精确的导航参数(位置、姿态、速度),引导载车行驶,但由于纯惯性导航状态下惯导的位置误差随时间累积严重,所以实际使用中一般采用组合导航方式来解决这个问题^[14-15]。粒子滤波(Particle Filtering)适用于处理那些具有非线性状态空间和观测方程的系统^[16]。本文采用粒子滤波算法对捷联惯导与编码器的数据融合来实现对采煤机行进定位及曲线绘制^[17-19]。

采煤机位置坐标计算^[20]采用绝对式轴编码器作为辅助传感器进行与惯导系统的组合导航,编码器安装于采煤机机身的传动机构中,需要通过井下标定给出每圈对应的距离,系统中编码器与采煤机相对安装位置如图 5 所示。

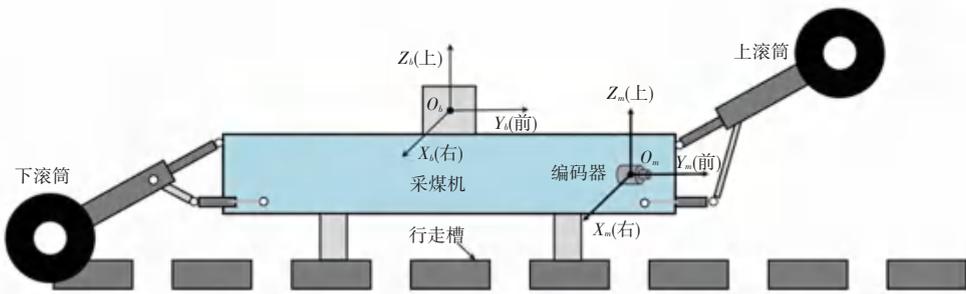


图 5 惯导与编码器安装位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the IMU and encoder installation positions

假设状态空间 Q , 状态向量为 q_k , 其包含位置、速度、姿态等信息,数学表示具体如下:

$$q_k = [x_k, y_k, \theta_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{\theta}_k] \quad (6)$$

观测空间 Z , 观测向量 z_k , 由轴向编码器输出的数据组成。

初始化一组粒子 q_{0i}^i , 每一个粒子表示了初始状态的一种可能的状态值,以及其权重 $w_{0i}^i = \frac{1}{N}$, 其

中 N 是粒子的总数。

系统模型为:

$$q_{k+1} = f(q_k, u_k, \varepsilon_k) \quad (7)$$

其中, u_k 表示输入控制变量, ε_k 表示过程噪声。观测模型为:

$$z_k = h(q_k, v_k) \quad (8)$$

其中, v_k 表示观测噪声。

在预测阶段,通过系统模型预测下一代粒子:

$$q_{k+1k}^i = f(q_{klk}^i, u_k, \varepsilon_k^i) \quad (9)$$

计算每个粒子的权重:

$$w_{k+1k}^i = \frac{1}{N} \quad (10)$$

权重更新时,根据观测数据调整粒子的权重:

$$w_{k+1k+1}^i = \frac{1}{N} \frac{p(z_{k+1} | q_{k+1k}^i)}{P(z_{k+1} | q_{k+1k}^i)} \quad (11)$$

其中, $p(z_{k+1} | q_{k+1k}^i)$ 表示观测的似然函数,通过观测模型计算。

由于粒子的权重差异较大,需要进行重采样避免权重退化的问题,本文的重采样通过随机选择高权重粒子,低权重的粒子丢弃的原则实现。

状态估计时,通过对粒子进行加权平均方式实现,研究推得的公式如下:

$$\hat{q}_{k+1k+1}^i = \sum_{i=1}^N w_{k+1k+1}^i q_{k+1k+1}^i \quad (12)$$

在每个时间步 k , 重复执行预测与更新,实现对

采煤机的定位。

2.2 算法的仿真实验

为了模拟算法的有效性,对采煤机行进状态进行理想化处理,在 Matlab 2012B (Window11 操作系统, i5-1340P 处理器, 内存 16 G) 软件上进行了仿真实验。假设上一刀割煤曲线为平行于工作面方向的一条直线,则根据端头和端尾进尺得到当前刀割煤曲线端头和端尾形成曲线的倾斜角度 α , 根据倾斜角度将当前刀割煤曲线旋转 α 角度,得到当前刀曲线绝对位置。仿真实验结果如图 6 所示。在图 6 中,横坐标表示液压支架架号,纵坐标表示进尺方向绝对距离值,黑色线 DE 表示上一刀形成的割煤线,蓝色表示惯导系统绘制的采煤机行进线。通过系统测量端头 D 以及端尾 E 的进尺距离 AD 以及 BE , 根据 2 个距离数据计算端头和端尾形成线的倾斜角度得到绿色线 AB , 将编码器数据融合进行矫正,得到红色惯导进尺优化线 AC 。

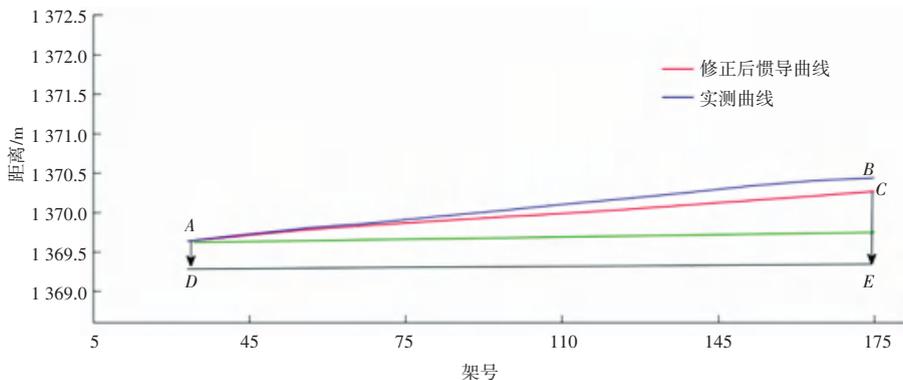


图 6 仿真实验结果

Fig. 6 Simulation experimental results

2.3 实验及分析

本系统实验在阳煤集团新大地煤矿 15404 工作面完成。采用 FOSN 光纤捷联惯导及艾柯夫绝对值编码器传感器。按照图 5 安装,并测量相对距离信息。

FOSN 光纤捷联惯导拥有超小体积 (178 mm × 184 mm × 229.5 mm), 重量 7.0 kg, 功率 20 W, 精度指标达到高精度标准, 偏置稳定性为 (1σ) 0.01 ~ 0.05 °/h, 宽测量范围为 ±600 °/s, 姿态角测量范围 ±90 °; 具有轻量化、低功率、高可靠性、长寿命等突出性能。艾柯夫绝对值编码器的最大分辨率为每转 8 192 步 (13 位), 多转版可以检测到 65 536 转 (16 Bit)。因此得到的最大分辨率是 29 比特。

通过计算机获取惯导、编码器、倾角传感的数据,并进行曲线绘制。表 1 为对定位数据计算的均

值、方差及均方根结果。从表 1 结果可以看出其融合定位精度比单纯的惯导定位精度高,可克服惯导定位误差随时间累积的缺点。

表 1 定位误差统计

Table 1 Positioning error statistics		m		
方向	方法	均值	方差	均方根
X	融合前	-0.117 9	0.653 3	0.104 4
	融合后	-0.002 0	0.102 6	0.041 4
Y	融合前	-0.028 4	0.036 8	0.024 8
	融合后	-0.000 4	0.009 3	0.012 5
Z	融合前	-0.031 3	0.020 5	0.018 5
	融合后	-0.000 5	0.010 3	0.013 1

图 7 是惯导原始曲线,图 8 为经过惯导与编码器后生成的采煤机行进曲线。由于每刀煤曲线的端头和端尾进尺方向距离值相等,实际运行曲线具有

一定斜率,图 7 满足了实际运行的规律。

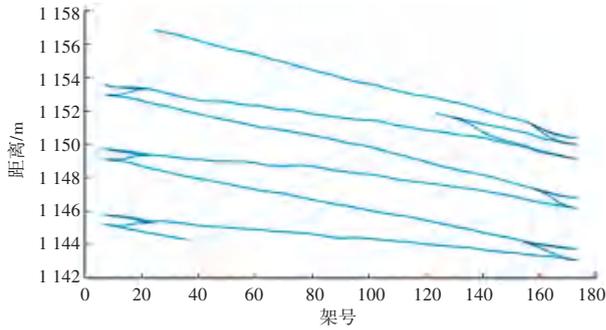


图 7 基于惯导的采煤机行进曲线

Fig. 7 Travel curve of inertial navigation-based coal mining machine

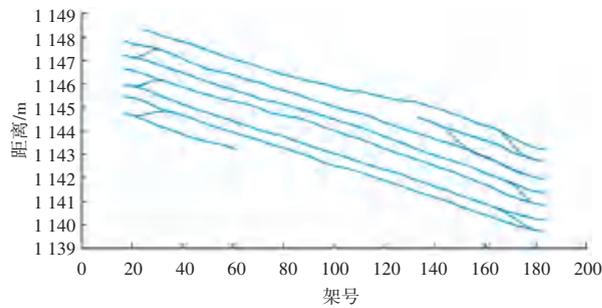


图 8 数据融合后采煤机行进曲线

Fig. 8 Travel curve of coal mining machine after data fusion

3 结束语

综采工作面作为煤矿生产的核心环节,其智能化水平直接关系到整个煤矿的安全生产和经济效益。采煤机定位及运动轨迹对工作面自动对齐调直具有重要意义,本文描述了一种基于多传感器融合的煤机行进轨迹监测系统。旨在解决煤矿作业中的核心问题,包括采煤机的定位、摇臂高度计算以及割煤顶底曲线绘制。详细讨论了多传感器融合定位算法,其中包括了惯导系统、编码器以及倾角传感器的协同工作。有助于有效降低采煤机的定位误差,提高了其定位的准确性。切割成多个切片及双圆弧拟合方法实现了获取采煤机摇臂高度及其机上下滚筒的割煤路线的实时绘制;采用粒子滤波算法对惯导与编码器的数据融合实现对采煤机行进定位及曲线绘制;仿真与实地实验显示,系统绘制的采煤机行进曲线与采煤机实际工作曲线基本吻合,满足了其使

用要求。本系统对采煤机行进曲线进行检测,为控制采煤机的运行和优化煤矿生产提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 牟元生. 浅谈煤矿采煤技术的发展与采煤自动化技术[J]. 工程管理与技术探讨, 2024, 6(11): 22-24.
- [2] 秦和平. 煤矿综采工作面智能化技术与装备发展研究[J]. 机械与电子控制工程, 2022, 4(5): 1-3.
- [3] 王海军, 曹云, 王洪磊. 煤矿智能化关键技术研究与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 44-54.
- [4] 罗开成, 常亚军, 高有进. 综采工作面智能开采关键技术实践[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 73-79.
- [5] 赵亦辉, 赵友军, 周展. 综采工作面采煤机智能化技术研究现状[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 11-18, 28.
- [6] 瞿圆媛, 宋林珂, 吉晓冬, 等. 井下掘进机行进纠偏调度规划与控制研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(2): 194-202.
- [7] 杜超恒. 基于惯导系统的综采工作面自动调直技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(23): 49-51.
- [8] 李文俊, 周展. 基于惯导系统的综采工作面自动调直技术[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(4): 130-133, 146.
- [9] 段淇超, 皇甫萍萍, 王宇倩, 等. 融合光流-惯导信息的无人机组合导航系统[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(7): 101-103.
- [10] 杨文萃. 基于多传感器数据融合的采煤机定位[J]. 硅谷, 2012(1): 37.
- [11] 韩超. 采煤机远程状态监控系统设计及应用[J]. 机械管理开发, 2023, 38(6): 191-193.
- [12] 张子悦, 符世琛, 刘超, 等. 基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 218-224.
- [13] 郑江涛, 李四海, 刘士明, 等. 基于惯导和激光雷达的采煤机定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(5): 595-602.
- [14] 董光昌, 梁友栋, 何援军. 样条曲线拟合与双圆弧逼近[J]. 应用数学学报, 1978, 1(4): 330-340.
- [15] 黄辉琼, 项辉宇, 孙九增. GPS 与 INS 组合的便携式轨道类游乐设施轨迹研究[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(2): 41-46, 52.
- [16] 李正龙. 捷联惯导与双目里程计融合的掘进机组合定位系统研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [17] 张彦超, 王晓丽, 苏奎. 一种增强型双种群粒子群算法的设计与实现[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(5): 194-198.
- [18] 孙玲莉, 杨超, 郭辉, 等. 基于粒子滤波的波叠加算法[J]. 智能计算机与应用, 2021, 11(3): 80-84.
- [19] 朱然, 马培军, 苏小红. 基于粒子滤波的行人跟踪研究及其性能分析[J]. 智能计算机与应用, 2011, 1(4): 14-19.
- [20] 邓旭, 赵连军, 郇静. 基于隐马尔可夫模型路径规划方法[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(6): 244-247.
- [21] 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.