

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于采煤机工作面端头量测的改进因子图高精度自主定位方法

许晓伟, 赖际舟, 吕品, 陆俊清, 白师宇, 胡华峰

引用本文:

许晓伟, 赖际舟, 吕品, 陆俊清, 白师宇, 胡华峰. 基于采煤机工作面端头量测的改进因子图高精度自主定位方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(8): 2170–2176.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0474>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 舰载机多雷达传感器任务分配与采样间隔融合优化算法

Optimization algorithm of task allocation and sampling interval fusion for multi radar sensors of carrier based aircraft  
*控制与决策*. 2022, 37(3): 565–573 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1282>

#### 柔性触觉传感技术及其在医疗康复机器人的应用

Flexible tactile sensing technology and its application in medical rehabilitation robots  
*控制与决策*. 2022, 37(6): 1409–1432 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1896>

#### 无人系统视觉SLAM技术发展现状简析

A survey of visual SLAM in unmanned systems  
*控制与决策*. 2021, 36(3): 513–522 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1149>

#### 基于反向学习的群居蜘蛛优化WSN节点定位算法

WSN node localization based on social spider optimization and opposition based learning  
*控制与决策*. 2021, 36(10): 2459–2466 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0258>

#### 基于超级节点的分布式传感器节点定位算法

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes  
*控制与决策*. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

# 基于采煤机工作面端头量测的 改进因子图高精度自主定位方法

许晓伟<sup>1</sup>, 赖际舟<sup>1†</sup>, 吕品<sup>1</sup>, 陆俊清<sup>2</sup>, 白师宇<sup>1</sup>, 胡华峰<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210096; 2. 湖北航天技术研究院总体设计所, 武汉 430040)

**摘要:** 采煤机的高精度定位是煤炭开采自动化和智能化的重要研究方向, 其中惯性导航系统和里程计是长壁综合机械化采煤机定位主要传感器之一. 通过两者的信息融合, 能够有效抑制惯性导航系统的发散并且具有较好的自主导航能力, 但是仍然无法满足井下长时间的高精度导航要求. 鉴于此, 分析目前常用辅助传感器在采煤机开采过程中存在的问题, 提出基于UWB采煤机工作面端头量测的改进因子图优化方法. 利用UWB在工作面端头的位置量测信息, 推导并构建惯导/里程计/UWB的约束方程和图优化模型. 同时通过惯性信息的预积分, 减少待优化的节点数量, 降低算法的计算量. 在此基础上, 加入里程计标度因数误差和安装误差的因子节点进行联合估计和优化. 最后通过仿真和实际跑车测试表明, 相较于传统卡尔曼滤波的采煤机定位方式, 所提出方法能够有效提高采煤机的定位精度.

**关键词:** 井下环境; 采煤机; 因子图; 信息融合; 高精度; 自主导航

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0474

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 许晓伟, 赖际舟, 吕品, 等. 基于采煤机工作面端头量测的改进因子图高精度自主定位方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 2170-2176.

## High-precision autonomous positioning method based on improved factor graph of measurements at both ends of shearer working face

XU Xiao-wei<sup>1</sup>, LAI Ji-zhou<sup>1†</sup>, LV Pin<sup>1</sup>, LU Jun-qing<sup>2</sup>, BAI Shi-yu<sup>1</sup>, HU Hua-feng<sup>2</sup>

(1. Collage of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210096, China; 2. Overall Design, Hubei Academy of Spaceflight Technology, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** High-precision positioning of a shearer is an important research direction of automation and intelligence in coal mining. The inertial navigation system and odometer are the main sensors for positioning of the longwall comprehensive mechanized shearer, which can effectively suppress the divergence of the inertial navigation system and has better autonomous navigation ability through information fusion. However, it still cannot meet the requirements of long-term and high-precision navigation. This paper analyzes the existing problems of auxiliary sensors in the mining process of shearer and puts forward an improved factor graph optimization method based on UWB measurement at both ends of the shearer working face. The constraint equation and graph optimization model of the inertial navigation system/odometer/UWB are derived and constructed by position measurement information of UWB. At the same time, through the pre-integration of inertial information, the number of nodes to be optimized is reduced, thereby reducing the calculation amount of the proposed algorithm. On this basis, the factor nodes of the odometer scale factor error and installation error are added for joint estimation and optimization. Finally, simulation and actual experiments are carried out. The results show that compared with the traditional Kalman filter, the proposed algorithm effectively improves the positioning accuracy of the shearer.

**Keywords:** underground environment; shearer; factor graph; information fusion; high-precision; autonomous navigation

## 0 引言

煤炭是主要的化石能源, 在世界能源结构中占有极其重要的位置. 但是由于井下环境恶劣, 为了保

证工作人员、设备的安全和开采精度, 煤炭开采的自动化与智能化成为目前的主要发展方向, 其中采煤机的高精度定位是采煤自动化的关键技术之一<sup>[1]</sup>. 采

收稿日期: 2021-03-21; 录用日期: 2021-07-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973160); 航空科学基金项目(2018ZC52037); 工信部民机专项项目(2018-S-36).

†通讯作者. E-mail: laijz@nuaa.edu.cn.

煤工作面通常由滚筒式采煤机、刮板输送机和液压支架组成,采煤机在与刮板输送机相连的轨道上来回移动,液压支架支撑煤层顶板从而保护设备和人员安全.在采煤机切割之后,将轨道向煤层推进,实现采煤机的往复割煤<sup>[2]</sup>.

由于井下无法使用卫星导航系统的定位信息,惯导系统能够适应井下恶劣的工作环境,具有稳定性好、短期精度高、自主性强等特点. Reid等<sup>[3]</sup>通过采煤机上安装的惯性导航系统获得采煤机工作面的走向和液压支架需要推进的距离,结合零速校正,提高了采煤机的定位精度. Yang等<sup>[4]</sup>在传统惯性导航的基础上,建立了双滚筒采煤机的动力学模型,并进行了受力分析,根据线性振动和角振动频谱特征对圆锥误差和划船误差进行补偿,提高了捷联惯导的计算精度. 由于惯导系统的定位机理导致误差随时间不断发散,里程计凭借长时间定位精度较高的优势,使惯导/里程计信息融合成为井下采煤机定位的常用导航方式. Wang等<sup>[5]</sup>利用惯导系统和里程计提供的位置、速度信息,通过信息滤波进行融合,相较于单一惯导系统,提高了采煤机的定位精度,但是井下里程计无法提供航向信息,并且定位误差仍会存在一定程度的发散.

为了进一步提高采煤机定位精度, Ralston等<sup>[6]</sup>较早提出了利用无线传感网络对井下移动设备进行定位,能够为采煤机提供较为准确的位置信息<sup>[7-8]</sup>. Fan等<sup>[9]</sup>在液压支架上安装UWB基站,在采煤机上安装标签,通过到达时间定位法对采煤机进行定位,有效减少了惯导系统的定位误差,但是安装在支架上的UWB基站会随着液压支架移动,并且移动距离难以被准确测量,导致定位误差的累积. 在采煤机开采过程中,工作面的环境相对于工作面两侧的巷道更为恶劣并且遮挡物较多,对无线信号的定位精度和可用性造成影响. 因此,澳大利亚联邦科学和工业研究组织通过激光扫描仪对工作面的起点和终点进行扫描,利用最小方差平滑法校正采煤机位置,有效提高了采煤机的定位精度,但该平滑方法存在难以对状态进行估计的弊端<sup>[10]</sup>.

信息融合方面,卡尔曼滤波是一种估计系统未知状态的常用算法,目前井下采煤机定位主要采用基于卡尔曼滤波框架的融合方式, Chen等<sup>[11]</sup>为了解决综采工作面复杂环境下捷联惯导的初始对准问题,分析了卡尔曼滤波以及不同的基于卡尔曼滤波的衍生算法,提出了多重衰落因子强序列跟踪卡尔曼滤波器,抑制了复杂环境下各状态之间的耦合,提高了滤波性

能. 尽管目前基于卡尔曼滤波的多源融合算法已经明显提高了载体的定位精度<sup>[12]</sup>,但是由于井下采煤机的特殊性,实际的定位过程面临工作时间和量测信息稀疏的问题,难以保证融合精度<sup>[13]</sup>. 因子图模型通过保留过去时刻的全部状态,在面对稀疏量测时,能够通过当前时刻的高精度量测信息与过去时刻之间的相对关系,实现导航信息的全局优化<sup>[14]</sup>.

综上,本文根据井下开采环境和采煤机的运动特性,在传统因子图架构的基础上,提出一种基于改进因子图的惯导/里程计/UWB的高精度自主定位方法. 本文创新点在于: 1) 利用采煤机搭载的惯导系统输出信息,通过力学编排方程推导相邻时刻速度、位置和姿态的相对约束; 2) 利用里程计的速度信息和巷道中UWB基站获取采煤机工作面两端高精度位置信息构建因子图模型,将里程计标定因数误差模型和安装误差模型加入到待优化状态中对采煤机的导航状态进行联合优化; 3) 根据井下采煤机UWB量测信息的稀疏特性,通过预积分方法提高系统的计算效率. 仿真和实验结果表明,所提出算法与传统井下定位算法相比,具有更高的自主定位精度.

## 1 综合机械化采煤机自主定位方案

综合机械化采煤是一种利用机械化和自动化设备进行采煤工作的过程,长壁采区的结构如图1所示.

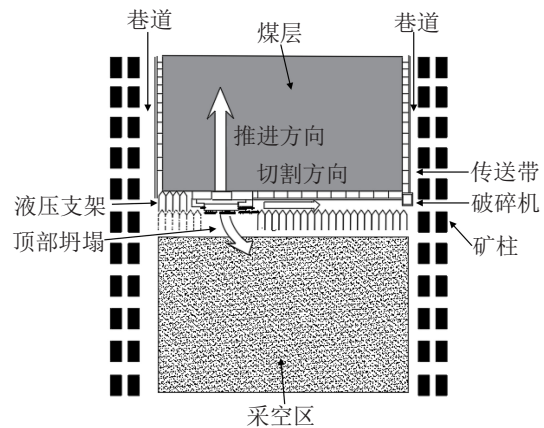


图1 长壁综采开采过程平面

当采煤机顺着工作面开采时,液压支架在采煤机将0.8~1m厚的煤体切割下来后连同顶板支撑系统和轨道一起向煤体推进,以便进行下一次切割<sup>[13]</sup>,具体的采煤机切割循环运动轨迹如图2所示<sup>[15]</sup>.

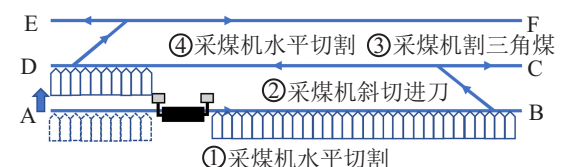


图2 采煤机工作面切割过程

采煤机的工作面是一个几百米的狭长通道且实际工作环境恶劣,但是煤体两侧的巷道环境相对稳定,因此可以在工作面端头的UWB位置信息采煤机进行精确测量.惯导/里程计组合定位方案见图3.

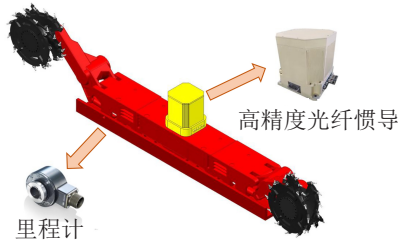


图3 基于捷联惯导/里程计的综合采煤机定位方案

## 2 基于改进因子图的惯导/里程计/UWB融合方法设计

传统基于贝叶斯估计的滤波方法基于马尔科夫假设,当前状态只与上一时刻的状态和当前量测相关<sup>[16]</sup>.因此,即使有十分准确的量测信息,也不能对过去的导航信息产生影响.在所提出方案中,采煤机只能在工作面两端获得UWB位置信息进行融合,其余时间只能依靠惯导/里程计递推,采煤机工作的大部分时间都会存在位置的发散.而因子图能够以图的形式描述优化方法,通过未知变量节点与量测值之间的联合条件概率密度方程构建成本函数,利用最小化函数实现导航信息的全局优化.具体方案结构和所提出算法流程如图4和图5所示.

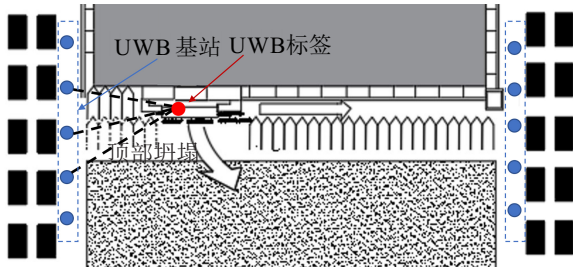


图4 基于工作面端头量测的惯性/里程计优化方案

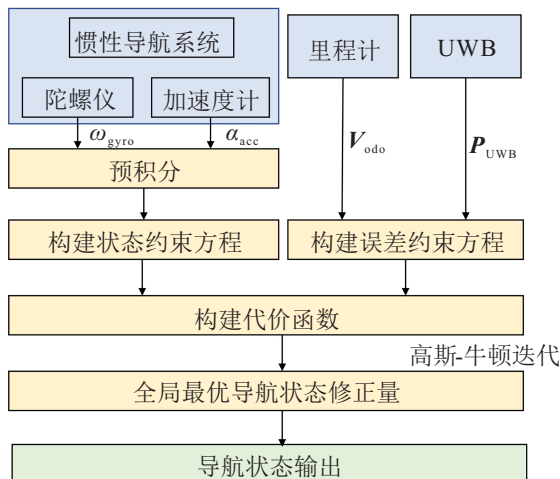


图5 基于工作面端头量测的改进因子图优化算法流程

## 2.1 惯性/里程计/UWB信息的约束模型构建

基于东北天导航坐标系进行讨论.为了描述采煤机的运动状态、惯性仪表误差、里程计标度因数误差和安装误差,状态量设置如下:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{A} \ v \ p \ \mathbf{b}_g \ \mathbf{b}_a \ s_o \ \phi_o]. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{A} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]$ 为载体姿态四元数, $\mathbf{v} = [v_E \ v_N \ v_U]$ 为载体东向、北向及天向速度; $\mathbf{p} = [\lambda \ L \ h]$ 为载体的经度、纬度和高度, $\mathbf{b}_g = [b_{gx} \ b_{gy} \ b_{gz}]$ 为3轴陀螺仪偏移误差, $\mathbf{b}_a = [b_{ax} \ b_{ay} \ b_{az}]$ 为3轴加速度计的偏移误差, $s_o$ 为里程计标度因数误差, $\phi_o$ 为安装误差角.

基于惯性导航系统的四元数运动学微分方程、比例微分方程和位置微分方程建模为如下形式:

$$\dot{\mathbf{A}} = 0.5\mathbf{A} \circ \boldsymbol{\omega}_{nb}^b, \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f}^n - (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \times \mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n, \quad (3)$$

$$\dot{L} = \frac{v_N}{R}, \quad (4)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v_E}{R}, \quad (5)$$

$$\dot{h} = v_U. \quad (6)$$

其中

$$\boldsymbol{\omega}_{nb}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\omega}_{in}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \mathbf{C}_n^b(\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n), \quad (7)$$

$$\mathbf{f}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{f}_{ib}^b, \quad (8)$$

$\mathbf{A}$ 和 $\dot{\mathbf{A}}$ 为四元数及其微分形式, $\mathbf{v}$ 和 $\dot{\mathbf{v}}$ 为载体速度及其微分形式, $\dot{L}$ 、 $\dot{\lambda}$ 和 $\dot{h}$ 分别为载体的纬度、经度和高度的微分形式, $\boldsymbol{\omega}_{nb}^b$ 为机体相对于导航系的角速度在机体上的投影, $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$ 为陀螺仪输出, $\mathbf{C}_n^b$ 为从导航系到机体的状态转移矩阵, $R$ 为载体到地心的距离.将式(2)~(6)进行离散化可以对两个连续时刻的导航信息进行约束,其离散形式为

$$\mathbf{A}_{k+1} - \mathbf{A}_k = \frac{1}{2} \mathbf{A}_k \circ \boldsymbol{\omega}_{nb}^b T, \quad (9)$$

$$\mathbf{v}_{k+1}^n - \mathbf{v}_k^n = (2\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \mathbf{v}_k^n T + (\mathbf{f}_k^n + \mathbf{g}^n) T, \quad (10)$$

$$L_{k+1} - L_k = \frac{v_k^N T}{R_M + h}, \quad (11)$$

$$\lambda_{k+1} - \lambda_k = \frac{v_k^E T}{(R_N + h) \cos L}, \quad (12)$$

$$h_{k+1} - h_k = v_k^U T. \quad (13)$$

其中:下标 $k$ 和 $k+1$ 分别为 $k$ 和 $k+1$ 时刻, $R_M$ 和 $R_N$ 分别为地球子午圈和卯酉圈的曲率半径, $T$ 为两个时刻之间的时间间隔.

惯导系统的角速度和加速度模型如下:

$$\boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \mathbf{b}_g + \mathbf{w}_g, \quad (14)$$

$$\mathbf{f}_{ib}^b = \bar{\mathbf{f}}_{ib}^b + \mathbf{b}_a + \mathbf{w}_a. \quad (15)$$

其中:  $\bar{\omega}_{ib}^b$  和  $\bar{\mathbf{f}}_{ib}^b$  为陀螺仪和加速度计输出的真值,  $\mathbf{b}_g$  和  $\mathbf{b}_a$  为陀螺仪和加速度计的偏移误差,  $\mathbf{w}_g$  和  $\mathbf{w}_a$  为陀螺仪和加速度计输出的白噪声.

里程计每个采样周期输出的量测量是机体系下的前向速度, 分解到东北天导航坐标系下的速度为

$$\mathbf{v}_N^{\text{odo}} = (\mathbf{I} - \mathbf{s}_o)(\mathbf{I} - \phi_o)\mathbf{C}_b^n \mathbf{v}_b^{\text{odo}}. \quad (16)$$

其中:  $\mathbf{v}_N^{\text{odo}}$  为导航系下里程计输出,  $\mathbf{v}_b^{\text{odo}}$  为机体系下里程计输出,  $\mathbf{s}_o$  为采煤机的标度因数误差,  $\phi_o$  为里程计与采煤机之间的安装误差.

端头位置信息由在工作面两端的巷道中搭建的UWB提供, 并在初始时刻对UWB基站进行标定, 安装在轨道两端. UWB标签与采煤机固连, 每当采煤机运动到工作面两端时, 通过UWB基站进行量测, 约束信息如下:

$$\mathbf{p}_{\text{UWB}} = [L_{\text{UWB}} \ \lambda_{\text{UWB}} \ h_{\text{UWB}}], \quad (17)$$

其中  $L_{\text{UWB}}$ 、 $\lambda_{\text{UWB}}$ 、 $h_{\text{UWB}}$  分别为UWB提供的经度、纬度、高度位置信息.

## 2.2 基于改进因子图的惯导/里程计/UWB井下采煤机位置优化方法

根据上述惯性/里程计/UWB信息的约束模型, 提出一种改进的因子图融合方法对惯导/里程计和UWB提供的工作面端头位置信息进行联合优化, 提高采煤机的导航精度. 该方法将采煤机运动状态与优化时刻之间的惯性/里程计/UWB量测信息关联, 并将量测模型加入到因子图的目标函数中, 构建当前因子节点的相对约束. 同时, 将里程计的标度因数误差和安装误差也作为估计的状态, 实现里程计误差的同步标定和优化. 通过对惯性数据的预积分, 减少了状态因子数量, 提高了算法的计算效率. 因子图模型如图6所示.

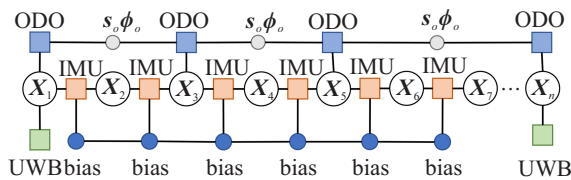


图6 惯导/里程计/UWB因子图优化模型

图6中:  $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$  为从第1个时刻到最后1个时刻的载体状态量, 包括载体的速度、位置和姿态; ODO为所有里程计速度量测信息, UWB为超宽带的位置量测信息, bias为陀螺加速度计的偏移误差,  $\mathbf{s}_o$  和  $\phi_o$  为里程计标定因数误差和安装误差. 由图6可以构建如下约束方程:

根据惯性信息的状态约束, 基于惯性因子的误差方程可以表示为

$$f^{\text{IMU}}(\mathbf{x}_{k+1}^{\text{IMU}}, \mathbf{x}_k^{\text{IMU}}, \mathbf{b}_k) = d(\mathbf{x}_{k+1}^{\text{IMU}} - h^{\text{IMU}}(\mathbf{x}_k^{\text{IMU}}, \mathbf{b}_k, \mathbf{z}_k)). \quad (18)$$

其中:  $\mathbf{x}^{\text{IMU}} = [\mathbf{A}, \mathbf{v}, \mathbf{p}, \mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g]$  包括采煤机姿态四元数、速度、位置和陀螺加速度计偏移误差,  $\mathbf{z}_k = [\mathbf{f}_{ib}^b, \omega_{ib}^b]$  为惯导系统的量测量.

偏移误差因子的误差方程可以表示为

$$f^{\text{bias}}(\mathbf{b}_{k+1}, \mathbf{b}_k) = d(\mathbf{b}_{k+1} - \mathbf{b}_k). \quad (19)$$

里程计因子的误差方程可以表示为

$$f^{\text{ODO}}(\mathbf{x}_k^{\text{IMU}}) = d(\mathbf{z}_k^{\text{ODO}} - h^{\text{ODO}}(\mathbf{x}_k^{\text{IMU}})), \quad (20)$$

其中  $\mathbf{z}_k^{\text{ODO}}$  为里程计在  $k$  时刻的量测量.

UWB量测因子的误差方程可以表示为

$$f^{\text{UWB}}(\mathbf{x}_k) = d(\mathbf{z}_k^{\text{UWB}} - h^{\text{UWB}}(\mathbf{x}_k)). \quad (21)$$

其中:  $\mathbf{x}_k = [\mathbf{A}, \mathbf{v}, \mathbf{p}, \mathbf{b}_a, \mathbf{b}_g, \mathbf{s}_o, \phi_o]$  包括里程计的标度因数误差和安装误差,  $\mathbf{z}_k^{\text{UWB}}$  为UWB在  $k$  时刻的量测量.

为了获得全局最优, 将所有因子节点误差之和作为代价函数, 通过最小化代价函数获得全局最优. 代价函数如下:

$$\min_{\mathbf{X}} \{ \|\mathbf{x}_{k+1}^{\text{IMU}} - h^{\text{IMU}}(\mathbf{x}_k^{\text{IMU}}, \mathbf{b}_k, \mathbf{z}_k)\|_{\Sigma}^2 + \|\mathbf{b}_{k+1} - \mathbf{b}_k\|_{\Sigma}^2 + \|\mathbf{z}_k^{\text{ODO}} - h^{\text{ODO}}(\mathbf{x}_k^{\text{IMU}})\|_{\Sigma}^2 + \|\mathbf{z}_k^{\text{UWB}} - h^{\text{UWB}}(\mathbf{x}_k)\|_{\Sigma}^2 \}. \quad (22)$$

通过高斯-牛顿法迭代解决非线性最小二乘问题, 求解状态增量  $\Delta \mathbf{X}$ , 有

$$\arg \min_{\Delta \mathbf{X}} \|J(\hat{\mathbf{X}})\Delta \mathbf{X} - b(\hat{\mathbf{X}})\|^2. \quad (23)$$

其中:  $\hat{\mathbf{X}}$  为状态初值,  $J(\hat{\mathbf{X}})$  为雅克比矩阵,  $b(\hat{\mathbf{X}})$  为量测残差.

通过下式进行迭代优化:

$$\Delta \mathbf{X} = (J(\mathbf{X})^T \mathbf{W} J(\mathbf{X}))^{-1} J(\mathbf{X})^T \mathbf{W} b(\mathbf{X}), \quad (24)$$

其中  $\mathbf{W}$  为不同传感器量测的权重矩阵, 可对不同传感器的信息权重进行调节.

由于采煤机工作时间长, 根据惯性传感器的频率设置状态节点会导致状态矩阵阶数很高, 在求逆的过程中使计算量成指数增长. 针对采煤机在工作面进行一次完整切割后才进行优化, 可以直接在惯性系下对惯性数据进行预积分, 通过减少状态因子的数量实现降低状态矩阵的阶数, 提高计算效率. 有

$$\mathbf{A}_{k+n} - \mathbf{A}_k = \prod_{m=k}^{k+n} (\mathbf{I} + 0.5\omega_{nbm}^b T), \quad (25)$$

其中  $n$  为有连续  $n$  个惯性数据进行预积分,  $n$  的取值取决于载体的动态, 在载体动态较大时可以适当减少  $n$  的取值. 加速度计输出预积分可以表示为

$$v_{k+n}^b - v_k^b = \sum_{m=k}^{k+n} f_{ibm}^b T. \quad (26)$$

### 3 仿真与实验

为了验证所提出算法对提高工作面采煤机切割过程定位精度的有效性, 通过仿真和实际的跑车实验对算法定位结果进行分析.

#### 3.1 仿真分析

根据井下采煤机的工作面切割过程, 设计井下开采的轨迹, 切割过程中设置了采煤机的停止、倒退等机动, 模拟采煤机在切割受阻时的运动状态. 仿真假设采煤机搭载惯性导航系统和里程计, 在工作面两端安装 UWB 基站提供工作面两端的高精度定位. 惯性导航系统的输出频率为 50 Hz, 里程计的输出频率为 1 Hz, 煤炭切割状态速度为 0.1 m/s. 工作面长 360 m, 液压支架推进距离 0.9 m, 采煤机进行一次往返切割, 全程共用 2.6 h. 传感器的仿真参数如表 1 所示.

表 1 主要传感器性能参数仿真设置

传感器类型	性能参数
惯性导航系统	陀螺零偏稳定性 0.001 deg/h
	角度随机游走 0.000 1 deg/sqrt(h)
	加速度计零偏稳定性 30 $\mu$ g
里程计	标度因数误差为 3%, 安装误差 0.1°
UWB	绝对定位精度优于 0.1 m

将所提出的惯性/里程计/UWB 的改进图优化算法与传统惯性/里程计卡尔曼滤波算法进行比较, 轨迹和误差如图 7~图 9 所示.

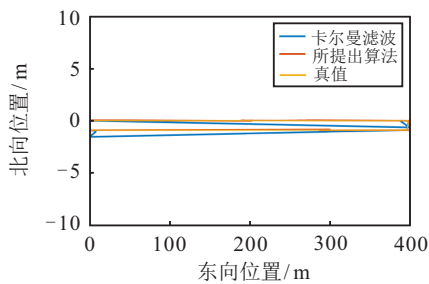


图 7 两种算法的轨迹比较

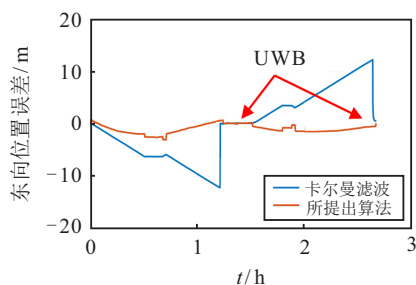


图 8 东向往返位置误差

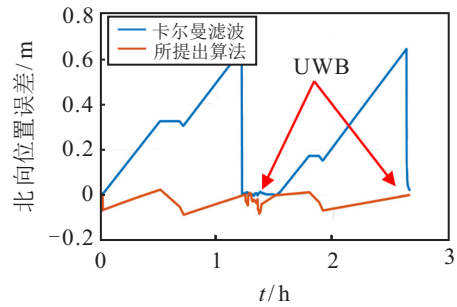


图 9 北向往返位置误差

图 7 为两种定位算法和真实轨迹的对比, 可以看出, 所提出算法与真实轨迹更为接近. 图 8 和图 9 展现了两种算法在东向和北向上的误差变化. 传统的卡尔曼滤波算法在端头收到 UWB 位置量测信息时, 能够有效抑制误差的发散并保持较高的定位精度. 当采煤机远离工作面端头时, 由于失去了 UWB 的信息导致位置误差重新发散. 而所提出算法通过对采煤机全状态参数进行迭代优化, 仅通过端头时刻的 UWB 量测数据便能有效抑制误差的累积, 在采煤机运动的整个过程均具有较高的定位精度. 表 2 给出两种算法的均方误差. 可以看出, 本文算法相较于传统卡尔曼滤波精度明显提高.

表 2 算法定位精度对比

方法	东向位置均方误差/m	北向位置均方误差/m
卡尔曼滤波	5.420	0.331
所提出算法	1.033	0.035

#### 3.2 实验分析

通过车载实验平台获得的真实数据进一步验证算法对采煤机定位的有效性, 场景如图 10 所示, 利用卫星信号拒止的室内走廊模拟开采工作面和液压支架共同构成的工作区间如图 11 所示. 在走廊两侧放置 UWB 基站, 通过全站仪对基站位置进行标定. 车载实验平台载体为 Apollo 无人驾驶移动平台, 搭载光纤惯导、全站仪棱镜、里程计以及 UWB 标签. 采煤机运动全程通过惯导/里程计进行组合导航, 在接近路径两端时, 加入 UWB 的定位信息进行辅助, 模拟采煤机工作面的一次往返切割过程, 参考位置由全站仪提供. 传感器性能参数如表 3 所示.



图 10 实验设备及实验场景

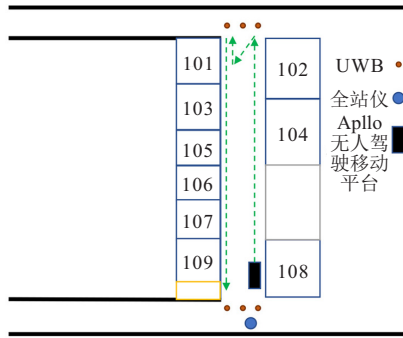


图 11 室内走廊平面示意图

表 3 主要传感器性能参数

传感器类型	性能参数
惯性导航系统	陀螺零偏稳定性 0.001 deg/h
	角度随机游走 0.0001 deg/sqrt(h)
	加速度计零偏稳定性 30 μg
里程计	测速精度为 0.01 m/s
UWB	绝对定位精度优于 0.1 m
全站仪	定位精度优于 0.05 m

图 12 为两种算法得到的轨迹和全站仪给出的参考基准轨迹, 图 13 和图 14 为两种算法的东向和北向误差. 可以看出, 基于卡尔曼滤波的惯导/里程计算法存在比较明显的发散趋势, 而有了 UWB 端头位置量测的改进图优化算法能够有效抑制定位精度的发散. 从全局看, 所提出算法抑制了位置发散, 减少了定位误差. 表 4 为算法定位精度对比. 综上, 所提出算法相较于传统卡尔曼滤波的惯导/里程计融合算法, 通过量测信息的间歇组合, 能够显著提高采煤机在切割过程中的定位精度, 保证了井下开采的准确性和安全性.

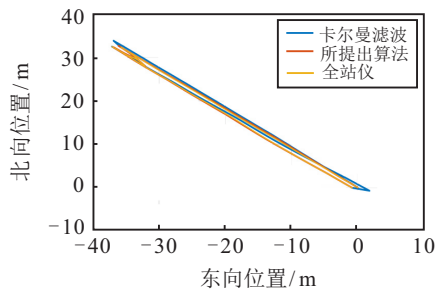


图 12 两种算法的轨迹比较

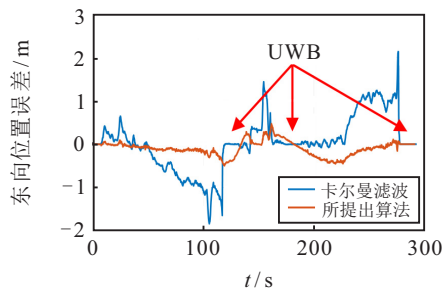


图 13 东向往返位置误差

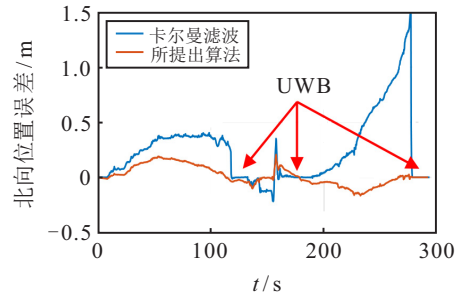


图 14 北向往返位置误差

表 4 算法定位精度对比

方法	东向位置均方误差/m	北向位置均方误差/m
卡尔曼滤波	0.559	0.504
所提出算法	0.158	0.161

### 4 结论

针对传统基于惯导/里程计的融合算法精度以及井下环境恶劣导致传感器可用性不足的问题, 本文分析了目前常见的辅助定位方式在井下环境中面临的问题, 提出基于惯导/里程计/UWB 的改进图优化井下定位方法. 根据井下开采对精度要求高、实时性需求低的特点, 构建了基于工作面端头量测的井下采煤机定位的图优化模型, 推导了基于惯性/里程计/UWB 的采煤机导航信息、里程计标度因数误差和安装误差约束模型, 通过改进图优化算法对水平切割的轨迹进行全局优化, 根据采煤机的动态特性进行预积分, 提高了算法的计算效率. 相较于传统基于卡尔曼滤波的井下定位算法, 所提出算法能够有效地对开采过程中采煤机定位的累积误差、标度因数误差和安装误差进行在线优化和标定, 在只有稀疏位置量测时, 能够显著提高采煤机在长壁工作面的开采精度.

### 参考文献(References)

- [1] Ralston J C, Hargrave C O, Dunn M T. Longwall automation: Trends, challenges and opportunities[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(5): 733-739.
- [2] Thrybom L, Neander J, Hansen E W, et al. Future challenges of positioning in underground mines[J]. IFAC-Papers OnLine, 2015, 48(10): 222-226.
- [3] Reid D C, Hainsworth D W, Ralston J C, et al. Inertial navigation: Enabling technology for longwall mining automation[J]. IEEE Control Systems, 2003, 28(6): 28-37.
- [4] Yang H, Li W, Luo C M, et al. Research on error compensation property of strapdown inertial navigation system using dynamic model of shearer[J]. IEEE Access, 2016, 4: 2045-2055.
- [5] Wang S J, Wang S B. Improving the shearer positioning accuracy using the shearer motion constraints in longwall panels[J]. IEEE Access, 2020, 8: 52466-52474.

[6] Ralston J C, Hargrave C O, Hainsworth D W. Localisation of mobile underground mining equipment using wireless Ethernet[C]. The 20th IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference. Hong Kong, 2005: 225-230.

[7] Li J G, Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment[J]. Engineering, 2018, 4(3): 381-391.

[8] Yang H, Luo T, Li W, et al. A stable SINS/UWB integrated positioning method of shearer based on the multi-model intelligent switching algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 29128-29138.

[9] Fan Q G, Li W, Hui J, et al. Integrated positioning for coal mining machinery in enclosed underground mine based on SINS/WSN[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 460415.

[10] Ralston J, Reid D, Hargrave C, et al. Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(3): 305-310.

[11] Chen Y M, Li W, Xin G F, et al. An improved strong tracking Kalman filter algorithm for the initial alignment of the shearer[J]. Complexity, 2019, 2019: 3172501.

[12] 郝顺义, 卢航, 魏翔, 等. 简化高阶强跟踪容积卡尔曼滤波及其在组合导航中的应用[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2105-2114.  
(Hao S Y, Lu H, Wei X, et al. Reduced high-degree strong tracking cubature Kalman filter and its application in integrated navigation system[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2105-2114.)

[13] Reid P B, Dunn M T, Reid D C, et al. Real-world automation: New capabilities for underground longwall mining[C]. Australasian Conference on Robotics and Automation. Brisbane: Queensland University of Technology, 2010: 1-8.

[14] Lai J Z, Bai S Y, Xu X W, et al. A generic plug-and-play navigation fusion strategy for land vehicles in GNSS-denied environment[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019(2): 197-204.)

[15] Wang S B, Zhang B Y, Wang S J, et al. Dynamic precise positioning method of shearer based on closing path optimal estimation model[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1468-1475.

[16] Zeng Q H, Chen W N, Liu J Y, et al. An improved multi-sensor fusion navigation algorithm based on the factor graph[J]. Sensors: Basel, Switzerland, 2017, 17(3): 641.

作者简介

许晓伟(1992—), 男, 博士生, 从事井下环境多传感器信息融合技术的研究, E-mail: xuxw@nuaa.edu.com;

赖际舟(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事惯性器件误差机理分析、捷联惯性导航技术、容错自主导航技术等研究, E-mail: laijz@nuaa.edu.cn;

吕品(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事惯性导航系统、组合导航系统等研究, E-mail: lvpin@nuaa.edu.cn;

陆俊清(1979—), 男, 研究员, 从事惯性器件及其捷联惯性导航系统设计与应用等研究, E-mail: LU3721@163.com;

白师宇(1992—), 男, 博士生, 从事惯性技术与组合导航的研究, E-mail: sybai@nuaa.edu.cn;

胡华峰(1986—), 男, 高级工程师, 从事惯性技术等研究, E-mail: h-hfeng@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)

下 期 要 目

炼油生产调度研究现状与挑战 ..... 陈远东, 等

项目调度与物料订购集成优化研究综述 ..... 胡雪君, 等

基于扩张状态观测器的四旋翼无人机快速非奇异终端滑模轨迹跟踪控制 ..... 赵振华, 等

基于改进蚁群和DWA算法的机器人动态路径规划 ..... 魏立新, 等

考虑制造商建议零售价格和零售商企业社会责任的绿色供应链决策 ..... 林志炳, 等

基于改进天牛须算法的电力攀爬机器人运动学逆解算法 ..... 都海波, 等

分布式无人机队列控制与动态障碍规避设计 ..... 鲜 斌, 等

基于屏障控制函数的轮式机器人系统多目标分布式协同控制 ..... 娜茜泰, 等

串级连续搅拌反应釜的有限时间命令滤波控制 ..... 孔晓涵, 等

基于低通非奇异终端滑模引导的舰载机抗侧风着舰控制技术 ..... 崔凯凯, 等