

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0140-05

基于改进近邻传播算法的露天煤矿人员定位方法

徐长友¹, 孟祥春¹, 孙少山¹, 李昕龙¹, 孙 龙²

(1. 内蒙古电投能源股份有限公司, 内蒙古 通辽 028000; 2. 中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 沈阳 110000)

摘要:为解决目前露天煤矿人员定位方法计算量大、精度低等问题,提出一种改进的露天煤矿人员定位方法。研究首先引入区域划分思想,将近邻传播算法均匀分布在子区域,之后结合高斯卡波算法和链路质量指示滤波器分别对离线阶段和在线阶段接收信号强度指示数据进行滤波处理。由此得到改进后的近邻传播算法。最后基于该算法,在 Android 平台构建人员定位系统。为验证策略有效性,文章设计仿真测试实验。实验结果表明,改进算法定位最大误差、最小误差、平均误差值分别为 1.65 m、1.49 m 和 1.04 m。在噪声环境影响下,其定位误差变化仅为 35%,误差值增长最大不超过 0.05m。相较于其他算法,其受影响程度更低。在功能测试中,7 个测试用例表现均符合预期,能够有效实现煤矿作业人员的精准定位。由此可知,所提策略的定位精度和收敛性能得到极大提升,能够精准定位煤矿作业人员位置轨迹,对矿山安全管理具有较强的应用价值。

关键词:近邻传播算法;定位技术;区域划分;高斯滤波算法;露天煤矿;安全管理

中图分类号: TP274; TN824

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0140-05

Personnel positioning method of open-pit coal mine based on improved affinity propagation algorithm

Xu Changyou¹, Meng Xiangchun¹, Sun Shaoshan¹, Li Xinlong¹, Sun Long²

(1. InnerMongolia Power Investment Energy Co., Ltd., Tongliao 028000, Neimenggu, China;

2. China Coal Technology Engineering Group (CCTEG), Shenyang Engineering Company, Shenyang 110000, China)

Abstract: To solve the problems of large computational complexity and low accuracy in current open-pit coal mine personnel positioning methods, this paper proposes an improved open-pit coal mine personnel positioning method. The study first introduces the idea of region partitioning, which evenly distributes the nearest neighbor propagation algorithm in sub regions. Then, it combines Gaussian Capo algorithm and link quality indicator filter to filter the received signal strength indicator data in offline and online stages, respectively. Thus, an improved nearest neighbor propagation algorithm is obtained. Finally, based on this algorithm, a personnel positioning system is constructed on the Android platform. To verify the effectiveness of the strategy, the article designs simulation testing experiments. The experimental results indicate that, the maximum error, minimum error, and average error values of the improved algorithm for localization are 1.65 m, 1.49 m, and 1.04 m, respectively. Under the influence of noise environment, the variation of its localization error is only 35%, and the maximum increase in error value does not exceed 0.05 m. Compared with other algorithms, its degree of influence is lower. In the functional testing, all 7 test cases performed as expected, effectively achieving precise positioning of coal mine operators. From this, it can be seen that the positioning accuracy and convergence performance of the proposed strategy are greatly improved, which can accurately locate the position trajectory of coal mine operators and has strong application value for mine safety management.

Keywords: neighborhood propagation algorithm; positioning technology; area division; Gaussian filtering algorithm; open-pit coal mine; safety management

在露天煤矿作业中,人员安全与生产效率是矿山管理的两大核心要素。由于露天煤矿环境复杂多变、危险程度高,煤矿人员定位监测成为提升矿山管理水平的重要手段^[1]。目前,针对人员定位算法的研究,国内外学者多结合接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)和距离矢量跳跃对算法进行改进优化,提高人员定

位精度及覆盖率。母西军等^[2]为解决隧道定位精度差的问题,提出了高精度的快速人员定位方法,通过改进 RSSI 测距与时间实现快速定位。研究表明,该方法提高了测距精度及效率。Pino-Ortega 等^[3]针对篮球球员室内定位,提出基于超宽带系统的人员定位方法,结合多天线超宽带和距离矢量跳跃进行点定位。实验结果表明,该方法的定位

收稿日期:2024-12-20;录用日期:2025-01-23

基金项目:辽宁省自然科学基金面上项目(2023-MS-342)

作者简介:徐长友(1972—),男,硕士,高级工程师,研究方向:露天采矿技术、安全生产、智能矿山、设备管理。

通信作者:李昕龙(1988—),男,工程师,研究方向:机械设计制造及其自动化、科技信息化。

引用本文:徐长友,孟祥春,孙少山,等. 基于改进近邻传播算法的露天煤矿人员定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 140-144. (Xu Changyou, Meng Xiangchun, Sun Shaoshan, et al. Personnel positioning method of open-pit coal mine based on improved affinity propagation algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 140-144.)

幅度差为0.21%。然而受煤矿环境影响,现有人员定位技术的计算量较大、鲁棒性较弱、准确度有待提升。对此,基于近邻信息传递的聚类算法(affinity propagation, AP)无须预设聚类数、能够自动发现聚类中心,在处理大规模的人员定位数据方面颇具优势,但是其易受环境噪声干扰且计算复杂度高。在此背景下,文章提出一种基于改进近邻传播算法的露天煤矿人员定位策略,通过创新地引入区域划分思想和高斯滤波算法优化定位算法结构,同时搭建煤矿人员定位系统,期望为露天煤矿员工安全保驾护航,促进矿山管理向智能化、高效化迈进。

1 露天煤矿人员定位方法设计

1.1 近邻传播算法的改进策略

近邻传播算法是由 Dueck 等^[4]于2007年提出的一种半监督聚类算法,其通过数据点间的相似度矩阵传递信息,自动确定聚类中心和聚类成员,其聚类中心明确、数据容量大、鲁棒性强。同时,该算法具有复杂程度高、数据分布不均匀等缺陷。因此,文章提出一种基于区域划分与高斯滤

波改进的近邻传播算法(region division gaussian filtering affinity propagation, RGAP)。一方面引入区域划分思想,划分定位区域为若干子区域,将 AP 均匀分布在各子区域内。另一方面,结合高斯滤波算法和链路质量指示滤波器(link quality indicator, LQI),分别对离线阶段和在线阶段 RSSI 数据进行滤波处理。改进的近邻传播算法流程图如图1所示。图1中, RGAP 算法首先会计算定位区域的原始熵值、AP 条件熵值及其信息增益值,根据信息增益值对 AP 降序排列并形成集合。其次,划分定位区域并计算各子区域 AP 的理想个数,同时基于 AP 实际个数确定最大量子区域、最小量子区域。若最小量子区域的 AP 个数少于理想个数的一半,则以此作为最终 AP 集合。反之,移除最大量子区域中信息增益值最小的 AP,选择最小量子区域中信息增益值最大的 AP 作为补充,形成新的 AP 集合并返回计算理想 AP 数量。接着,在离线阶段,使用高斯滤波算法进行滤波处理,计算高概率区间的 RSSI 均值,构建定位指纹库^[5]。在线阶段,采集 AP 集合中 RSSI 和 LQI 数据,采用 LQI 滤波器处理数据,得到高可靠性 RSSI 数据用于定位。

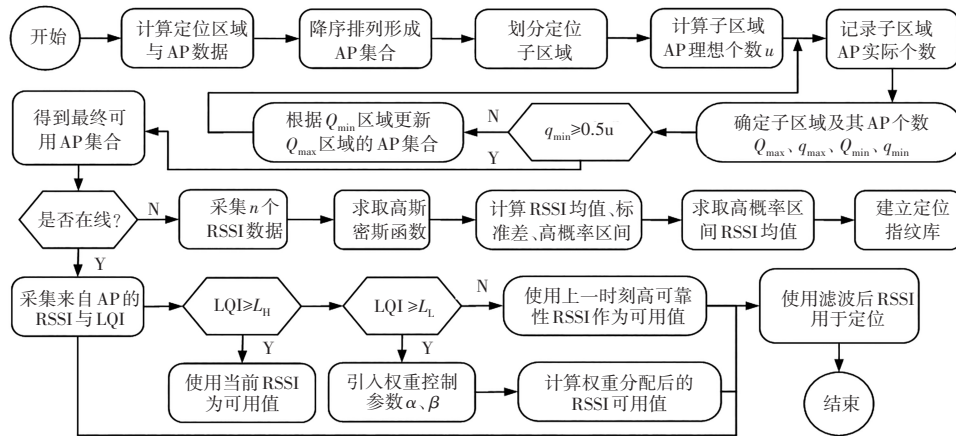


图1 基于区域划分与高斯滤波改进的近邻传播算法流程

Fig. 1 Flowchart of the improved neighborhood propagation algorithm based on regional division and gaussian filtering

在露天煤矿开采中,信号发射设备易受环境影响产生较大波动,使得 AP 算法所采集的 RSS 信号稳定性较差、定位精度较低^[6]。对此,文章在传统 AP 算法基础上进行区域划分,通过信息增益筛选不良 AP,仅采用优化后的高质量 AP 集合,进而提高定位精度、精简算法计算量^[7]。信息增益计算公式为

$$IG(AP_n) = H(S) - H(S | AP_n) \quad (1)$$

式中, AP_n 表示第 n 个待检测 AP, S 是定位区域的子区域, $H(S)$ 为定位区域的原始熵值, $H(S | AP_n)$ 是第 n 个 AP 的条件熵值。定位区域原始熵的具体计算公式为

$$H(S) = - \sum_{d=1}^c P_r(S_d) \log_2 P_r(S_d) \quad (2)$$

式中, c 为子区域总数, $P_r(S_d)$ 是某一子区域的先验概率。AP 条件熵计算公式为

$$H(S | AP_i) = - \sum_T \sum_{d=1}^c P_r(S_d, AP_n = t) \log_2 P_r(S_d | AP_n = t) \quad (3)$$

式中, $P_r(S_d)$ 是某一子区域的先验概率, t 为某一子区域接收的 AP_n 的 RSSI 均值。 $P_r(S_d | AP_n = t)$ 表示已知时 t 的某一子区域条件概率。 T 为当前时刻。定位区域各子区域的 AP 理想个数计算公式为

$$u = \frac{k}{i} \quad (4)$$

式中, u 表示子区域 AP 个数的理想值, k 是由信息增益筛选出的 AP 个数, i 为定位区域划分的子区域个数。此外,由于煤炭储量与煤层结构会影响电磁波传播,导致信号衰减^[8]。因此,文章选择高斯滤波和 LQI 滤波对 RSSI 数据进行过滤处理,降低露天煤矿中电磁波对 RSSI 数据的波动影响。高斯滤波算法是一种基于高斯密度函数对信号加工过滤的方法,通过设计合适的窗函数、分配权重以及计算加权平均值,对 RSSI 数据进行滤波筛选,其能够自动适应信号变化,有效抑制噪声干扰。高斯密度函数具体计算公式为

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中, μ 是 RSSI 的实际均值, σ 为 RSSI 的实际标准差, x 为当前 RSSI 采样值, e 为常数, 其值约为 2.718 28。RSSI 均值计算公式为

$$\bar{Y} = \frac{1}{s} \sum_{n=1}^s \text{RSSI}_n \quad (6)$$

式中, RSSI_n 表示来自第 n 个 AP 的 RSSI, s 是定位区域划分的子区域个数。RSSI 标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{n=1}^s (\text{RSSI}_n - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

式中, RSSI_n 是来自第 n 个 AP 的 RSSI, s 为定位子区域个数, \bar{Y} 是 RSSI 均值。当 μ 置信水平为 0.6 时, RSSI 的区间为高概率区间。RSSI 高概率区间见式(8), 即

$$\left(\bar{Y} - 0.845 \frac{\sigma}{\sqrt{s}}, \bar{Y} + 0.845 \frac{\sigma}{\sqrt{s}} \right) \quad (8)$$

由于在线阶段的目标定位人员处于移动状态, 高斯滤波不再具有稳定的滤波优势, RGAP 算法转而采用 LQI 滤波器对在线阶段的 RSSI 数据滤波处理^[9]。LQI 滤波是一种基于链路质量指示的滤波方法, 用于提高无线信号接收质量^[10]。RGAP 选取较为可靠的 RSSI 估计位置, RSSI 可信度与 LQI 呈正相关。若 LQI 较高, 信任并选择当前 RSSI; 若 LQI 偏低, 则选择过往高质量的 RSSI; 在 LQI 值适中情况下, 根据 LQI 值调整权重, 通过平滑滤波形成可靠性较高的 RSSI 值用于定位^[11]。平滑滤波更新 RSSI 值的具体公式为

$$\hat{q}_n = \alpha q_n + \beta \hat{q}_{n-1} \quad (9)$$

式中, \hat{q}_n 表示当前时刻滤波更新后的 RSSI 值, q_n 是当前时刻实测的 RSSI 值, \hat{q}_{n-1} 为上一时刻滤波后的 RSSI 值, α 和 β 是权重控制参数。权重参数 α 的表达见式(10), 即

$$\alpha = \frac{\text{LQI} - L_L}{L_H - L_L} \quad (10)$$

式中, L_L 是 LQI 的低位门限值, L_H 为 LQI 的高位门限值。权重参数 β 的表达见式(11), 即

$$\beta = \frac{L_H - \text{LQI}}{L_H - L_L} \quad (11)$$

1.2 引入 RGAP 算法的定位系统

经过定位区域划分和数据滤波处理方面的优化, RGAP 算法所依赖的 RSSI 数据准确性和可信度显著提升, 进而在人员定位中展现出优越的精度与效率优势。为实现露天煤矿的安全管控, 文章基于 Android 平台搭建露天煤矿人员定位系统, 并集成 RGAP 算法对矿工位置精确监测, 系统模型如图 2 所示。图 2 中, 露天煤矿人员定位系统由用户、AP 设备、移动端设备、服务器和数据库五部分组成, 其相互之间构成交互关系^[12]。首先, 用户向移动端输入操作指令, 并由移动端向数据库层层传递请求。其次, 在数据库处理任务请求, 返回处理数据至服务器。接下来, 服务器向移动端设备发生响应。同时, 移动设备与 AP 设备间共同进行着数据传输及信号管理的交互^[13]。

最后, 移动端设备根据指令输出反馈信息。

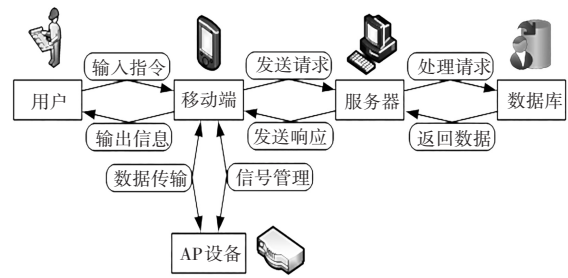


图 2 露天煤矿人员定位系统模型

Fig. 2 Model of the personnel positioning system in open-pit coal mines

文章主要针对露天煤矿人员定位系统中的移动设备开发应用软件, 设计足以支撑煤矿人员定位的 7 大核心功能页面。1) 显示当前员工数量及分类信息的人员定位主页面^[14]; 2) 基于部门、职务和工种类别的员工分类查找页面; 3) 矿内各区域人数查找页面; 4) 人员信息管理页面; 5) 人员考勤记录页面; 6) 人员定位轨迹页面; 7) 紧急险情页面, 通过点击紧急求救按钮, 发出警告并锁定员工位置。需要注意的是, 煤矿人员定位应用是基于无线网络的接入运行^[15]。移动端设备通过扫描周边无线网络信号定位员工, 实时同步位置信息至服务器。随后, 该应用输出煤矿员工的个人信息、考勤信息以及位置轨迹信息。

2 仿真实验分析

2.1 改进近邻传播算法性能分析

为验证 RGAP 算法的综合性能和露天煤矿人员定位系统的可行性, 文章设计了算法性能仿真实验和黑盒测试实验。实验选择面积为 $15 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的教室作为实验环境, 教室区域均分为 4 个 $3.75 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 大小的子区域。实验硬件模块为 ZigBee 开发套件, 包括 4 个定位标签、1 个移动节点标签、1 根数据线及 1 个网关节点。实验选取 K-最近邻算法 (K-nearest neighbors algorithm, KNN)、加权 K-最近邻算法 (weighted K-nearest neighbors algorithm, WKNN) 和 AP 算法作为对比算法, 选择定位误差以及定位误差概率作为算法性能的评价标准, 选取边界值作为定位系统的评价指标。实验固定参数, 设 AP 设备个数为 21、定位测试点个数为 20, 设置设备移动速度为 0.5 m/s , 设 ZigBee 模块的载频为 2.4 GHz 、增益为 3 dBm 、信号扫描频率为 2 s/次 。各算法的定位误差如图 3 所示。图 3(a) 中, 算法的定位误差随测试位置增加而波动变化, KNN 和 WKNN 算法折线陡峭程度较高、波动幅度较大, KNN、WKNN 算法误差范围分别为 $1.63 \sim 2.05 \text{ m}$ 和 $1.43 \sim 1.85 \text{ m}$, 二者定位误差变化较大。AP 和 RGAP 算法折线波动幅度较小, AP 算法误差范围为 $1.61 \sim 1.79 \text{ m}$, 而 RGAP 算法误差范围为 $1.46 \sim 1.68 \text{ m}$ 。同 KNN、WKNN 和 AP 相比, RGAP 算法的定位精度显著提高、稳定性大幅度提升。图 3(b) 中, 文章改进的 RGAP 算法收敛速度有明

显提高,其80%的定位误差在1.52 m之内,而传统AP算法的定位误差80%小于1.65 m。基于WKNN算法的定位

误差80%在1.58m内,基于KNN算法的定位误差80%不超过1.65 m。

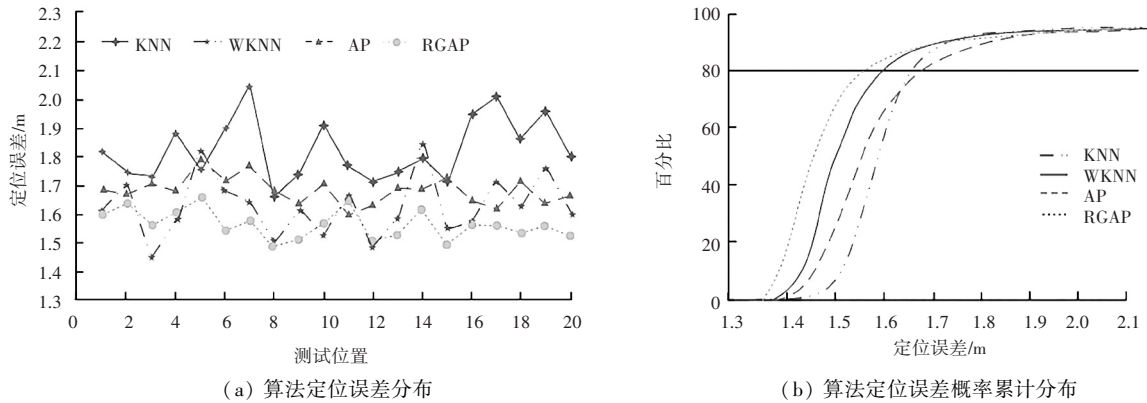


图3 KNN、WKNN、AP、RGAP算法定位误差分布对比

Fig. 3 Comparison of positioning error distribution among KNN, WKNN, AP, and RGAP algorithms

各算法的定位误差统计量对比如图4所示。图4中,在最大误差方面,KNN算法的最大误差值居于首位,达到2.08 m。RGAP算法最大误差值最低为1.65 m。在最小误差方面,WKNN与RGAP算法值较小,最小误差分别为1.45 m和1.49 m。在平均误差方面,KNN、WKNN、AP和RGAP算法值呈递减趋势,平均定位误差分别为2.2、1.76、1.37和1.04 m。由此可得,文章提出的RGAP算法可以有效降低定位误差,提高定位匹配度。

环境噪声对算法的定位误差影响对比如图5所示。观察图5可知,不同的噪声系数会对各算法误差值造成一定程度的涨幅。KNN、WKNN和AP算法受煤矿噪声的影响较大,分别有80%、70%和65%的定位误差变化。相较于3种对比算法,而文章改进的RGAP算法中噪声对定位精度的影响最小,仅有35%的定位误差变化,并且误差值增长最大不超过0.05 m。

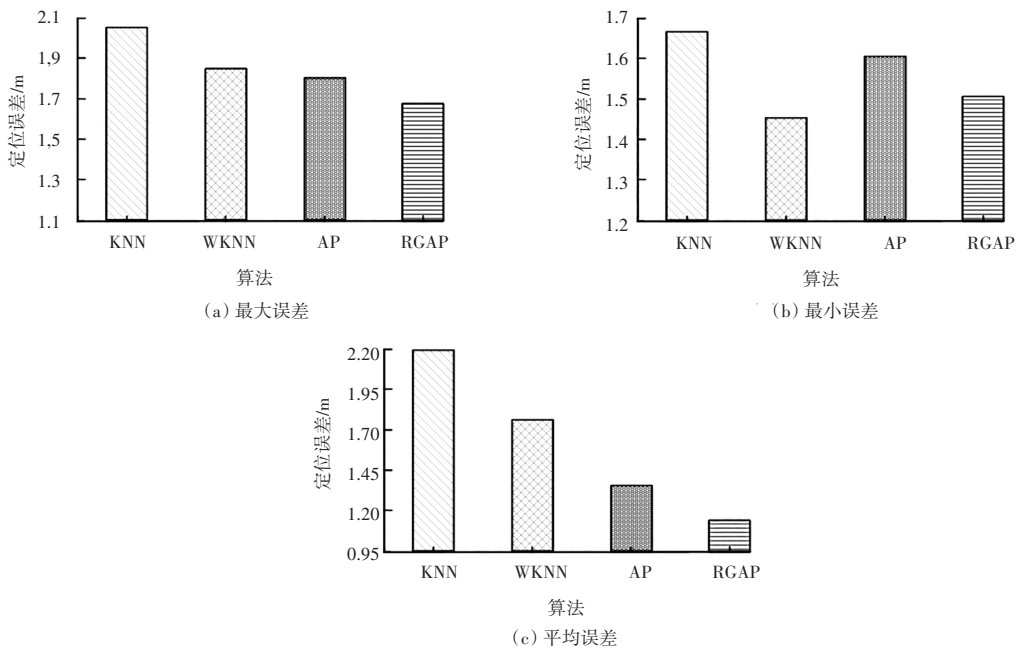


图4 KNN、WKNN、AP、RGAP算法定位误差统计量对比图

Fig. 4 Comparison of positioning error statistics between KNN, WKNN, AP, and RGAP algorithms

2.2 露天煤矿人员定位效能分析

露天煤矿人员定位系统核心功能测试结果如表1所示。表1中,通过应用登录验证、内外网登录功能、分类查找员工个人信息、员工考勤信息查询、员工位置轨迹查询

和紧急险情救助7个测试用例,对露天煤矿人员定位系统的主要功能进行测试。在逐项输入具体操作指令后,实际测试结果皆与预期结果相同。可见,文章设计的煤矿人员定位系统实际应用效能良好。

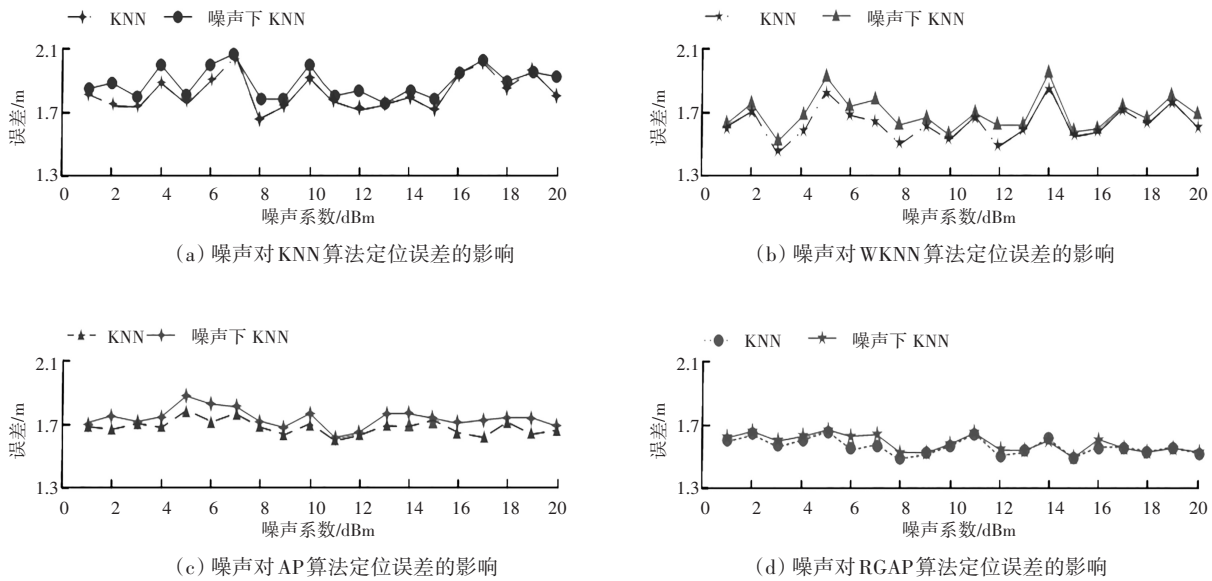


图5 噪声对KNN、WKNN、AP、RGAP算法定位误差影响对比

Fig. 5 Comparison of the impact of noise on positioning errors of KNN, WKNN, AP, and RGAP algorithms

表1 露天煤矿人员定位系统功能测试用例

Tab. 1 Cases for the function test of the personnel positioning system in open pit coal mines

测试用例	测试内容	具体操作	预期结果	实测结果
1	应用登录验证	输入用户名、登录密码	成功登录系统,进入应用主页面	符合预期
2	内网登录功能	连接内部网络无线热点,输入用户名及密码	成功登录系统,进入系统主页面	符合预期
3	外网登录功能	使用中国电信4G信号,输入用户名及密码	成功登录系统,进入系统主页面	符合预期
4	分类查找员工	选择员工部门、工种、职务信息,点击查询	进入员工A个人信息页面	符合预期
5	考勤信息查询	在员工A页面,设置起始时间,点击考勤查询	显示员工A该时间段入矿记录	符合预期
6	位置轨迹查询	在员工A页面,设置起始时间,点击位置查询	显示员工A该时间段位置信息	符合预期
7	紧急险情救助	返回主页面,点击紧急求救按钮	应用弹出红色警告并锁定员工A当前所处位置	符合预期

3 结束语

针对传统露天煤矿人员定位方法计算量大、稳定性差、定位精准度的问题,文章提出了一种基于RGAP算法的露天煤矿人员定位策略,通过仿真实验对比算法性能、验证系统实用效能。算法性能实验结果表明, RGAP算法定位最大误差、最小误差、平均误差值分别为1.65、1.49和1.04 m,其80%的定位误差小于1.52 m,噪声环境下误差变化率为35%。黑盒测试实验结果表明,人员定位系统测试用例结果皆符合预期。研究证明, RGAP策略极大提高了算法运算效率和定位精度,具有优越的露天煤矿人员定位效能。其缺点在于,算法稳定性仍然较弱、对于不规则区域划分精度较低。后续,研究将强化RGAP算法对于不同结构定位区域划分能力,针对不同环境滤波优化能力,全面提升在露天煤矿人员定位的实用性。

参考文献

[1] 崔含, 鄱少锋. 基于物联网技术的煤矿安全生产信息监测平台构建[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(05):70-74.
 [2] 母西军, 铁新纳, 史建杰, 等. 隧道空间环境下高精度快速人员定位研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(8):125-128, 139.
 [3] Pino-ortega J, bastida-castillo A, Gómez-carmona CD, et al. Validity and reliability of an eight antennae ultra-wideband local positioning system to measure performance in an indoor environment[J]. Sports

biomechanics, 2024, 23(2):145-155.
 [4] 黄鹤, 李文龙, 杨澜, 等. 跳跃跟踪SSA交叉迭代AP聚类算法[J]. 电子学报, 2024, 52(3):977-990.
 [5] 王梓歌, 李盈盈, 葛利跃, 等. 结合高斯混合模型与多通道双边滤波的RGBD场景流计算方法[J]. 模式识别与人工智能, 2023, 36(3):225-241.
 [6] 李启源, 王海军, 周智勇, 等. 耦合最大熵和近邻传播聚类的城市空间多模式扩展元胞自动机模型构建[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(7):1464-1480.
 [7] 曲福恒, 宋剑飞, 杨勇, 等. 基于min-max准则与区域划分的I-k-means+聚类算法[J]. 吉林大学学报:理学版, 2023, 61(5):1131-1138.
 [8] 刁梦妮, 韩震, 杭君. 上海浦东新区碳储量变化影响因素分析[J]. 环境监测管理与技术, 2024, 36(2):74-78.
 [9] 符鹏涛, 罗来龙, 郭得科, 等. 跳跃滤波:一种面向大数据治理的动态数据摘要设计[J]. 软件学报, 2023, 34(3):1193-1212.
 [10] 宁明峰. 一种信号检测预处理的改进多尺度形态学滤波方法[J]. 电讯技术, 2023, 63(4):499-504.
 [11] 陈亚超, 樊彦国, 禹定峰, 等. 考虑法向离群的自适应双边滤波点云平滑及IMLS评价方法[J]. 图学学报, 2023, 44(1):131-138.
 [12] 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.
 [13] 金瑜瑶, 张晓梅, 王亚杰. 基于注意力模块的移动设备多场景持续身份认证[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(3):280-291.
 [14] 孙志明, 尹康涌, 贾乃征, 等. 基于可视化近超声的狭长管道人员定位系统[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(1):55-62.
 [15] 杨小琴, 朱玉全. 无线传感网络误删数据匹配追踪恢复方法设计[J]. 传感技术学报, 2023, 36(9):1473-1477.