

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210013

基于 UWB 系统的采煤工作面端头采煤机 自主定位方法研究*

曹波¹, 王世博², 鲁程¹

(1. 安徽科技学院机械工程学院 滁州 233100; 2. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116)

摘要:采煤机自主定位装置的长期定位精度是煤矿智能开采的关键。针对当前采煤机定位精度难以满足自动开采的需求,提出了采煤工作面端头自动校准惯性导航定位系统的方法,构建了基于 UWB 系统的井下局部定位系统,对采煤机位置进行修正纠偏,能实现采煤机长期循环自主定位的策略。考虑 UWB 系统在非视距(NLOS)环境下的定位精度较低,提出了基于不等式约束的平方根无迹卡尔曼滤波(CSRUKF)定位算法;为了进一步消减 NLOS 误差的干扰,提出了基于考虑运动速度的抗差泰勒级数(VRTS)算法对定位结果进行优化,提升最终的定位精度。以 UWB 定位系统和移动平台为基础,开展了模拟端头定位的实验。实验结果表明,CSRUKF-VRTS 方法能够减小定位误差,提高 NLOS 环境下的定位精度, x 轴、 y 轴和 z 轴的平均误差分别由 0.332、0.404 和 0.306 m 降低到 0.266、0.212 和 0.159 m,对应的平均精度分别提升了 17.4%、47.5% 和 48.1%。所提的采煤工作面端头循环定位策略为采煤机实现长期自主定位提供新的思路,为非视距环境下的定位提供参考。

关键词:采煤机;自主定位;超宽带;约束的平方根;无迹卡尔曼滤波;采煤工作面

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

Research on the shearer autonomous localization method based on UWB system at the end of coal mining working face

Cao Bo¹, Wang Shibo², Lu Cheng¹

(1. School of Mechanic Engineering Anhui Institute of Science and Technology, Chuzhou 233100, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The long-term positioning accuracy of shearer independent positioning device is the key to intelligent coal mining. However, the state-of-the-art positioning accuracy of shearer is difficult to meet the demand of automatic mining. This article puts forward the coal mine working face end automatic calibration of inertial navigation positioning system, constructs the underground local positioning system based on UWB system, and calibrates the shearer position which can achieve the long-term autonomous cycle positioning of shearer. Considering the low positioning accuracy of the UWB system in the non-line of sight (NLOS) environment, the constrained square root unscented Kalman filter (CSRUKF) positioning algorithm is proposed. To further reduce the interference of NLOS error, the positioning results are optimized based on the velocity robust Taylor series (VRTS) algorithm with consideration of the motion speed to improve the final positioning accuracy. Based on the UWB positioning system and mobile platform, the simulated terminal positioning is conducted. Experimental results show that the CSRUKF-VRTS method is able to reduce the localization error and improve the positioning accuracy in the NLOS environment. The mean error of the x , y and z -axis is reduced from 0.332, 0.404 and 0.306 m to 0.266, 0.212 and 0.159 m, respectively. The corresponding average accuracy is improved by 17.4%, 47.5%, and 48.1%, respectively. The proposed cyclic positioning strategy of coalmine working face end provides a novel idea for the long-term independent positioning and a reference for the positioning of NLOS environment.

Keywords: shearer; autonomous localization; ultra-wideband; CSURKF; coal mining working face

0 引 言

煤矿智能化无人开采是煤炭开采技术变革的重要方向,是煤矿实现安全高效生产的核心技术^[1]。高级智能的煤炭采运机组应具有自主定位导航、自动驾驶、自适应切割和自动纠偏等 4 种智能感,其中采煤机的自主定位导航技术极为关键^[2]。当前,基于惯性导航系统的采煤机定位技术已得到企业和煤矿普遍认可,作为综采面自动化的一项关键技术^[3]。然而惯性元件随时间和距离的增长存在漂移现象,产生累积误差,导致定位误差逐渐增大,定位精度逐渐降低,无法长期提供可靠的定位精度。为了提升采煤机的定位精度, Schiffbauer^[4-5] 利用 Honeywell 的惯性导航系统开发了连采机定位系统。Reid 等^[6], Scherzinger^[7], Ralston 等^[8] 提出了闭合路径的方法对定位精度进行优化。方新秋等^[9]、Fan 等^[10]、郝尚清等^[11] 为了将惯性导航系统应用采煤机定位,在定位精度和误差补偿方面做大量研究。同时,笔者课题组在提升采煤机定位精度方面开展了相关的研究^[12-14],但是定位误差仍然较大,难以满足自主导航定位的要求,因此需要融合其他定位技术辅助惯性导航定位,补偿惯性导航系统的漂移误差。

超宽带 (ultra-wideband, UWB) 技术具有传输速率高、测距精度高、抗干扰性好及多径分辨能力强等优点,可达到厘米级的距离分辨率^[15]。杨海等^[16] 提出采用自适应模糊卡尔曼滤波技术进行惯性导航和 UWB 组合导航数据融合的方法提升定位精度; Fan 等^[17] 提出将 UWB 基站安装在液压支架上,通过 UWB 系统获得采煤机的位置实现对惯性导航的误差进行补偿,提升定位精度。李倩等^[18]、胡悦等^[19]、徐晓伟等^[20] 提出了基于 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,构建了惯导/里程计/UWB 的约束方程和图优化模型,通过改进图优化算法对水平切割的轨迹进行全局优化,以达到提升定位精度的目的。张子悦等^[21] 提出了一种基于多感知方式组合测量的采煤机位姿检测系统,采用全站仪和 UWB 定位系统组合测量采煤机的空间位置坐标,采用倾角传感器和寻北仪组合测量采煤机的姿态角,采煤机开采过程中,采煤工作面的环境复杂恶劣,存在很多的遮挡物,容易使得 UWB 的信号传输通道被遮挡,产生非视距 (non-line of sight, NLOS) 误差,但是上述的方法都忽略了 UWB 系统中 NLOS 环境的干扰,造成定位精度较低。

为了削弱 NLOS 测量的干扰,降低 NLOS 误差的影响,提升 UWB 系统的定位精度,沈国杰等^[22] 采用卡尔曼滤波算法对测量值进行滤波平滑,然后利用 Chan 算法融合多基站数据计算目标位置,该方法能够有效抑制井下

NLOS 误差对定位精度的影响。张海军等^[23] 针对井下 NLOS 环境的定位,采用区域判定策略和区域校正策略划分定位区域,减小了定位过程中大量的无效帧,利用加权最小二乘法与无迹卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter, UKF) 联合定位算法解算目标节点位置坐标,提高了定位精度。温良等^[24] 利用测距校正模型对非视距测距结果进行校正,仿真结果表明定位精度得到明显改善。Li 等^[25] 针对井下 NLOS 环境下的定位精度不高的问题,提出以联合定位得到的初始坐标作为 UKF 算法的观测值,并对 UKF 的测量更新方程进行修正。这些方法的定位精度有所改善,但是效果不明显,定位精度仍然较低,难以满足定位的需求。

针对井下采煤机的定位,本文提出了一种采煤机长期自主导航定位的策略;为了提升 UWB 系统在 NLOS 环境下的定位精度,提出了一种基于不等式约束的平方根无迹卡尔曼滤波 (constrained square root unscented Kalman filter, CSRUKF) 对定位结果进行平滑处理,减小 NLOS 误差的干扰;考虑在观测时间内移动速度的影响,提出了一种基于考虑移动速度的抗差泰勒级数 (velocity robust Taylor series, VRTS) 算法对定位结果进行优化,进一步提升了最终的定位精度,通过模拟实验验证了该方法的有效性。

1 UWB 定位系统

为了使采煤机上的惯性导航装置获得长期的自主导航定位精度,需要对惯性导航的漂移误差进行补偿和修正。为了实现对采煤机进行自主导航,文献[16-17, 20] 提出了利用 UWB 系统获得采煤机的位置信息,抑制惯性系统的漂移,并且为惯性导航系统提供校准的基准,这些方法都是将 UWB 定位基站分别安装在液压支架顶端和底端,定位终端模块固定在采煤机机身上,利用定位算法获得三维位置坐标,但是该定位策略存在明显的缺陷,采煤机作业过程中,液压支架的位置不断迁移,安装在液压支架上的定位基站会随着液压支架的移动而移动,且移动的距离难以准确的测量,导致每个基站的位置坐标都发生了变化。在采煤机在截割煤层时,无法直接测量基站的位置坐标。当采煤机完成一刀截割后,需要停机后重新测量标定每个基站的坐标,如果在整个采煤工作面上布设定位基站,则需要大量的定位基站。对每个迁移后的基站进行测量,费时费事,而且无法使采煤机连续自主导航定位。

为此,笔者提出将 UWB 定位系统分别部署在采煤工作面 2 个端头的顺槽巷道中,图 1 给出了由 4 个定位基站构成的 UWB 定位系统,图 2 为采煤工作面端头采煤机自主定位结构图^[2,26]。当采煤机即将运行到采煤工作面

端头 UWB 信号的最佳传输范围内,启动 UWB 定位系统对采煤机进行定位,利用 UWB 系统定位模型解算定位终端的位置坐标,惯性导航以 UWB 系统的位置坐标为参考进行自身位置的修正,从而降低惯性导航系统的定位误差。无论采煤机上山还是下山,都可以利用对应端头的 UWB 定位系统进行端头定位。为了实现在采煤工作面端头能够自动连续的进行端头循环定位,将所有的 UWB 定位基站形成一个群体,并将其安装在顺槽巷道的迁移装置上,采煤机完成端头定位后,关闭 UWB 系统,UWB 基站群沿着顺槽巷道的导轨整体进行迁移,同时惯性导航系统的漂移得到补偿。步进电机控制基站群沿着导轨迁移预设的距离,依据基站的初始坐标和移动的距离,在上位机中解算出迁移后的基站坐标,为下轮的端头自主定位做好准备,采煤机无需停机校准,而是继续的进行下轮的截割,实现端头循环定位,图 3 给出了采煤工作面端头循环定位流程图。这种策略不但实现了基站自动迁移,而且实现了采煤机连续长期的自主导航,避免了停机对采煤机进行人工校准。惯性导航校准的效果取决于 UWB 系统的定位精度,因此需要提高 UWB 系统的定位精度,从而保证惯性导航系统能实现长期的自主导航定位。

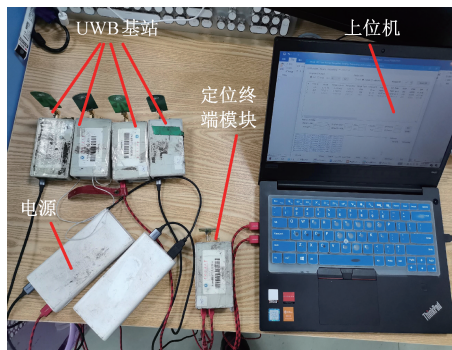


图 1 4 个基站组成的定位系统

Fig. 1 Positioning system composed of four base stations

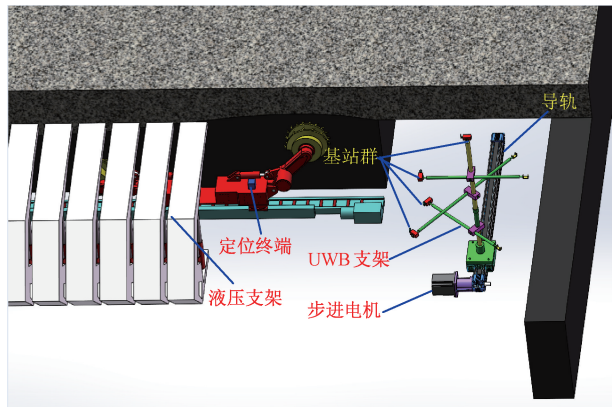


图 2 采煤工作面端头采煤机自主定位系统结构

Fig. 2 Structure diagram of the shearer autonomous positioning system of the coal mining face end

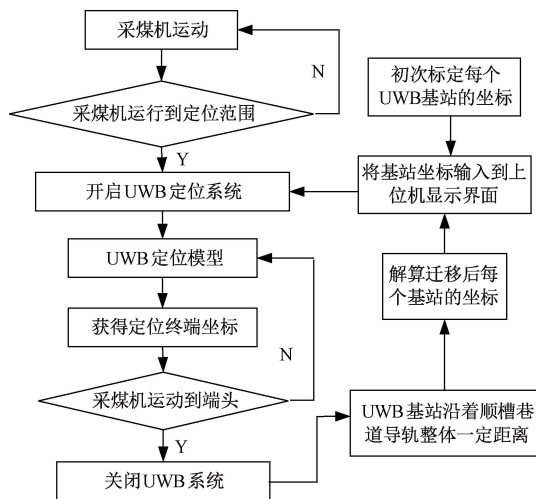


图 3 循环定位流程

Fig. 3 Flow chart of cyclic positioning

2 定位方法

2.1 最小二乘法

由 4 个定位基站和 1 个定位终端组成的 UWB 定位系统,根据测量距离构建观测方程,如式(1)所示。

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = d_3^2 \\ (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2 = d_4^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_i 表示 UWB 系统中定位终端与第 i 个定位基站之间的实际测量距离, (x_i, y_i, z_i) 代表定位基站的位置坐标, (x, y, z) 代表定位终端待求的位置,其中 $i = 1, 2, 3, 4$ 。

将式(1)转换成矩阵形式,如式(2)所示。

$$\begin{aligned} CX &= \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_2 - a_1 + d_1^2 - d_2^2 \\ a_3 - a_2 + d_2^2 - d_3^2 \\ a_4 - a_3 + d_3^2 - d_4^2 \end{bmatrix} = M \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $a_i = (x_i)^2 + (y_i)^2 + (z_i)^2$ 。根据最小二乘法(least square, LS)原理,式(2)的 LS 解为:

$$\hat{X} = (C^T C)^{-1} C^T M \quad (3)$$

2.2 基于 CSRUKF 的定位算法

利用式(3)可以求出定位终端的位置坐标,但是由于 NLOS 测量的干扰,定位结果的误差较大,需要对定位结果进行平滑处理。在 k 时刻,定位终端的空间状态向

量表示为:

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{p}_k, \mathbf{v}_k] = [x_k, y_k, z_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k]^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k, z_k)$ 表示定位终端在 k 时刻的位置坐标; $\mathbf{v}_k = (\dot{x}_k, \dot{y}_k, \dot{z}_k)$ 表示定位终端在对应时刻的速度。假设定位终端匀速运动,则定位终端的运动状态模型为:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{B}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{C}\mathbf{v}_k \quad (5)$$

式中: $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \Delta T \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T^2}{2} \mathbf{I}_{3 \times 3}, \Delta T \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{v}_k$ 表示均值为 0 的高斯过程, 其对角协方差矩阵为 $\mathbf{Q} = \sigma_v^2 \mathbf{I}_6$ 。

为了便于描述,将视距状态和 NLOS 状态下测距表示为:

$$r_k^i = \begin{cases} h^i(\mathbf{X}_k) + n_k^i, & i \in \text{LOS} \\ h^i(\mathbf{X}_k) + b_k^i + n_k^i, & i \in \text{NLOS} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $h^i(\mathbf{p}_k) = \|\mathbf{p}_k - \mathbf{a}^i\| =$

$\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2}$, $\mathbf{a}^i = (x_i, y_i, z_i)$ 表示定位基站坐标; n_k^i 代表测量噪声,服从均值为 0, 方差为 σ_n^2 的高斯过程; b_k^i 代表非视距误差。在 NLOS 环境下,则有:

$$\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2} \leq r_k^i \quad (7)$$

由式(7)的交点形成的可行域 M_k 表示为:

$$M_k = \{p: \|\mathbf{p} - \mathbf{a}^i\| \leq r_k^i \quad \forall i \in m\} \quad (8)$$

为了提升定位终端的位置估计精度,在每个时刻,将 NLOS 状态的测量距离从观测向量中去除,只保留视距状态的测距,同时将 NLOS 状态的测距作为不等式约束条件融合到状态空间模型中,则空间状态模型构建为如下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \mathbf{B}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{C}\mathbf{v}_k \\ \mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{n}_k \\ \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2} \leq r_k^i \end{cases} \quad (9)$$

1) 无约束的平方根无迹卡尔曼滤波算法

在平方根无迹卡尔曼滤波 (square root unscented Kalman filter, SRUKF) 算法更新过程中,利用协方差的平方根矩阵代替传统 UKF 算法的协方差,既可以保证协方差矩阵的正定,又可以防止由累积误差引起的滤波发散问题,提高了系统的稳定和精确性。假设在 $k-1$ 时刻的状态量和误差协方差分别为 $\mathbf{X}_{k-1|k-1}$ 和 $\Sigma_{k-1|k-1}$, 状态量预测与误差协方差预测为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k|k-1} = \mathbf{B}\mathbf{X}_{k-1|k-1} \\ \Sigma_{k|k-1} = \mathbf{B}\Sigma_{k-1|k-1}\mathbf{B}^T + \mathbf{C}\mathbf{Q}\mathbf{C}^T \end{cases} \quad (10)$$

将协方差进行 Cholesky 分解,则有:

$$\Sigma_{k-1|k-1} = \mathbf{U}_{k-1|k-1}^T \mathbf{U}_{k-1|k-1} \quad (11)$$

将式(11)改写为如下形式:

$$\Sigma_{k|k-1} = [\mathbf{B}\mathbf{U}_{k-1|k-1}^T, \mathbf{C}\mathbf{Q}^{\frac{1}{2}}][\mathbf{U}_{k-1|k-1}\mathbf{B}^T, \mathbf{Q}^{\frac{1}{2}}\mathbf{C}^T]^T \quad (12)$$

将式(12)右边的矩阵进行 QR 分解,可得 $\mathbf{U}_{k|k-1}$, 如下:

$$\mathbf{U}_{k|k-1} = \mathbf{q}\mathbf{r}\{[\mathbf{U}_{k-1|k-1}\mathbf{B}^T, \mathbf{Q}^{\frac{1}{2}}\mathbf{C}^T]^T\} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{q}\mathbf{r}\{\cdot\}$ 表示 QR 分解。计算 $2n+1$ 个 Sigma 点:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{k|k-1}^0 = \mathbf{X}_{k|k-1} \\ \mathbf{S}_{k|k-1}^{(l)} = \mathbf{X}_{k|k-1} + \mathbf{U}_{k|k-1}^T \cdot (\sqrt{(n+\lambda)})_l \\ l = 1, \dots, n \\ \mathbf{S}_{k|k-1}^{(l)} = \mathbf{X}_{k|k-1} - \mathbf{U}_{k|k-1}^T \cdot (\sqrt{(n+\lambda)})_l \\ l = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (14)$$

根据产生的 Sigma 点,利用非线性量测模型计算预测观测值,如下:

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} = h(\mathbf{S}_{k|k-1}^{(l)}), \quad l = 0, \dots, 2n \\ \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1} = \sum_{l=1}^{2n} w_n^{(l)} \mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} \end{cases} \quad (15)$$

计算互相关协方差矩阵 $\Sigma_{\text{SZ},k|k-1}$, 如下:

$$\Sigma_{\text{SZ},k|k-1} = \sum_{l=1}^{2n} w_n^{(l)} (\mathbf{S}_{k|k-1}^{(l)} - \mathbf{X}_{k|k-1})(\mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1})^T \quad (16)$$

计算观测量的自相关协方差矩阵 $\Sigma_{\text{ZZ},k|k-1}$, 如下:

$$\Sigma_{\text{ZZ},k|k-1} = \sum_{l=1}^{2n} w_n^{(l)} (\mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1})(\mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1})^T + \mathbf{R} \quad (17)$$

令 $\zeta_Z^{(l)} = \sqrt{w_n^{(l)}}(\mathbf{Z}_{k|k-1}^{(l)} - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1})$, 对 $\Sigma_{\text{ZZ},k|k-1}$ 进行 Cholesky 分解,假设 $\Sigma_{\text{ZZ},k|k-1}$ 的上三角 Cholesky 因子为 $\mathbf{U}_Z$, 则有:

$$\mathbf{U}_Z = \mathbf{q}\mathbf{r}\{[\zeta_Z^{(1)}, \zeta_Z^{(2)}, \dots, \zeta_Z^{(2n)}, \sqrt{\mathbf{R}}]^T\} \quad (18)$$

计算卡尔曼增益 $\mathbf{G}_k$, 如下:

$$\mathbf{G}_k = \Sigma_{\text{SZ},k|k-1} (\Sigma_{\text{ZZ},k|k-1})^{-1} = \Sigma_{\text{SZ},k|k-1} \mathbf{U}_Z^{-1} \mathbf{U}_Z^T \quad (19)$$

为了计算方便,令 $\Phi_k = \Sigma_{\text{SZ},k|k-1} \mathbf{U}_Z^{-1}$, 进一步则有:

$$\mathbf{G}_k = \Phi_k \mathbf{U}_Z^T \quad (20)$$

状态矩阵更新:

$$\mathbf{X}_{k|k} = \mathbf{X}_{k|k-1} + \Phi_k \mathbf{U}_Z^T (\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_{k|k-1}) \quad (21)$$

协方差矩阵更新:

$$\Sigma_{k|k} = \mathbf{U}_{k|k-1}^T \mathbf{U}_{k|k-1} - \Phi_k \Phi_k^T \quad (22)$$

根据式(22),可计算协方差矩阵的 Cholesky 因子:

$$\mathbf{U}_{k|k} = \text{cholupdate}\{\mathbf{U}_{k|k-1}, \Phi_k, -1\} \quad (23)$$

2) 施加不等式约束

为了对估计的状态量和协方差矩阵施加约束,根据 k 时刻估计值 $\mathbf{X}_{k|k}$ 和 $\mathbf{U}_{k|k}$, 产生一组新的 Sigma 点:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{k|k}^0 = \mathbf{X}_{k|k} \\ \mathbf{S}_{k|k}^{(l)} = \mathbf{X}_{k|k} + \mathbf{U}_{k|k}^T \cdot (\sqrt{(n+\lambda)})_l \quad l = 1, \dots, n \\ \mathbf{S}_{k|k}^{(l)} = \mathbf{X}_{k|k} - \mathbf{U}_{k|k}^T \cdot (\sqrt{(n+\lambda)})_l \quad l = n+1, \dots, 2n \end{cases} \quad (24)$$

为了将可行域之外的 sigma 点投影到边界上,获得受约束的 sigma 点,构建如下目标函数:

$$\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) = \operatorname{argmin}_V \{ (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{V})^T \mathbf{W}_k (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{V}) \} \quad (25)$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{V}(1:3) - \mathbf{a}^i\| \leq r_k^i, i \in 1, 2, 3, 4$$

其中, $\mathbf{W}_k$ 表示加权矩阵, 根据文献[27], 取 $\mathbf{W}_k = \Sigma_{k|k}^{-1}$ 。

利用 $\Sigma_{k|k} = \mathbf{U}_{k|k}^T \mathbf{U}_{k|k}$, 则目标函数可转换为:

$$\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) = \operatorname{argmin}_V \{ (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{V})^T \mathbf{U}_{k|k}^{-1} \mathbf{U}_{k|k}^{-T} (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{V}) \} \quad (26)$$

令 $\mathbf{u} = \mathbf{U}_{k|k}^{-T} (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{V})$, 则有如下关系:

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \mathbf{U}_{k|k}^T \mathbf{u} \quad (27)$$

对下三角矩阵 $\mathbf{U}_{k|k}^T$ 进行划分, 则有:

$$\mathbf{U}_{k|k}^T = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中, $L_{11} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $L_{22} \in \mathbb{R}^{(n-3) \times (n-3)}$ 。根据式(28), 可得:

$$\mathbf{V}(1:3) = \mathbf{S}_{k|k}^{(l)}(1:3) - L_{11} \mathbf{u}(1:3) \quad (29)$$

由于约束条件中不包含 $\mathbf{u}(4:n)$, 因此最优的选择是 $\mathbf{u}(4:n) = 0$, 式(26)的优化问题进一步可转变为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(1:3)} & \{ \mathbf{u}^T(1:3) \mathbf{u}(1:3) \} \\ \text{s. t. } & \|\mathbf{L}_{11} \mathbf{u}(1:3) - (\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}(1:3) - \mathbf{a}^i)\| \leq r_k^i, \quad (30) \\ & i \in 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

根据文献[28-29], 可以通过迭代技术获得最优解 $\mathbf{u}(1:3)$, 因此, 进一步可得到最优解 $\mathbf{V}$:

$$\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) \triangleq \mathbf{V} = \mathbf{S}_{k|k}^{(l)} - \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \end{bmatrix} \mathbf{u}(1:3) \quad (31)$$

通过式(31)获得投影 sigma 点, 估计 k 时刻的状态量和误差协方差矩阵:

$$\mathbf{X}_{k|k}^\Psi = \sum_{l=1}^{2n} w^{(l)} \Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) \quad (32)$$

$$\Sigma_{k|k}^\Psi = \sum_{l=1}^{2n} w^{(l)} (\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) - \mathbf{X}_{k|k}^\Psi) (\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) - \mathbf{X}_{k|k}^\Psi)^T \quad (33)$$

令 $\zeta_\Psi^{(l)} = \sqrt{w^{(l)}} (\Psi(\mathbf{S}_{k|k}^{(l)}) - \mathbf{X}_{k|k}^\Psi)$, $l = 0, 1, \dots, 2n$, 则 $\Sigma_{k|k}^\Psi$ 的 Cholesky 因子 $\mathbf{U}_{k|k}^\Psi$ 为:

$$\mathbf{U}_{k|k}^\Psi = qr \{ [\zeta_\Psi^{(l)}, \zeta_\Psi^{(l)}, \dots, \zeta_\Psi^{(2n)}]^T \} \quad (34)$$

在下次无约束 SRUKF 迭代中, 使用约束的状态量估计值 $\mathbf{X}_{k|k}^\Psi$ 和误差协方差矩阵的 Cholesky 因子估计值 $\mathbf{U}_{k|k}^\Psi$ 代替 $\mathbf{X}_{k|k}$ 和 $\mathbf{U}_{k|k}$, 即:

$$\mathbf{X}_{k|k} = \mathbf{X}_{k|k}^\Psi, \mathbf{U}_{k|k} = \mathbf{U}_{k|k}^\Psi \quad (35)$$

2.3 基于速度的抗差泰勒级数算法

利用 CSRUKF 算法可以平滑定位终端的位置坐标, 但是当 NLOS 条件下的测量距离存在较大的测距误差时, CSRUKF 算法依然存在定位精度低的问题, 需要对定

位结果进行优化, 进一步提升 UWB 定位系统的定位精度。泰勒级数算法是一种具有较高定位精度的迭代算法。为了提高 Taylor 算法的鲁棒性, 提出一种抗差泰勒级数 (robust Taylor series, RTS) 算法, 消减 NLOS 测距误差对坐标估计的影响, 根据 CSRUKF 的定位结果以及测量距离, 进行如下定义:

$$f_i(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{a}_i\| - \hat{d}_i \quad (36)$$

根据文献[30], 构造 M-估计器的代价函数为:

$$\rho = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^m s_i \rho(e_i) \quad (37)$$

式中: s_i 为权重系数; $m=4$; e_i 为 $f_i(\mathbf{p})$ 在 $\mathbf{p}_0$ 点的一阶泰勒级数展开, $\mathbf{p}_0$ 为定位终端通过 CSRUKF 算法获得的位置坐标; e_i 可被表示为如下形式:

$$e_i \approx f_i(\mathbf{p}_0) + \nabla f_i(\mathbf{p}_0) (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) = f_i(\mathbf{p}_0) + \nabla f_i(\mathbf{p}_0) \delta \mathbf{p} \quad (38)$$

式中: $\delta \mathbf{p} = [\delta_x, \delta_y, \delta_z]^T$ 表示在 Taylor 算法迭代过程中定位终端的估计坐标与实际坐标的差值, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 分别表示 x, y, z 方向的偏差, $\nabla f_i(\mathbf{p}_0)$ 为 $f_i(\mathbf{p})$ 在点 $\mathbf{p}_0$ 的梯度, 则 $\nabla f_i(\mathbf{p}_0)$ 可被表示成如下形式:

$$\nabla f_i(\mathbf{p}_0) = \left[\frac{x_0 - x_i}{f_i(\mathbf{p}_0)}, \frac{y_0 - y_i}{f_i(\mathbf{p}_0)}, \frac{z_0 - z_i}{f_i(\mathbf{p}_0)} \right] \quad (39)$$

为了求得式(37)的最小值, 对式(37)进行求导并令其等于 0, 则有:

$$\sum_{i=1}^m [s_i \psi(e_i) \nabla f_i(\mathbf{p}_0)^T] = 0 \quad (40)$$

式中: $\psi(e_i) = \partial \rho / \partial e_i$ 为影响函数, 令 $\psi(e_i) / e_i = w_i$, 式(40)进一步写成:

$$\sum_{i=1}^m [s_i w_i e_i \nabla f_i(\mathbf{p}_0)^T] = 0 \quad (41)$$

将式(41)写成矩阵形式, 如下:

$$\mathbf{M} \mathbf{W} \boldsymbol{\Theta} = \mathbf{0} \quad (42)$$

式中: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_0 - x_i & y_0 - y_i & z_0 - z_i \\ f_i(\mathbf{p}_0) & f_i(\mathbf{p}_0) & f_i(\mathbf{p}_0) \end{bmatrix}$, 其中 $i = 1, 2, 3, 4$,

$\boldsymbol{\Theta} = [f_1(\mathbf{p}_0), f_2(\mathbf{p}_0), f_3(\mathbf{p}_0), f_4(\mathbf{p}_0)]^T$, $\mathbf{W} = \operatorname{diag}\{s_i w_i\}$ 表示等效加权矩阵, 其中 w_i 的值由等效权函数决定, 它决定了估计器的鲁棒性, 根据文献[27], 等效权函数使用 IGG 函数, 可表示成如下形式:

$$w_i = w(v_i) = \begin{cases} 1, & |v_i| \leq c \\ c/|v_i|, & |v_i| > c \end{cases} \quad (43)$$

式中: $v_i = \hat{d}_i - \|\mathbf{p} - \mathbf{a}_i\|$, 常数 c 的取值范围为 $[2.5, 3]$ 。进一步可得到:

$$\mathbf{M}^T \mathbf{W} \mathbf{M} \delta \mathbf{p} - \mathbf{M}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\Theta} = \mathbf{0} \quad (44)$$

根据 LS 原理, 可求得:

$$\delta \mathbf{p} = (\mathbf{M}^T \mathbf{W} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\Theta} \quad (45)$$

由式(45)的解可获得 $\boldsymbol{\varepsilon} = |\delta_x| + |\delta_y| + |\delta_z|$, 判断 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是否小于给定的阈值, 如果 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 大于阈值, 用式(46)的估

计值代替 p_0 , 继续循环迭代; 如果 ε 小于阈值, 则泰勒迭代停止, 式(46)的估计值作为定位终端的位置坐标为:

$$\hat{p} = p_0 + (M^T W M)^{-1} M^T W \Theta \quad (46)$$

然而, RTS 算法在观测周期内不考虑定位终端的位置变化情况, 对于静态定位, 可能会满足定位精度的要求, 然而对于动态定位, 仍然产生一定的偏差。因此, 提出将定位终端的移动速度作为参数融合到 RTS 算法中, 即 VRTS 算法, 若定位终端以速度 $v = (v_x, v_y, v_z)$ 做均匀运动, 观测时间内定位终端的位置坐标为:

$$X = x + v_x \Delta t, \quad Y = y + v_y \Delta t, \quad Z = z + v_z \Delta t \quad (47)$$

式中: Δt 表示相邻 2 个时间间隔。由于引入速度参数, 定位终端的位置 $p = (x, y, z)$ 和速度 $v = (v_x, v_y, v_z)$ 需要同时估计。将定位终端的速度参数嵌入到 RTS 算法中, 则定位终端的坐标位置为:

$$\tilde{p} = p_0 + (\tilde{M}^T W M)^{-1} \tilde{M}^T W \Theta \quad (48)$$

式中: $\tilde{f}_i(p_0)$, $\tilde{\delta p}$, $\tilde{\Theta}$ 和 $\tilde{M}$ 分别根据下式计算:

$$\nabla \tilde{f}_i(p_0) = \left[M, \frac{x_0 - x_i}{f_i(p_0)} \Delta t, \frac{y_0 - y_i}{f_i(p_0)} \Delta t, \frac{z_0 - z_i}{f_i(p_0)} \Delta t, \right] \quad (49)$$

$$\tilde{\delta p} = [\delta_x, \delta_y, \delta_z, v_x, v_y, v_z]^T \quad (50)$$

$$\tilde{\Theta} = [f_1(p_0), f_2(p_0), f_3(p_0), f_4(p_0), V_x, V_y, V_z]^T \quad (51)$$

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} M & \Delta t \times M \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (52)$$

式中: I_3 表示三阶单位矩阵。

2.4 定位性能评价

为了评价所提方法定位性能, 利用均方根误差 (RMSE) 作为定位精度的评价指标, 计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2} \quad (53)$$

式中: (x_r, y_r, z_r) 为定位终端的理论坐标, (x_i, y_i, z_i) 为定位算法求解的坐标; 进一步 3 个坐标轴上绝对误差为:

$$e_x = |x_i - x_r|, \quad e_y = |y_i - y_r|, \quad e_z = |z_i - z_r| \quad (54)$$

3 实验结果与分析

为了验证所提 CSUKF-VRTS 算法在 NLOS 场景的有效性 and 适用性, 采用美国 Time Domain 公司生产的 UWB P440 模块作为定位基站和定位终端模块^[26]。在中国矿业大学智能采掘装备中心开展模拟采煤机端头定位实验。为了更好的模拟 NLOS 场景的定位, 将一个定位基站的视距传播路径用煤块遮挡产生 NLOS 测距, 实验场景如图 4 所示。根据井下采煤机牵引速度范围, 设置定位终端的移动速度为 0.05 m/s。采用高精度莱卡激光测距仪标定每个基站的坐标, 4 个定位基站的位置坐标

分别为: AN1 (1.895, 0.662, 0.875), AN2 (-0.473, 1.471, 1.172), AN3 (0.335, 0.102, 2.063), AN4 (0.251, 0.034, 0.534)。为了突出 CSUKF-VRTS 算法的优越性, 对 LS 算法的定位结果分别采用 VRTS、UKF-VRTS 和 SRUKF-VRTS、CSUKF-VRTS 算法进行优化, 综合对比分析所提方法的定位性能。

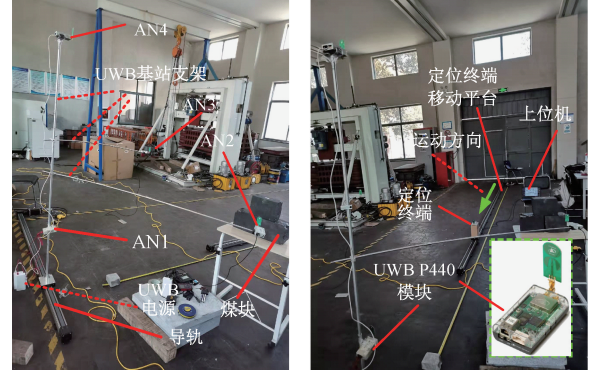


图 4 模拟采煤机的定位实验

Fig. 4 Positioning experiment for simulating the shearer

图 5 给出了不同算法的定位误差曲线。可以看出, CSUKF-VRTS 方法具有较低的定位误差, 定位性能明显优于其他 3 种方法。VRTS 算法定位误差最大, 该算法对初始值非常敏感, 由于在 NLOS 测距误差的干扰下, 采用 LS 算法很难获得较准确的初始值, 使得 VRTS 方法具有较大的误差。利用 UKF 算法对定位结果进行平滑处理, NLOS 误差对定位结果的影响有所降低, 但是定位误差依然较大。由于 SRUKF 算法的平滑性能优于 UKF 算法, 从而使得 SRUKF-VRTS 算法的定位精度比 UKF-RTS 算法的定位精度更高。在 CSUKF 算法中, 将 NLOS 状态下的测量距离作为约束条件, 融合到 SRUKF 算法中, 在每一步更新中将违反约束的 sigma 点投影到可行区域的边界上, 使得状态量的均值位于可行域内, 提升了位置估计精度, 使得 CSUKF-VRTS 方法的性能优于 SRUKF-VRTS 方法。

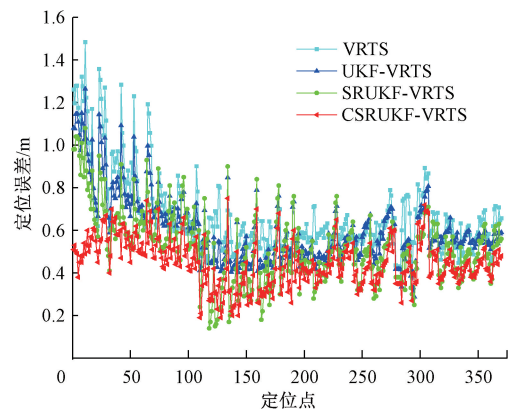


图 5 定位误差对比

Fig. 5 Comparison of positioning error

图6展示了不同算法的定位误差统计结果。可以看到,CSRUKEF-VRTS 算法的最大误差大幅降低,相较SRUKF-VRTS 算法、UKF-VRTS 算法和 VRTS 算法分别降低了 30.6%、40.7% 和 49.5%,定位精度得到明显改善。此外,CSRUKEF-VRTS 算法的平均精度最高,较前 3 种方法的平均精度分别提升了 14.7%、27.1% 和 33.1%;而且 CSRUKEF-VRTS 算法的定位误差标准差是最小的,比其他方法更易获得稳定的定位结果。在图5的基础上,计算了不同算法定位误差的 CDF 曲线,如图7所示。结果显示,CSRUKEF-VRTS 方法的定位精度高于其他几种方法。具体来说,当 CDF 达到 90% 时,VRTS、UKF-VRTS、SRUKF-VRTS、CSRUKEF-VRTS 方法的位置估计误差分别为 0.918、0.826、0.730 和 0.601 m,这些结果再次说明了同时融合 CSRUKEF 算法和考虑速度的 VRTS 方法能够显著抑制定位误差,有效的降低了 NLOS 环境中定位终端的位置误差,提升 UWB 系统的定位精度。

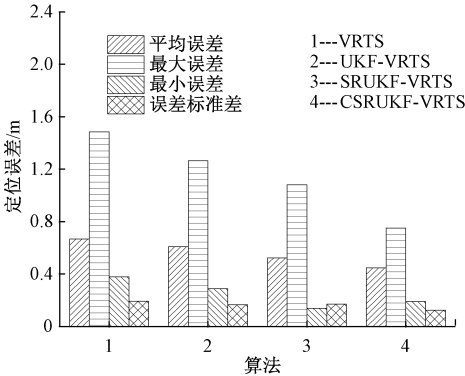


图6 不同算法的定位误差统计

Fig. 6 Positioning error statistics of different algorithms

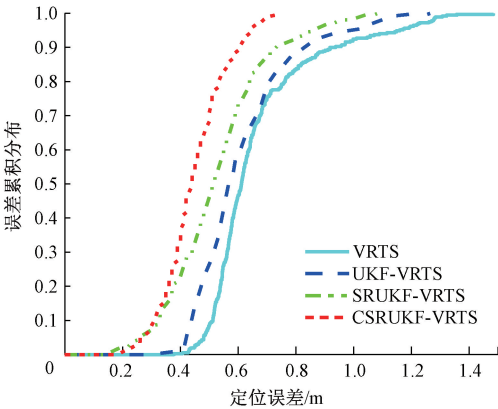
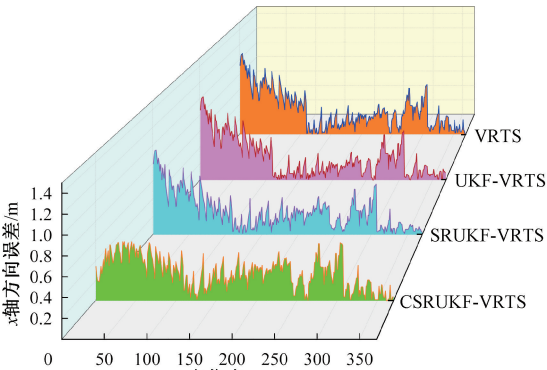


图7 不同算法的定位误差的 CDF 曲线

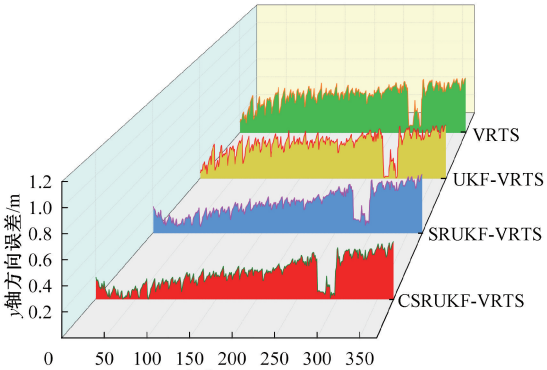
Fig. 7 CDF curves of the localization error of different algorithms

图8给出了4种算法的误差在3个坐标轴上分布曲线,表1计算了对应算法在3个坐标轴上的平均误差。

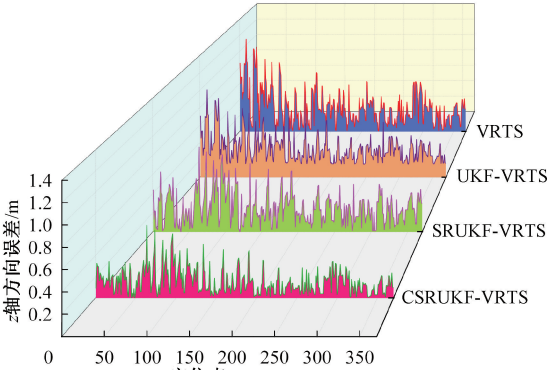
结果显示,不同算法的3个坐标轴的误差变化明显不同,VRTS 算法的3个坐标轴上的定位效果最糟糕,误差存在较大的波动,而且平均误差最大。CSRUKEF-VRST 算法的3个坐标轴上的精度明显优于其他3种方法。同时融合 CSRUKEF 算法和 VRTS 算法能有效的消减 NLOS 状态下3个坐标轴方向的误差,x轴、y轴和z轴的平均误差分别从 0.332、0.404 和 0.306 m 降低到 0.266、0.212 和 0.159 m,对应的平均精度分别提升了 17.4%、47.5% 和



(a) x轴方向误差
(a) x-axis direction error



(b) y轴方向误差
(b) y-axis direction error



(c) z轴方向误差
(c) z-axis direction error

图8 误差在3个坐标轴的分布情况

Fig. 8 Error distribution of three axes

48.1%,说明所提的算法具有较好的精度,尽管在某些定位点的误差较大,但是整体来看,CSRUKF-VRST 方法的 3 个坐标轴上的误差波动范围明显小于其他几种方法,表明 CSRUKF-VRTS 算法能够获得较好的定位效果。

表 1 3 个坐标轴上的平均误差

Table 1 Average error of three coordinate axes m				
平均误差	VRTS	UKF-VRTS	SRUKF-VRTS	CSRUKF-VRTS
x 轴	0.322	0.273	0.261	0.266
y 轴	0.404	0.344	0.272	0.212
z 轴	0.306	0.334	0.264	0.159

4 结 论

为了保证采煤机的长期定位精度,提出了采煤工作面端头自动校准惯性导航定位系统的方法,构建了基于 UWB 系统的井下局部位位系统,利用 UWB 系统提供的位置对采煤机自主导航系统自主纠偏提供基准,能够实现采煤机长期循环定位。针对 NLOS 环境下定位精度较低的问题,提出了 CSRUKF-VRTS 融合定位方法,首先将 NLOS 测量数据作为空间状态的约束条件,通过构建代价函数将 NLOS 条件的测量转化为约束问题,提高估计精度。同时,提出了基于考虑运动速度的抗差泰勒级数算法对定位结果进行优化,进一步削弱 NLOS 环境的干扰,提升定位终端的定位精度。实验结果表明,CSRUKF-VRTS 算法能减小定位误差,3 个坐标轴方向的平均误差大大降低,实现了 x 轴、 y 轴和 z 轴的平均定位精度分别提升了 17.4%、47.5%和 48.1%,所提的采煤工作面端头循环定位策略为采煤机实现长期自主定位提供新的思路,为非视距环境下的定位提供了一种较好的方法。

参考文献

[1] 葛世荣,郝雪弟,田凯,等. 采煤机自主导航截割原理及关键技术[J]. 煤炭学报,2021,46(3):774-788.
GE SH R,HAO X D,TIAN K,et al. Principle and key technology of autonomous navigation cutting for deep coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 774-788.

[2] 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.

[3] 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.

[4] SCHIFFBAUER W H. Navigation and control of continuous mining systems for coal mining [C]. IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 1996, 4: 2473-2479.

[5] SCHIFFBAUER W H. Accurate navigation and control of continuous mining machines for coal mining [J]. U. S. Dept of Health and Human Services, 1997,9642:11.

[6] REID P B, DUNN M T, REID D C, et al. Real-world automation: New capabilities for underground longwall mining [C]. Brisbane: Queensland University Fechnology,2010.

[7] SCHERZINGER B M. Inertial navigator error models for large heading uncertainty[C]. IEEE, 1996: 477-484.

[8] RALSTON J C, REID D C, DUNN M T, et al. Longwall automation: Delivering enabling technology to achieve safer and more productive underground mining [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(6): 865-876.

[9] 方新秋,何杰,张斌,等. 无人工作面采煤机自主定位系统[J]. 西安科技大学学报,2008,28(2):349-353.
FANG X Q, HE J, ZHANG B, et al. Self-positioning system of the shearer in unmanned workface[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2):349-353.

[10] FAN Q G,LI W,LUO CH M. Error analysis and reduction for shearer positioning using the strapdown inertial navigation system[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9(1): 49-54.

[11] 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 SH Q, LI ANG, WANG SH B, et al. Effects of shearer inertial navigation installation noncoincidence on shearer positioning error [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(8):1963-1968.

[12] 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.
- [13] CAO B, WANG SH B, GE SH R, et al. Improving positioning accuracy of UWB in complicated underground NLOS scenario using calibration, VBUKF, and WCA [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.
- [14] 张博渊, 王世博, 葛世荣. 惯性导航初始对准偏差与安装偏差对采煤机定位精度影响及其校准方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 789-795.
- ZHANG B Y, WANG SH B, GE SH R. Effects of initial alignment error and installation noncoincidence on the shearer positioning accuracy and calibration method [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 789-795.
- [15] 李荣冰, 王念曾, 刘建业, 等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 28-35.
- LI R B, WANG N Z, LIU J Y, et al. UWB ranging error estimation and compensation method for relative navigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 28-35.
- [16] 杨海, 李威, 张禾, 等. 复杂坏环境下基于 SINS/UWB 的容错组合定位技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2177-2185.
- YANG H, LI W, ZHANG H, et al. Fault tolerant integrated positioning system based on SINS/UWB in complex environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2177-2185.
- [17] FAN Q G, LI W, JING H, et al. Integrated positioning for coal mining machinery in enclosed underground mine based on SINS/WSN [J]. The Scientific World Journal, 2014(1): 460415.
- [18] 李倩, 蒋正华, 孙炎, 等. 基于因子图的 INS/UWB 室内行人紧组合定位技术[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 32-45.
- LI Q, JIANG ZH H, SUN Y, et al. INS/ UWB tight integrated localization technology for pedestrian indoor based on factor graph [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 32-45.
- [19] 胡悦, 李旭, 徐启敏, 等. 卫星拒止环境下基于因子图的智能车可靠定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 79-86.
- HU Y, LI X, XU Q M, et al. Reliable positioning method of intelligent vehicle based on factor map in satellite rejection environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 79-86.
- [20] 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研究[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1-8.
- XU X W, LAI J ZH, LYU P, et al. Research on the high-precision autonomous positioning method based on the improved factor graph of the measurements at both ends of shearer working face [J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1-8.
- [21] 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[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 218-224.
- ZHANG Z Y, FU SH CH, LIU CH, et al. Position detection system of shearer based on combined measurement of multiple sensing modes [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 218-224.
- [22] 沈国杰, 周德胜, 郑雪娜, 等. 基于 UWB 的矿井巷道精准三维定位系统设计[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(6): 80-84.
- SHEN G J, ZHOU D SH, ZHENG X N, et al. Design of precise 3D positioning system for mine roadway based on UWB [J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2020, 47(6): 80-84.
- [23] 张海军, 孙学成, 赵小虎, 等. 煤矿井下 UWB 人员定位系统研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(2): 29-34.
- ZHANG H J, SUN X CH, ZHAO X H, et al. Research on UWB personnel psotioning system in coal mine [J]. Industry and Mine Automatin, 2022, 48(2): 29-34.
- [24] 温良. 基于非视距鉴别的井下精确定位技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 109-115.
- WEN L. Study on accurate positioning technology in underground mine based on non line of sight distinguishment [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 109-115.
- [25] LI X H, ZHANG T L. Research on improved UWB localization algorithm in NLOS environment [C]. 2018 International Conference on Intelligent Transportation,

- Big Data & Smart City, IEEE, 2018; 707-711.
- [26] 曹波,王世博,葛世荣,等. 基于超宽带系统的采煤机端头定位策略及定位技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3):257-266.
- CAO B, WANG SH B, GE SH R, et al. Study on positioning strategy and technology at the end of shearer based on ultra-wideband system[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3):257-266.
- [27] WANG G, LI N, ZHANG Y. Maximum correntropy unscented Kalman and information filters for non-Gaussian measurement noise[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(18): 8659-8677.
- [28] LOFBERG J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004: 284-289.
- [29] BOYD S, BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [30] YANG Y X. Robust estimation for dependent observations [J]. Manuscripta Geodaetica, 1994, 19(1): 10-17.

作者简介



曹波, 2012 年于中国矿业大学获得学士学位, 2022 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为安徽科技学院讲师, 主要研究方向为机械装备智能化和导航定位。

E-mail: shanxi2008caobo@163.com

Cao Bo received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from China University of Mining and Technology in 2012 and 2022, respectively. He is currently a lecturer at Anhui Institute of Science and Technology. His main research interests include intelligent machine equipment, and navigation and positioning.



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和煤岩截割。

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 mining equipment intelligentization and coal-rock cutting.