

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518005

基于 RCTLS-ADMM 的 UWB 巷道内掘进机定位方法^{*}李之奇^{1,2} 刘振宇¹

(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870; 2. 沈阳科技学院信息与控制工程系 沈阳 110167)

摘 要: 煤矿巷道内智能化综掘是全球煤炭开采领域重要的研究方向,对于实现深层煤矿安全高效开采具有重要意义。悬臂式掘进机作为井下综掘的核心装备,其关键节点精准定位是实现智能化综掘亟待解决的技术难题。针对现阶段掘进机定位精度较低和鲁棒性差的问题,提出了正则化约束总体最小二乘法(RCTLS)和交替方向乘子法(ADMM)融合的到达时间差(TDOA)定位算法,构建了基于超宽带(UWB)技术的巷道内掘进机定位系统。考虑解析类 TDOA 算法容易受到测距误差的影响陷入局部最优解,提出将解析算法闭式解作为 ADMM 初值,利用双辅助变量对目标函数进行迭代实现掘进机核心节点定位。试验结果表明,在 UWB 基站和标签测距误差较大时,RCTLS-ADMM 在狭长空间将 X 轴、Y 轴和 Z 轴定位平均误差分别从 0.159 m、0.154 m 和 0.167 m 降低到 0.139 m、0.133 m 和 0.141 m,定位精度分别提高了 12.57%、13.64% 和 15.57%。提出的巷道内掘进机定位策略为实现掘进机自主主导提供了重要参数,具有实际应用价值。

关键词: UWB; TDOA; 交替方向乘子法; RCTLS; 智能化掘进; 定位算法; 鲁棒性

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

UWB positioning method for roadheader based on RCTLS-ADMM

Li Zhiqi^{1,2} Liu Zhenyu¹

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Department of Information and Control Engineering, Shenyang Institute of Science and Technology, Shenyang 110167, China)

Abstract: Intelligent integrated excitation in coal mine tunnels is a crucial research focus in the global coal mining industry, with significant implications for achieving safe and efficient extraction in deep coal mining operations. The boom-type roadheader, which serves as the primary equipment for underground excavation, currently faces a critical technological challenge: the precise positioning of its key nodes. Aiming to address the low positioning accuracy and poor robustness of roadheaders currently, an improved time difference of arrival (TDOA) fusion positioning algorithm based on regularized constrained total least squares (RCTLS) and alternating direction method of multiplier (ADMM) is proposed. Meanwhile, a positioning system of roadheader in tunnel based on ultra-wide band (UWB) is constructed. Considering the analytical TDOA algorithm easily falls into the local optima due to the ranging error, a closed-form solution of analytics is selected as the initial value of ADMM, and the objective function is iterated via dual auxiliary variables to achieve the positioning. The experimental result indicates that the RCTLS-ADMM enhances positioning accuracy by reducing the average positioning error of X, Y and Z axes from 0.159 m, 0.154 m, and 0.167 m to 0.139 m, 0.133 m, and 0.141 m, and improves the positioning accuracy by 12.57%, 13.64% and 15.57% respectively in long-narrow environments if the UWB ranging error is non-negligible. The positioning strategy of roadheader provides the significant parameters for achieving self-dominant control of roadheader and has practical applicated value.

Keywords: UWB; TDOA; alternating direction method of multiplier; RCTLS; intelligent excavation; positioning algorithm; robustness

0 引 言

煤炭是我国重要的基础能源,预计在 2030 年,煤炭在

我国一次能源消费结构中的占比将达到 55%^[1-2]。煤炭综掘包括地质勘探、巷道掘进、工作面回采,其中,巷道掘进是危险程度最高的前端环节^[3]。煤矿智能化、无人化开采是

收稿日期:2025-01-26

^{*} 基金项目:辽宁省自然科学基金(20180520022)、辽宁省教育厅基本科研项目(LJ222410142060)、辽宁省科学技术项目(2023JH2/101300225)资助

采掘领域技术未来发展方向^[4]。悬臂式掘进机作为集煤层截割、喷雾除尘、自行走功能于一体的大型综掘装置,是实现煤矿掘进的核心设备^[5-6]。高级智能的掘进机应具有自主定位导航和自适应截割的功能,其中实现掘进机关键节点定位是亟待解决的瓶颈。

当前,井下掘进机定位技术的研究主要聚焦于惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)^[7-8]、全站仪导航技术^[9]、激光定位技术^[10]、和超宽带(ultra wide band, UWB)定位技术^[11]。惯性导航定位通过获取掘进机机身坐标系的三轴加速度和角速度,经积分和变换后获得掘进机机身在巷道坐标系中的位置和位姿数据。但是系统的长时间工作会引起陀螺仪和加速度计漂移,导致无界定位误差的产生,无法保证定位系统长时间工作的可靠性和定位精度。全站仪导航技术相较于 IMU 可以获得更高的掘进机位姿检测精度,但是需要在复杂未知的环境中设置参考点,并且无法实时测量,目前没有在巷道内定位领域得到实际的应用。激光定位法利用激光扫描仪匀速扫描掘进机前方空间,当激光经过贴有发射带的目标靶时,激光束被反射并由光电检测装置检测,最终确定掘进机的位置。然而,煤矿巷道地面凹凸不平会导致激光束无法扫描到目标靶,需要停机后人工对激光系统进行校正,严重影响掘进的连续性。

UWB 是新兴的无线通信技术,在视距条件下能够实现厘米级测距精度,适合封闭空间定位系统开发^[12]。针对 UWB 空间定位的研究主要集中在两个层面,一是通过构造合理算法提高 UWB 标签的定位精度^[13];二是对 UWB 测距进行建模,以减小非视距和系统偏差的影响^[14]。文献[15]提出了 UWB 和 IMU 融合的煤矿井下定位算法,通过引入惯性置信参数对融合的传感器误差进行调整,将矢量差转换为角度参数,实现了卡尔曼滤波误差矩阵的自适应校正,该方法有效克服了 UWB 信号衰减和 IMU 累计误差。文献[16]为消除由于二阶项引起的 UWB 基站位置误差,建立了 UWB/MEMS 二阶测量模型,通过无迹卡尔曼滤波估计基站定位非线性的误差,实现了 UWB 基站位置的校准。文献[17]提出了 PSO 与 Chan 融合的定位算法,利用反向神经网络进行参数优化,系统仿真定位误差接近 2.7 cm,但是该方法还没有得到实际应用。

针对 UWB 系统求解双曲线方程的方法包括解析类和数值迭代算法。文献[18-19]指出当系统误差可控时,解析和数值迭代类算法均方误差(mean-square error, MSE)均能较好的接近克拉美罗下限(Cramer-Rao lower bound, CRLB)。文献[20]提出基站的几何布局是影响系统定位精度的重要因素,可以通过减小系统的几何精度因子(geometric dilution of precision, GDOP)来提高定位精度。UWB 测距误差的产生原因主要包括:多径效应、非视距(non line of sight, NLOS)误差、测距异常值干扰与 UWB 系统测距误差。其中,NLOS 误差和 UWB 系统测距误差

的影响最大,经典的超宽带 TDOA 针对 NLOS 误差减缓的方法有 Taylor 级数法、加权最小二乘法 and CHAN 算法等,但这些算法无法在 NLOS/LOS 环境中切换,因此定位精度仍然很低。当基站与标签测距误差较大时,TDOA 解析类算法易陷入局部最优解,系统定位性能急剧恶化。与解析式算法相比,在系统误差较大和基站群几何结构不理想的情况下,若能保证较好的初始解,数值迭代算法仍能保证定位精度。

为了应对在 UWB 基站几何分布不理想和测距误差较大的情况下,TDOA 解析类算法易陷入局部最优解,数值迭代算法对初始值要求高的问题。本文构建了基于 UWB 技术的掘进机关键节点定位系统,提出了 RCTLS-ADMM 定位策略,将解析类算法的闭式解作为迭代算法的初值,引入双辅助变量对目标函数进行迭代实现掘进机关键节点定位。在实际试验场地开展 UWB 测距试验,分析了 UWB 测距误差分布规律,并根据实验数据进行系统仿真验证了定位策略的有效性。

1 掘进机定位系统构建

1.1 UWB 定位技术分析

UWB 是指相对带宽超过 20% 的无线信号。相比传统无线通信技术,UWB 具有功耗低、测距精度高、抗多径干扰能力强、无需运营商的优点^[21]。UWB 技术在 GPS 拒止环境定位领域得到了较好的应用,根据测量原理的差异,可分为基于到达时间(time of arrival, TOA)^[22]、到达时间差(time difference of arrival, TDOA)^[23]、到达角度(angle of arrival, AOA)^[24]和接收信号强度标定(received signal strength indication, RSSI)^[25]4 种定位方式。

考虑到实际 UWB 各基站和标签之间无法实现绝对时间同步,设计中采用 TDOA 定位方式,只需测量各 UWB 基站到达标签信号的时间差,克服了 TOA 方法因系统时钟偏差引起定位精度降低的问题。选用矿用型 UWB 传感器,如图 1 所示,工作电压和电流为 DC4.2 V/200 mA,可配置移动电源供电,可通过 USB 接口完成程序扩展。

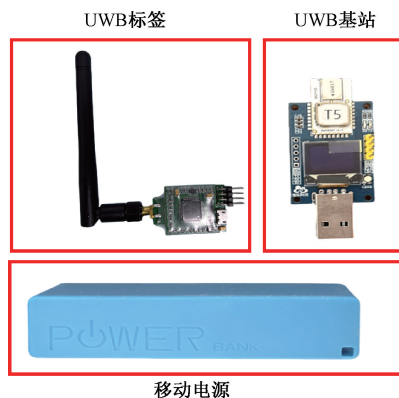


图 1 UWB 基站与标签实物图

Fig.1 Photograph of UWB anchor and tag

1.2 UWB 传感器分布和观测方程组建立

EBZ260H 悬臂式掘进机作业巷道截面规格约为 3 600 mm×4 400 mm。如图 2 所示,3 组 UWB 标签安装在掘进机本体部节点,编号为标签 A、B 和 C。掘进机后方布置 4 组 UWB 基站,编号为 1、2、3、4。采用可移动支架将基站固定于距离掘进机 25~30 m 范围内,呈直角正棱锥形分布。

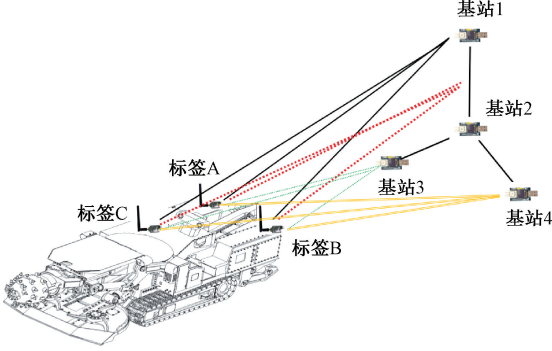


图 2 UWB 基站与标签位置分布图

Fig. 2 Layout diagram of UWB anchors and tags

根据 UWB 标签与基站的测距关系,可以建立关于 UWB 标签的 TDOA 观测方程组:

$$\|S_i^0 - T_j^0\|_2 - \|S_1^0 - T_j^0\|_2 = D_{i1} \quad (1)$$

式中: $S_i^0 = [x_i, y_i, z_i]$, $i = 1, 2, 3, 4$, 为基站三维坐标; $T_j^0 = [x_j, y_j, z_j]$, $j = A, B, C$, 代表 UWB 标签待求三维坐标; $\|\cdot\|_2$ 表示二范数; D_{i1} 为基站 i 和基站 1 与标签 j 的欧式距离之差。式(1)为非线性方程组,经线性化处理,可写成 $A\xi = b$ 的形式,如式(2)所示。

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & D_{21} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & D_{31} \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 & D_{41} \end{bmatrix} \\ \xi = \begin{bmatrix} x_j - x_1 \\ y_j - y_1 \\ z_j - z_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \\ b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - D_{21} \\ (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2 - D_{31} \\ (x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2 + (z_4 - z_1)^2 - D_{41} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_1 = \sqrt{(x_j - x_1)^2 + (y_j - y_1)^2 + (z_j - z_1)^2}$, 为标签与基站 1 的欧式距离。系数矩阵 A 和数据矩阵 b 中 D_{21} , D_{31} 和 D_{41} 包含 UWB 测距误差,可能导致矩阵的病态性,而对病态矩阵求逆的运算会显著导致定位降低,为了解决此问题,采用 RCTLS 估计 UWB 标签的初始空间位置。

2 掘进机定位系统构建

2.1 基于 RCTLS 解析定位

根据系数矩阵 A 和数据矩阵 b 的测距误差分布,引入

中间变量 $v_A = [0, 0, 0, \vartheta_A n]$, $v_b = [\vartheta_b n]$, 满足 $(A_0 + v_A)\xi = b_0 + v_b$ 。误差项 ϑ_A 和 ϑ_b 分别为:

$$\begin{cases} \vartheta_A = \text{diag} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial D_{21}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial z}\right)^2}, \right. \\ \quad \sqrt{\left(\frac{\partial D_{31}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial z}\right)^2}, \\ \quad \left. \sqrt{\left(\frac{\partial D_{41}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{41}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{41}}{\partial z}\right)^2} \right) \\ \vartheta_b = -\text{diag} \left(\sqrt{\left(\frac{\partial D_{21}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{21}}{\partial z}\right)^2}, \right. \\ \quad -\sqrt{\left(\frac{\partial D_{31}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{31}}{\partial z}\right)^2}, \\ \quad \left. -\sqrt{\left(\frac{\partial D_{41}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{41}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{41}}{\partial z}\right)^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

v_A 和 v_b 项中 n 为随机误差向量,为降低数据之间相关度,需要做白化处理^[26]:令 $Q = E[n \cdot n^T]$, 对 Q 进行 Cholesky 分解得到 $Q = PP^T$, 最终得到随机误差 n 的白化向量 $\tilde{\omega} = P^{-1}n$ 。为提高系统鲁棒性和较少由于降正则化引起的系统高定位误差,选取 $\min_{n,b} \|n\|_2^2 + \lambda \|b\|_2^2$ 作为目标函数,以包含所测 UWB 标签位置信息矩阵作为约束条件,则就 RCTLS 的 TDOA 定位问题可以构造为式(4)的形式。为使本策略在 UWB 基站数量多于 4 个条件下同样适用,取 $D = D_1 \vartheta_A + \vartheta_b$, $D^+ = (DD^T)^{-1}D^T$, $n = D^+(A\xi - b)$, 其中, D^+ 为矩阵 D 的 Moore-penrose 广义逆。 λ 为正则系数,用于增强对噪声的抑制,防止模型的过拟合,其初始值设置为 0.3。定义残差 $\|A\xi - b\|$, λ 保持与残差相同的变化趋势,变化区间为 $[0, 1]$ 。当 λ 为零时,返回为 CTLS。

$$\begin{cases} \min_{n,b} \|n\|_2^2 + \lambda \|b\|_2^2 \\ s.t. A\xi - b = Dn \end{cases} \quad (4)$$

2.2 基于 ADMM 迭代解算

ADMM 用于解决具有可分离结构的凸优化问题,如图像恢复和分布式网络场景设计。ADMM 的目标函数具有可分解性,同时确保 Lagrange 函数不是完全独立的,通过增加线性二次增广项作为约束以达到整体的最优解,这种机制保证了 ADMM 具有很好的收敛性^[27]。根据式(4)目标函数和约束条件,构造等价函数形式:

$$G(\xi) = (A\xi - b)^T (DD^T)^{-1} (A\xi - b) + \lambda \xi^T \xi \quad (5)$$

将上式构造出目标函数和约束函数完全可分离的线性凸优化形式,将系数矩阵分解为 $A = [H_3, H_1]$ 的形式, H_3 和 H_1 分别为系数矩阵 A 的前 3 列和第 4 列。设置中间参数 $e = [x_j - x_1, y_j - y_1, z_j - z_1]^T$ 和 $f = |T_j^0 - S_1^0|$, 将式(5)改写为增广 Lagrange 函数形式:

$$\begin{aligned} L_\rho(e, f, \beta) &= f(e, f) + \frac{\rho}{2} \|(e^T e)^{\frac{1}{2}} - f + \frac{\beta}{\rho}\|_2^2 - \\ &\frac{\|\beta\|_2^2}{2\rho} = f(e, f) + \frac{\rho}{2} \|(e^T e)^{\frac{1}{2}} - f + \omega\|_2^2 - \frac{\rho \|\omega\|_2^2}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:增广项用来检验决策变量是否满足约束条件, ρ 为罚参数,用于调节增广函数中的各项权重,控制 ADMM 的收敛方向。 β 为 Lagrange 乘子, $\omega = \beta/\rho$ 。对式(6)进行 ADMM 双辅助变量迭代,迭代过程如式(7)所示。

$$\begin{cases} e^{k+1} := \operatorname{argmin}_u L_\rho(e, f^{(k)}, \beta^{(k)}) \\ f^{k+1} := \operatorname{argmin}_f L_\rho(e^{(k+1)}, f, \beta^{(k)}) \\ \beta^{k+1} := \beta^{(k)} + \rho[(e^{(k+1)})^T e^{(k+1)}]^{1/2} - f^{(k+1)} \end{cases} \quad (7)$$

式中:罚参数 ρ 取正数,初始值设置为 1,设计中每迭代 10 次,检验增广项的变化率,若变化缓慢,则 ρ 扩大为原来的 1.3 倍,范围区间为 $[1, 25]$ 。由于 $L_\rho(e, f, \beta)$ 的非线性,设计中采用牛顿法进行求解。在此说明决策变量 e 的更新迭代过程:将式(6)在初始解处进行泰勒级数展开,忽略二阶以上项,并令 $L_\rho(e, f^{(k)}, \beta^{(k)})$ 对 e 的偏导等于 0,得到式(8)。

$$\frac{\partial L_\rho(e^{(k)}, f^{(k)}, \beta^{(k)})}{\partial e} + \frac{\partial^2 L_\rho(e^{(k)}, f^{(k)}, \beta^{(k)})}{\partial e^T \partial e} (e - e^{(k)}) = 0 \quad (8)$$

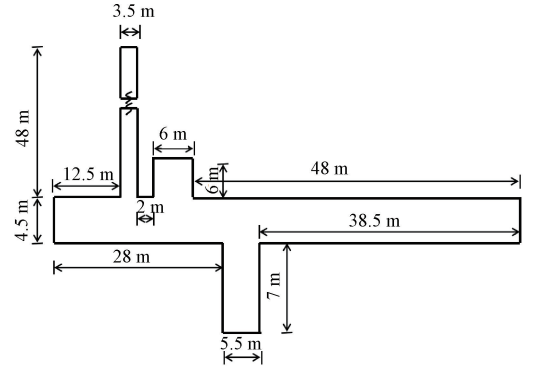
可以证明上式在第 k 次迭代解 $e^{(k)}$ 的某邻域内连续,且同时满足 $|\varphi'(u^{(k)})| < 1$,表明在系统误差可控时,文中提出的对决策变量 e 的迭代方法 $u^{(k)}$ 处附近收敛,且收敛阶数至少为 2 阶。

3 试验与结果分析

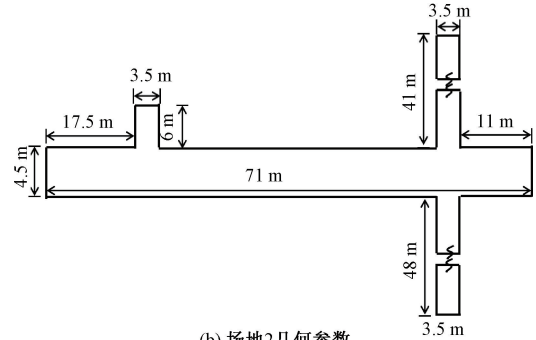
3.1 矿用型 UWB 测距试验

UWB 系统定位精度主要取决于测距误差的影响,根据观测方程组系统误差分布,需要评估测距误差范围。选取两处高度为 5 m,长度约 70 m,几何构造不同的狭长密闭空间模拟巷道密集多径环境,场地 1 和场地 2 几何参数如图 3 所示。将 UWB 标签 A 固定与支架上,4 组基站置于标签后方。设置 UWB 中心频率 4.7 GHz,频谱范围 3.8~5.6 GHz,通过操作软件将 UWB 基站 1 初始化为为主站,配置目标地址为 192.168.10.200,端口号为 3000,信道容量为 10 kbps,配置标签 A 端口号 3010。测距现场如图 4 所示,每组测距距离测量 200 次,根据 3σ 准则剔除粗大误差后,计算 UWB 标签与基站距离平均值。设置莱卡 D2 激光测距仪工作在后端测距模式,标定基站与标签距离,得到数据如表 1 所示。

绘制两个场地的 UWB 测量和标定的测距绝对误差样条曲线。如图 5 所示,场地 1 和场地 2 的 UWB 测距误差的第一个峰值均出现在 UWB 基站右,这是因为 UWB 系统同步偏移对测距造成了影响。场地 1 在测距距离 20 m 和 32 m 附近出现绝对误差峰值,场地 2 分别在 26 m 和 45 m 处出现绝对误差峰值,从图 3 场地结构可以看出, UWB 测距误差与环境变化有关,即从四周全封闭环境变为某一方向的非全封闭环境。从表 1 数据可以看出, UWB 测距标定值与测量值之间绝对误差范围在 0.24 m 左右,



(a) 场地1几何参数
(a) Geometric parameters of site 1



(b) 场地2几何参数
(b) Geometric parameters of site 2

图 3 测距场地几何参数

Fig. 3 Geometric parameters of ranging measurement site



图 4 UWB 距离标定现场

Fig. 4 UWB ranging calibration site

D_{21} 表现出测量值与校准值一致的变化趋势,这是由于 TDOA 过程中不同基站与标签测距做减法运算抵消了各自的测距误差。可以看出,观测方程中的 TDOA 误差项 D_{21} 、 D_{31} 和 D_{41} 可以满足后续计算的精度要求。

3.2 系统定位精度分析

为了评估本方法的定位性能,利用 Matlab 平台进行系统仿真实验。假设在巷道区域布置传感器网络,包括 4 组 UWB 基站和 3 组标签,共 7 个传感器。将基站 1 设置为 TDOA 主站,4 组基站呈直角正棱锥形状分布,确保不因为基站位于同一平面导致定位精度降低^[28],坐标分别设置为 $1(0, 0, 1)$ 、 $2(0, 0, 0)$ 、 $3(-1, 1, 0)$ 和 $4(1, 1, 0)$ 。标签位置分

表 1 UWB 测距和距离标定数据

Table 1 UWB ranging and distance calibration data

测距 距离/m	场地 1				场地 2			
	标签 A 与基站 1	标签 A 与基站 2	D ₂₁ 标定	D ₂₁	标签 A 与基站 1	标签 A 与基站 2	D ₂₁ 标定	D ₂₁
	测距误差/m	测距误差/m	数值/m	测量值/m	测距误差/m	测距误差/m	数值/m	测量值/m
3.013	0.268	0.269	0.608	0.609	0.268	0.260	0.608	0.604
7.003	0.253	0.257	0.599	0.603	0.286	0.288	0.614	0.616
13.099	0.232	0.241	0.601	0.607	0.269	0.256	0.607	0.602
18.170	0.278	0.270	0.603	0.595	0.221	0.223	0.610	0.612
23.090	0.272	0.275	0.604	0.607	0.236	0.233	0.603	0.600
29.021	0.251	0.258	0.590	0.597	0.248	0.239	0.605	0.604
33.187	0.210	0.207	0.602	0.599	0.208	0.203	0.617	0.612
39.190	0.189	0.193	0.602	0.606	0.200	0.192	0.613	0.605
42.014	0.210	0.211	0.608	0.609	0.214	0.205	0.606	0.602
45.108	0.228	0.230	0.594	0.596	0.229	0.221	0.614	0.606
51.122	0.200	0.204	0.597	0.601	0.201	0.205	0.606	0.61
54.015	0.222	0.218	0.594	0.590	0.218	0.222	0.609	0.613
62.070	0.232	0.234	0.602	0.604	0.207	0.211	0.607	0.611
69.011	0.260	0.272	0.599	0.603	0.258	0.252	0.612	0.606

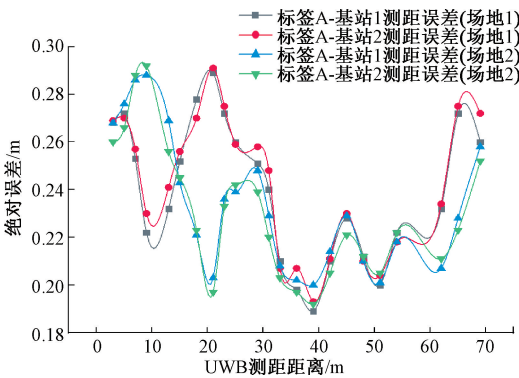


图 5 UWB 测距误差变化曲线

Fig. 5 Variation curves of ranging error

别设置为设置为 $A(0,y_A,0)$ 、 $B(0,y_B,0)$ 和 $C(0,y_C,0)$ ，测试距离 3~70 m。依据测距试验数据引入误差，假设不同测距误差之间相互独立，使用 RCTLS-ADMM 方法对 UWB 标签进行定位，分别计算 X 、 Y 和 Z 轴定位误差，如图 6 所示。测距距离从 3~70 m 移动过程中， X 和 Y 轴的定位误差分别保持在 0.139~0.182 m 和 0.133~0.187 m 的范围，定位误差与定位距离没有表现出明显的关联。 Z 轴定位误差随测量距离的增加呈现出先减小再增大的趋势，在 43 m 处达到最小值 0.141 m。

为对比 RCTLS 经 ADMM 迭代后的定位精度提高效果，随机选取 (1.5, 23, 2) 作为 UWB 标签参考定位坐标。分别利用 RCTLS 和 RCTLS-ADMM 对标签进行定位，根据测距试验数据引入误差，定位结果的巷道坐标系 X - Y 、 X - Z 和 Y - Z 方向投影如图 7~9 所示。可以看出经

ADMM 迭代后，RCTLS 的定位误差有效减小。

为对比 RCTLS-ADMM 与传统 TDOA 算法，采用 Monte Carlo 方法进行随机试验，以均方误差 (MSE) 和累计分布函数 (CDF) 作为定位性能评估指标，其中均方误差计算公式如式 (9)，设置 $L=200$ 。CDF 将某一定位误差作为阈值条件，统计低于阈值误差的次数占总定位次数的比例，CDF 的上升趋势的快慢可以作为定位系统鲁棒性的判断依据。在相同的条件下与 CHAN (标注为 TDOA-CHAN)、RCTLS (标注为 TDOA-RCTLS) 和 LS (标注为 TDOA-LS) 定位算法进行比较。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^L \| \hat{T}_j^{(n)} - T_j^0 \| / L$$

(9)

对比试验 1: 将基站坐标设置为 1(0,0,5)、2(0,0,0)、3(-5,5,0) 和 4(5,5,0)，根据测距试验数据设置 UWB 基站与标签测距误差范围，UWB 标签 A 真实坐标为 $A(0,41,0)$ ，进行定位算法对比仿真，结果如图 10、11 所示。

对比试验 2: UWB 基站分布在同一平面，以降低定位精度，坐标分别设置为 1(0,0,5)、2(0,0,0)、3(-5,5,0) 和 4(5,5,0)，将 UWB 基站与标签测距误差扩大为原来的 1.3 倍，UWB 标签 A 真实坐标为 $A(0,30,0)$ ，进行定位算法对比仿真，结果如图 12、13 所示。

对比试验 1 和实验 2 的结果，RCTLS-ADMM 将解析算法结果作为迭代算法的初解，相比 RCTLS 获得了更高的定位精度。在测距误差较小时，各算法性能接近，但随着测距误差增大，文中算法的 MSE 偏差小于其他算法，更加接近 CRLB。相比于 RCTLS， X 轴、 Y 轴和 Z 轴精度分别提高了 12.57%、13.64% 和 15.57%。从图 11 和图 13

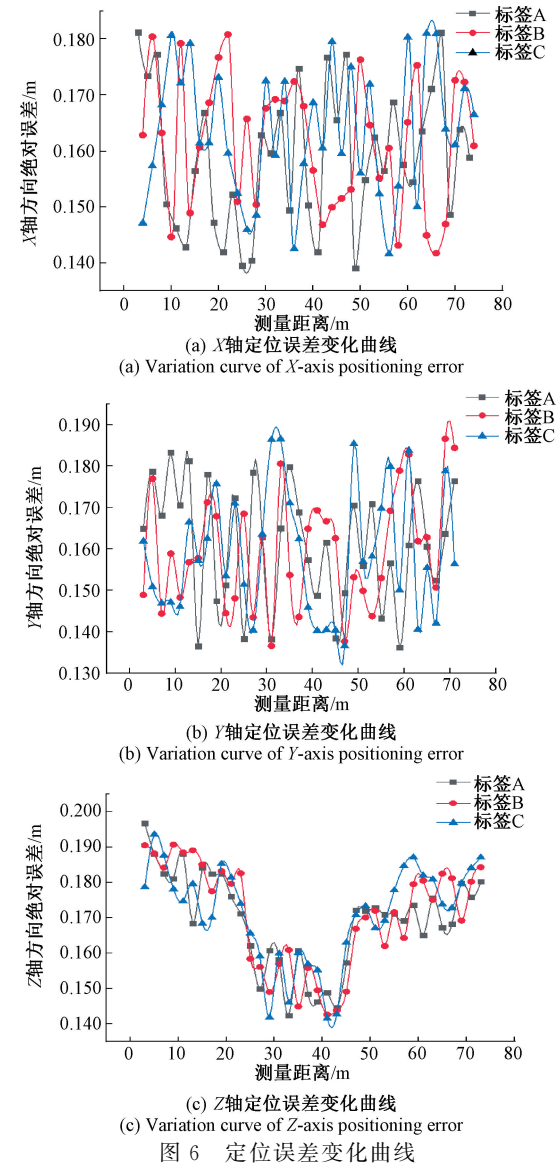


Fig. 6 Variation curve of positioning error

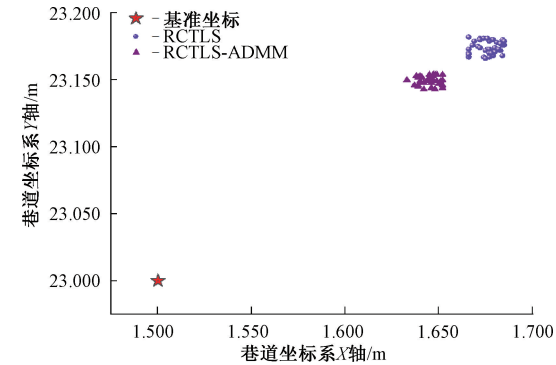


图 7 (1.5, 23, 2)处 UWB 标签 X - Y 方向投影
Fig. 7 X - Y projection of UWB tag at (1.5, 23, 2)

可以看出, RCTLS-ADMM 定位误差低于阈值占总定位次数的比例高于其他算法, CDF 的上升趋势快于其他算法,

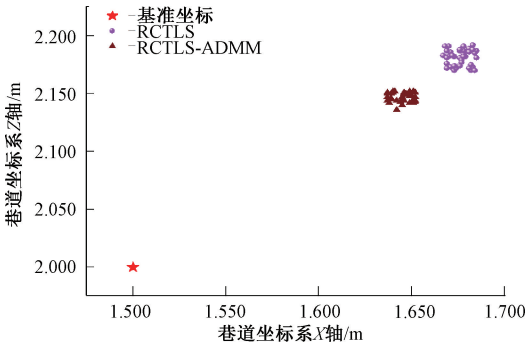


图 8 (1.5, 23, 2)处 UWB 标签 X - Z 方向投影
Fig. 8 X - Z projection of UWB tag at (1.5, 23, 2)

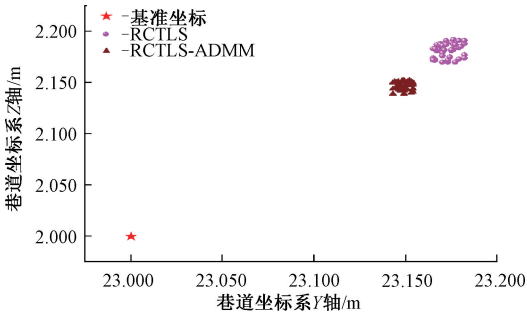


图 9 (1.5, 23, 2)处 UWB 标签 Y - Z 方向投影
Fig. 9 Y - Z projection of UWB tag at (1.5, 23, 2)

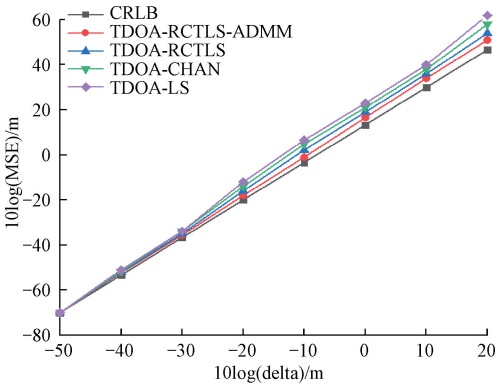


图 10 试验 1 均方误差对比
Fig. 10 MSE comparison in experiment 1

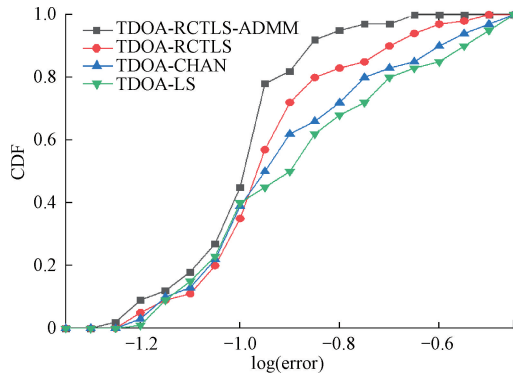


图 11 试验 1 累积分布函数对比
Fig. 11 CDF comparison in experiment 1

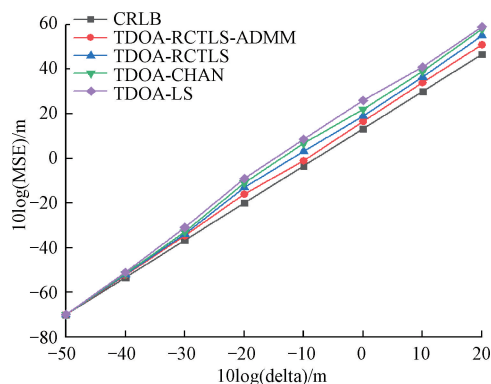


图 12 试验 2 均方误差对比

Fig. 12 MSE comparison in experiment 2

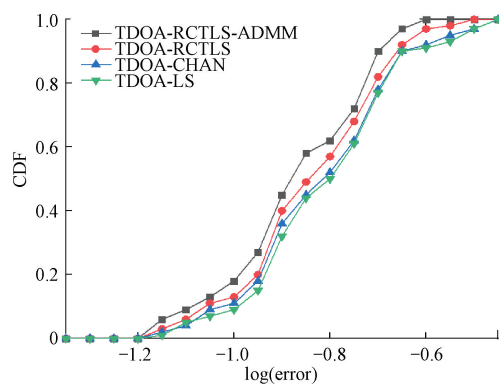


图 13 试验 2 累积分布函数对比

Fig. 13 CDF comparison in experiment 2

表明文中定位系统的鲁棒性更优,能够更好的应对适应高噪声、高测距误差情况。

4 结 论

本文构建了基于 UWB 技术的巷道内掘进机定位系统。针对现有 TDOA 解析类算法因测距误差较大和基站几何分布不理想导致定位精度低的问题,提出了 RCTLS-ADMM 的掘进机关键节点定位算法,将解析算法 RCTLS 的闭式解作为 ADMM 初值,利用双辅助变量对目标函数进行迭代实现掘进机关键节点定位。试验结果表明,相比 RCTLS,文中方法 X、Y 和 Z 轴定位的平均误差分别由 0.159 m、0.154 和 0.167 m 降低到 0.139 m、0.133 m 和 0.141 m,平均精度分别提高了 12.57%、13.64% 和 15.57%,RCTLS-ADMM 能有效提升 UWB 系统定位精度,为实现掘进机自主导控提供了重要参数,具有实际应用价值。

参考文献

- [1] 张旭辉,沈奇峰,杨文娟,等.基于三激光点靶的掘进机机身视觉定位技术研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(6):178-186.
- ZHANG X H, SHEN Q F, YANG W J, et al.

Research on visual positioning technology of roadheader body based on three laser point target[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(6): 178-186.

- [2] CHENG F Q, ZHANG Y Y, ZHANG G Q, et al. Eliminating environmental impact of coal mining wastes and coal processing by-products by high temperature oxy-fuel CFB combustion for clean power Generation: A review[J]. Fuel, 2024, 373: 132341.
- [3] 王国法,杜毅博,任怀伟,等.智能化煤矿顶层设计研究与实践[J].煤炭学报,2020,45(6):1909-1924.
- WANG G F, DU Y B, REN H W, et al. Top level design and practice of smart coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020,45(6):1909-1924.
- [4] 曹波,王世博,鲁程.基于 UWB 系统的采煤工作面端头采煤机自主定位方法研究[J].仪器仪表学报,2022,43(10):108-117.
- CAO B, WANG SH B, LU CH. Research on the shearer autonomous localization method based on UWB system at the end of coal mining working face[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(10):108-117.
- [5] 许吉祥,阮大志,马天兵,等.基于 PSO 优化的悬臂式掘进机自适应控制研究[J].煤矿机械,2024,45(11):150-153.
- XU J CH, RUAN D ZH, MA T B, et al. Research on adaptive control of cantilever type roadheader based on PSO optimization[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(11):150-153.
- [6] 李之奇,纪英俊,陈香敏,等.基于约束总体最小二乘法的超宽带掘进机定位算法研究[J].电子设计工程,2024,32(20):144-148.
- LI ZH Q, JI Y J, CHEN X M, et al. Research on roadheader positioning algorithm based on UWB constrained total least squares[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(20):144-148.
- [7] SI L, WANG ZH B, DONG W, et al. Fusion positioning of mobile equipment in underground coal mine based on redundant IMUs and UWB[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 20(4):5946-5958.
- [8] 马艾强,姚顽强,蔺小虎,等.面向煤矿巷道环境的 LiDAR 与 IMU 融合定位与建图方法[J].工矿自动化,2022,48(12):49-56.
- MA AI Q, YAO W Q, LIN X H, et al. Coal mine roadway environment-oriented LiDAR and IMU fusion positioning and mapping method[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12):49-56.
- [9] 马宏伟,王世斌,毛清华,等.煤矿巷道智能掘进关

- 键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310-320.
- MA H W, WANG SH B, MAO Q H, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310-320.
- [10] 杨文娟, 张旭辉, 张超, 等. 基于三激光束标靶的煤矿井下长距离视觉定位方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 986-1001.
- YANG W J, ZHANG X H, ZHANG CH, et al. Long distance vision localization method based on triple laser beams target in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 986-1001.
- [11] 王红尧, 郑鸿林, 田劫, 等. 面向矿井动目标的 PSO-SVR 模型与 UWB CHAN 优化距离指纹融合定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 106-114.
- WANG H Y, ZHENG H L, TIAN J, et al. Fusion location method of PSO-SVR model and UWB chanoptimal fingerprint matching for mine moving target[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(7): 106-114.
- [12] 童继生. 三维定位的井中雷达天线关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- TONG J SH. Study on key techniques of antennas for 3-D positioning borehole radar [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [13] 窦占树, 崔丽珍, 洪金祥, 等. 煤矿井下动态环境下的改进 OSELM 定位算法[J]. 测绘通报, 2023(5): 90-95.
- DOU ZH SH, CUI L ZH, HONG J X, et al. Improved OSELM localization algorithm in dynamic environment of underground cola mine[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(5): 90-95.
- [14] 瞿智, 张慧晴, 陈建云. 基于 UWB 的无线网络精密时钟同步设计[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6): 86-92.
- QU ZH, ZHANG H Q, CHEN J Y. Design of UWB wireless network precision clock synchronization[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(6): 86-92.
- [15] YUAN G, SHI S Y, SHEN G, et al. MIAKF: Motion inertia estimated adaptive kalman filtering for underground mine tunnel positioning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-11.
- [16] QI M Y, XUE B, WANG W. Calibration and compensation of anchor positions for UWB indoor localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 24(1): 689-699.
- [17] LAKSHMI Y V, SINGH P, ABOUHAWWASH M, et al. Improved Chan algorithm based optimum UWB sensor node localization using hybrid particle swarm optimization[J]. IEEE Access, 2022, 10: 32546-32565.
- [18] 夏俊辉, 李杰, 罗飞舟, 等. 基于 FPGA 的 UWB 隧道内人员定位系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2024, 47(1): 7-13.
- XIA J H, LI J, LUO F ZH, et al. Design and implementation of UWB tunnel personnel positioning system based on FPGA [J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(1): 7-13.
- [19] 孟天次, 张贞凯, 林云航. 一种改进两步加权最小二乘的 TDOA 定位算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(6): 782-787.
- MENG T C, ZHANG ZH K, LIN Y H. An improved two-step weighted least squares TDOA location algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(6): 782-787.
- [20] 王帅帅, 贾学东, 陈国军, 等. 声波室内定位系统中基站几何布局探究[J]. 导航定位学报, 2020, 8(2): 12-17, 35.
- WANG SH SH, JIA X D, CHEN G J, et al. Discussion on geometrical layout of base station in acoustic indoor positioning system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 8(2): 12-17, 35.
- [21] 黄琴, 兰小机, 夏益强, 等. Chan-IDW 算法在信号干扰下的 UWB 精确定位研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 1-7.
- HUANG Q, LAN X J, XIA Y Q, et al. UWB of Chan-IDW algorithm under signal interference research on precise positioning [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 1-7.
- [22] ZHANG SH N, WANG ER SH, ZHU ZH CH, et al. UKF-FNN-RIC: A highly accurate UWB localization algorithm for TOA scenario [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.
- [23] AI-KHADDOUR M, ALI M, YOUSEF M. Line-of-sight aware accurate collaborative localization based on joint TDoA and AoA measurements in UWB-MIMO environment[J]. Cluster Computing, 2024, 27: 7637-7655.
- [24] NASERI M, SHAHID A, POORTER E D. Adapting UWB AoA estimation towards unseen environments using transfer learning and data augmentation [J]. Internet of Things, 2024, 27: 102398.
- [25] SU ZH R, PAHLAVAN K, AGU E, et al.

- Proximity detection during epidemics: direct UWB TOA versus machine learning based RSSI [J]. International Journal of Wireless Information Networks, 2022, 29: 480-490.
- [26] 国强, 李文韬. 基于正则化约束总体最小二乘的 TDOA/FDOA 无源定位方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(5): 81-87.
- GUO Q, LI W T. Passive TDOA/FDOA location based on regularized constrained total least squares[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(5): 81-87.
- [27] WANG Y, LIAN H. On linear convergence of ADMM for decentralized quantile regression[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2023, 71: 3945-3955.
- [28] 曹波. 采煤机惯导与超宽带融合定位方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- CAO B. Research on fusion localization approach of IMU and ultra-wideband for shearer [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

作者简介

李之奇, 博士研究生, 主要研究方向为超宽带定位与姿态感知、深度学习。

E-mail: lizhiqi_77@163.com

刘振宇(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人导航及视觉伺服。

E-mail: liuzhenyu@sut.edu.cn