

基于改进PSO与加权质心融合的室内可见光定位方法研究

贺军义,刘子怡,张敏*,吕梦强,彭威硕

(河南理工大学 计算机科学与技术学院,河南 焦作 454003)

摘要:为提升室内可见光的定位精度,提出一种改进粒子群优化(PSO)与加权质心融合的室内可见光定位方法。首先,利用改进的PSO算法优化发光二极管(LED)发射角度,以找到最佳的半角参数。其次,使用信道增益作为接收信号强度指示(RSSI)的度量,并采用基于RSSI的加权质心法进行定位,最后,通过距离加权法对初步加权质心进行优化,以降低定位误差。仿真结果表明,提出的方法89%测试点的定位误差小于5.0 cm,平均定位误差约为3.6 cm。

关键词:粒子群优化;可见光定位;信道增益;接收信号强度指示;加权质心定位法;距离加权定位法

中图分类号:TN929.1;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0034-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.006

Research on indoor visible light positioning method based on improved PSO and weighted centroid fusion

HE Junyi, LIU Ziyi, ZHANG Min*, LYU Mengqiang, PENG Weishuo

(College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy of indoor visible light, an indoor visible light positioning method combining an improved particle swarm optimization (PSO) with weighted centroid fusion is proposed. First, the improved PSO algorithm is employed to optimize the emission angle of light-emitting diodes (LEDs) to determine the optimal semi-angle parameter. Second, channel gain is utilized as a metric for received signal strength indication (RSSI), and an RSSI-based weighted centroid method is applied for positioning. Finally, the initial weighted centroid estimate is refined using a distance-weighted method to reduce positioning error. Simulation results show that the proposed method achieves a positioning error of less than 5.0 cm at 89% of test points, with an average positioning error of approximately 3.6 cm.

Key words: particle swarm optimization, visible light positioning, channel gain, received signal strength indication, weighted centroid positioning method, distance-weighted positioning method

0 引言

位置服务已成为当今社会不可或缺的基础需求。在室外环境中,全球定位系统(GPS)技术已非常成熟

并被广泛应用^[1-2]。然而,由于建筑物遮挡和多路径效应等因素会导致卫星信号严重衰减,GPS在室内环境中的定位精度与可靠性大幅下降。鉴于人们绝大部分时间都在室内活动,对高精度、高可靠性的室内定位技术的需求日益迫切^[3]。

为应对这一挑战,射频识别(RFID)^[4]、无线保真(WiFi)^[5]、蓝牙^[6]及超宽带(UWB)^[7]等多种室内定位技术应运而生。然而,这些技术普遍面临电磁干扰、定位精度有限或部署成本较高等问题。相比之下,基于可见光通信(VLC)的室内定位系统凭借其定位精度高、抗电磁干扰能力强以及通信保密性好等独特优势,展现出巨大的应用潜力^[8]。

在VLC定位系统中,基于光电探测器(PD)的方案

收稿日期:2024-09-02。

基金项目:国家自然科学基金项目(61872126、61772159)资助;河南省科技攻关项目(242102210185)资助;河南省高校重点研究基金项目(20A520015)资助;河南理工大学博士基金项目(60907023)资助。

作者简介:贺军义(1982年—),男,河南平舆人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机测控技术、惯性定位技术及应用等。

***通信作者:**张敏(1982—),女,硕士,助教,主要研究方向为计算机数据库技术及应用。



因其结构简单、可靠性高且成本低廉而成为主流。该类系统通过接收光信号并估算距离来实现定位,其关键技术包括接收信号强度(RSS)^[9-11]、到达角(AOA)^[12]、到达时间(TOA)^[13-14]及到达时间差(TDOA)^[16]等。其中,RSS测距法因其在保证一定精度的同时能有效降低系统复杂度的优势而被广泛研究。近年来,众多学者致力于提升RSS定位算法的性能:例如,任晓奎等人^[17]提出基于接收信号强度指示的修正余弦加权质心(RSSI-RCWC)算法,通过高斯滤波和构建新三角形质心进行定位;文献[18]结合加权最小二乘与迭代平均滤波算法用于定位;文献[19]利用蛇优化算法进行节点定位;文献[20]则采用信号强度差值改进质心定位算法。然而,室内环境复杂多变,信号强度易受多种因素干扰,现有方法在稳定性与精度方面仍存在不足,尤其是在如何优化系统底层参数,例如发光二极管(LED)发射角,以从根本上提升定位性能方面的研究尚显欠缺。

针对上述问题,本文提出一种基于改进 PSO 与加权质心融合的室内可见光定位方法。

1 可见光定位方法与 RSSI 度量

在 VLC 系统中,定位精度在很大程度上取决于 LED 发射器与接收器之间的信道增益,该增益反映了信号在传播过程中的衰减和方向性。本文提出一种基于信道增益优化的 RSSI 室内定位方法:首先,通过计算信道增益来估计信号衰减,并采用加权质心算法,将调整后的 RSSI 值作为权重,计算目标的估计位置;然后,在此基础上,进一步计算目标到各个光源的距离;最后,以距离倒数为权重对质心位置进行优化,从而提高定位精度,减小定位误差。

假设 VLC 系统存在 9 个已知位置的 LED 光源,其坐标分别为 (X_i, Y_i) ,每个 LED 光源对应的信号强度为 R_i 。将这些信号强度值按比例转换为权重 w_i ,通常权重 w_i 与信号强度 R_i 成正比,如式(1)所示。

$$w_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (1)$$

其中, N 表示 LED 的光源数量。

2 融合改进 PSO 算法与加权质心算法的定位方法

2.1 改进的 PSO 算法

2.1.1 适应度函数设计

在仿真环境中,测试点被均匀布设。考虑到信号

传播受路径损耗、反射、散射等多种因素影响,定位问题可建模为一个最小化观测信号与理论模型之间差异的优化问题。本文采用信道增益的测量值与理论值的匹配程度作为适应度函数的设计原则,以取代传统 PSO 算法中使用的简单误差函数。该适应度函数不仅描述了 LED 发射器与接收器之间的几何关系,还综合考虑了路径损耗、角度衰减和多径效应等实际影响因素。适应度函数 f_i 为实际测量的信道增益与理论预测值之间的差值,其定义如式(2)所示。通过最小化该差值,算法得以优化粒子群中的每一个潜在解。

$$f_i = \sum_{j=1}^N (H_{m,i} - H_{p,i})^2 \quad (2)$$

其中, $H_{m,i}$ 是第 i 个 LED 的实际信道增益, $H_{p,i}$ 是根据模型计算的预期信道增益。

2.1.2 改进的 PSO 算法机制

在改进的 PSO 算法中,权重 w_i 不再固定,而是引入随迭代次数变化的惯性权重 $w(t)$,以平衡早期的全局搜索和后期的局部搜索,其表达式为

$$w(t) = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{T} \right) t \quad (3)$$

其中, t 为迭代次数, $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 为初始和最终的惯性权重值, T 为最大迭代次数。

对于传统 PSO 算法中的个体学习因子 c_1 和社会学习因子 c_2 ,为更好地平衡算法在搜索过程中的探索与开发能力、提升收敛效率,本文在改进的 PSO 算法中采用动态调整策略:令 c_1 随迭代次数按余弦函数递减, c_2 随迭代次数按正弦函数递增。两者的具体表达式为

$$c_1 = 1 + \cos\left((p/2)I/T\right) \quad (4)$$

$$c_2 = 1 + \sin\left((p/2)I/T\right) \quad (5)$$

其中, I 为当前迭代次数, p_i 是粒子的个体最佳位置。通过自适应调整,惯性权重能够更灵活地随迭代过程动态变化,使粒子群在不同优化阶段更有效地平衡个体探索与群体协作。此外,在改进的 PSO 算法中,除了受个体历史最优位置和全局最优位置的影响外,粒子速度的更新还引入了粒子群的均值位置,进一步增强了粒子间的协同作用,有助于避免早熟收敛。粒子速度 $v_i(t)$ 与位置 $x_i(t)$ 的更新公式如下:

$$v_i(t+1) = w_i v_i(t) + c_1 r_1 (p_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (g_i - x_i(t)) + c_3 r_3 (\bar{x} - x_i(t)) \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

其中, r_1 、 r_2 和 r_3 为在区间 $(0,1)$ 上服从均匀分布的随机数,用于增强搜索的多样性,防止粒子陷入局部最优。

g_i 为全局最佳位置, $\bar{x}$ 为粒子群位置的均值, c_3 为加权因子。

本文旨在通过改进的 PSO 算法优化 LED 发射器的布局, 以最小化接收器的定位误差。通过对不同 LED 半角功率和位置参数进行实验分析, 确定最佳的发射器配置方案, 从而提升室内定位系统的整体精度。算法的实现步骤如下:

1) 初始化: 设置粒子群算法的参数, 包括粒子数量、初始位置与速度、惯性权重、位置与速度的边界约束。初始化每个粒子的个体历史最佳位置 (pBest) 和种群的全局历史最佳位置 (gBest)。每个粒子在系统中对应的初始位置为 (x, y) , 即接收器的坐标。

2) 适应度评估: 对于种群中的每个粒子, 根据式 (5) 所定义的适应度函数 f_i 计算其当前位置的适应度值。

3) 更新个体最佳位置: 将每个粒子当前的适应度值与其个体历史最佳适应度值进行比较。若当前适应度值更优, 则用当前位置更新其 pBest。

4) 更新全局最佳位置: 将所有粒子的当前个体最佳适应度值与全局历史最佳适应度值进行比较。若某个粒子的个体最佳适应度值更优, 则用该粒子的 pBest 更新 gBest。

5) 更新粒子状态: 根据式 (6) 和式 (7) 更新每个粒子的速度和位置。新速度由当前速度、个体认知 (与 pBest 的偏差) 和社会认知 (与 gBest 的偏差) 共同决定。新位置则由当前位置加上当前位置的迭代步长 (新速度) 得到。

6) 迭代循环: 重复执行步骤 2)~步骤 5), 直至满足预设的最大迭代次数终止条件。

7) 输出结果: 算法终止后, 输出 gBest 及其对应的适应度值。gBest 即为优化得到的最佳 LED 发射器布局方案, 其适应度值代表了该布局下理论预测与实测信道增益的最小差值。

2.1.3 PSO 优化 LED 半角的过程

LED 的半角直接影响其光照覆盖范围和信号强度分布, 进而对基于 RSSI 的定位精度产生决定性影响。较小的半角会导致光束更集中, 覆盖范围小但中心区域信号强; 较大的半角则使光线更分散, 覆盖范围广但单位面积信号弱。因此, 寻找一个最佳的半角值, 对于在目标定位区域内实现均匀且高强度的信号覆盖至关重要。

优化过程如下: 本文将待优化的半角参数映射为改进 PSO 算法中的一个粒子位置。每个粒子代表一个潜在的半角解。算法通过在设定的角度范围内迭

代更新粒子的位置 (半角值), 来寻找使适应度函数 f_i 取得最小值的全局最优解。

2.2 基于 RSSI 的加权质心法初步定位

加权质心法的节点位置示意图如图 1 所示。图中展示了不同发射器的信号覆盖范围 (以圆形区域表示)。设发射器与接收器之间的估计距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 , 所获得的接收器位置坐标分别为 $A_1(x_1, y_1)$ 、 $A_2(x_2, y_2)$ 、 $A_3(x_3, y_3)$ 。

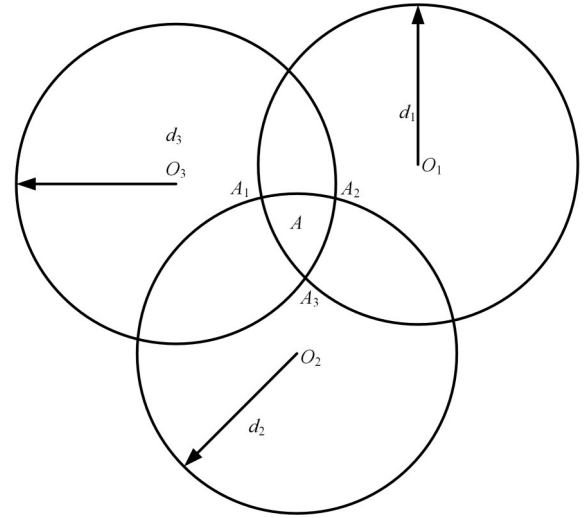


图1 加权质心法节点位置图

图 1 中, 圆 O_1 与圆 O_2 相交于点 A_1 , 2 个圆的半径分别是 d_1 、 d_2 , 点 A_1 对应的权重为 $1/(d_1 + d_2)$, 以此类推, 加权质心 A 的坐标 (X, Y) 为

$$\begin{cases} X = \frac{\frac{x_1}{d_1 + d_2} + \frac{x_2}{d_2 + d_3} + \frac{x_3}{d_3 + d_1}}{\frac{1}{d_1 + d_2} + \frac{1}{d_2 + d_3} + \frac{1}{d_3 + d_1}} \\ Y = \frac{\frac{y_1}{d_1 + d_2} + \frac{y_2}{d_2 + d_3} + \frac{y_3}{d_3 + d_1}}{\frac{1}{d_1 + d_2} + \frac{1}{d_2 + d_3} + \frac{1}{d_3 + d_1}} \end{cases} \quad (8)$$

加权质心法通过对接收到的 RSSI 值进行加权平均, 得到初步的接收器位置估计。具体地, 假设接收器的坐标为 (x, y) , 则该接收器的加权质心坐标计算公式为

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i=1}^N w_i X_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \\ y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i Y_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \end{cases} \quad (9)$$

该方法可初步估计出接收器的位置,但由于 RSSI 值受到多因素的影响,估计结果存在误差。

2.3 基于距离加权的定位结果优化

为减少初步估计中的误差,本文在加权质心定位法的基础上,引入距离加权法进行优化。距离加权法基于接收器到各 LED 的距离来调整权重,权重与距离的倒数成正比。近距离的信号对最终位置估计的贡献更为显著,而远距离的信号影响则较为有限。

根据式(9),加权质心 A 的坐标 (X,Y) 可进一步表示为

$$\begin{cases} X = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} X_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i}} \\ Y = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} Y_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, d_i 为发射器与接收器之间的估计距离。

3 仿真与分析

本文搭建了一个大小为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 4\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的室内仿真环境模型,如图2所示。房间天花板上均匀分布安装了9个LED发射器,每个LED被分配了唯一的信号以标识其自身的坐标位置。4个PD分布在地平面上,用于接收光强信号。定位区域(目标平面)为一个正方形区域,其4个顶点坐标分别为 $(-1.5\text{ m}, 1.5\text{ m})$ 、 $(-1.5\text{ m}, -1.5\text{ m})$ 、 $(1.5\text{ m}, 1.5\text{ m})$ 和 $(1.5\text{ m}, -1.5\text{ m})$ 。将该定位区域均匀划分为16个大小一致的正方形网格,并以每个网格的顶点作为测试点,因此

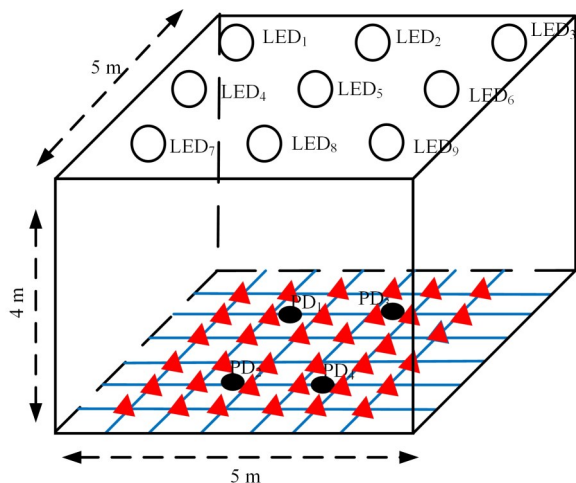


图2 室内 VLC 定位模型

共设有25个测试点。仿真时的具体参数如表1所示。

图3为适应度函数值(下文简称适应度值)与LED半角的关系图。可以看出,当LED半角为 50° 时,适应度函数值最小。为进行对比,本文选取了2个不同的LED半角,将其迭代过程(迭代次数与适应度值的关系)与最优半角(50°)的情况进行对比,结果如图4所示。可以看出,在相同迭代次数下,LED半角为 50° 时

表1 室内可见光仿真实验参数

仿真参数	数值
种群数 N	500
最大迭代次数 $I_{\max}$	100
角度 $I/^\circ$	10~90
LED发射功率 P_i/W	5
个体学习因子 c_1	式(8)
社会学习因子 c_2	式(9)
最大惯性权重 $w_{\max}$	0.9
最小惯性权重 $w_{\min}$	0.5

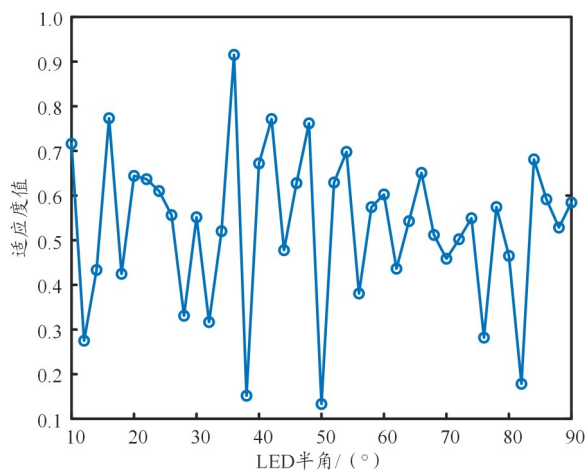


图3 适应度与LED半角的关系图

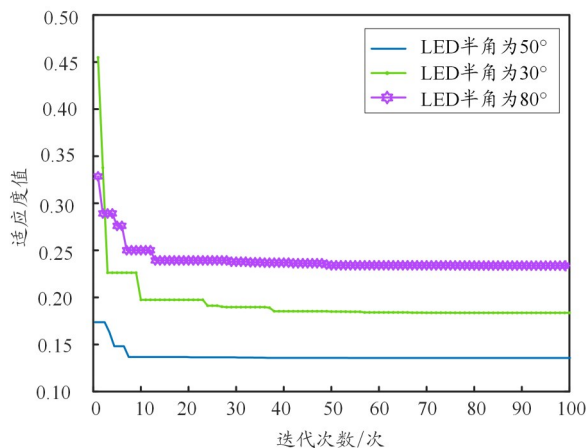


图4 不同LED半角迭代次数与适应度关系对比图

的适应度值明显低于其它 2 个半角, 表明该角度下的改进 PSO 算法的收敛性能最优; 当 LED 半角为 50° 时, 适应度值随迭代次数增加而持续下降, 迭代约 30 次后趋于平稳并收敛至最低值, 充分验证了该半角下算法具有良好的收敛性和稳定寻优能力。

针对仿真环境中的 25 个测试点, 将本文提出的定位方法与仅使用加权质心法的定位效果进行了比较, 结果如图 5 所示。经计算表明, 在相同的实验设置情况下, 加权质心法的平均定位误差为 5.5 cm, 而本文方法的平均误差为 3.7 cm。与单一的加权质心法相比, 本文所提方法将平均定位精度提升了 32.7%, 显示出更优越的性能。

图 6 为本文所提方法的定位误差分布直方图。可以看出, 约 89% 的测试点其定位误差控制在 5.0 cm 以内, 约 68% 的测试点误差不超过 4.0 cm; 最大定位误差

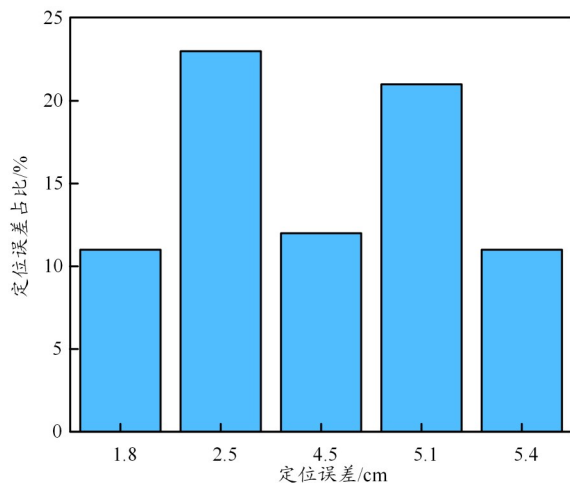


图 6 定位误差分布直方图

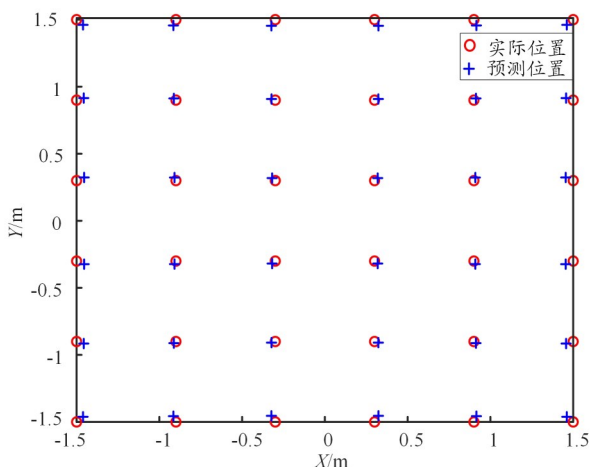
为 5.4 cm, 且仅占全部测试点的 11%; 所有测试点的平均定位误差约为 3.6 cm。

4 结束语

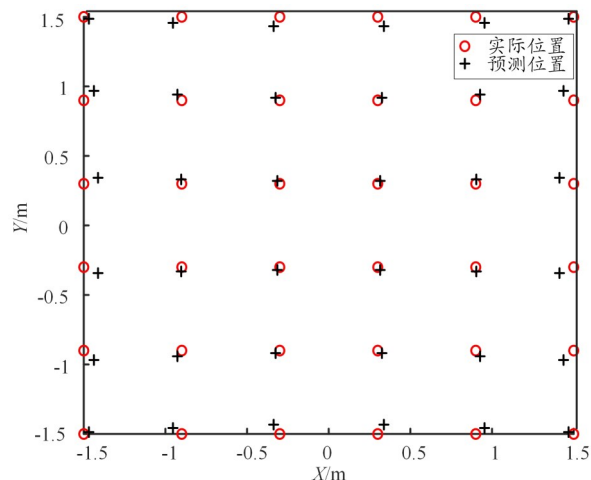
本文提出了一种基于改进 PSO 与加权质心融合的室内可见光定位方法。首先, 通过改进的 PSO 算法对 LED 发射器的半角功率进行优化, 以确定最佳信号覆盖参数。在此基础上, 将光通信中的信道增益等效为 RSSI 值, 并采用基于 RSSI 的加权质心法进行接收器位置的初步估算。由于 RSSI 易受多径效应、路径损耗等多种因素干扰, 初步估计结果存在一定误差。为此, 本文进一步引入距离加权法对初步估计结果进行优化, 以修正误差、提升精度。仿真结果表明, 所提方法性能良好, 89% 的测试点定位误差控制在 5.0 cm 以内, 平均定位误差约为 3.6 cm。目前, 本研究工作均基于仿真环境实现与验证。后续研究将搭建实际实验平台, 在真实室内环境中对所提方法进行测试与进一步优化。

参考文献:

- [1] 柳景斌, 赵智博, 胡宁松, 等. 室内高精度定位技术总结与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(7): 997-1008.
- [2] CARVALHO G S, SILVA F O, PACHECO M V O, et al. Performance analysis of relative GPS positioning for low-cost receiver-equipped agricultural rovers[J]. Sensors, 2023, 23(21): 8853-1-8853-16.
- [3] 蒲巧林, 陈有坤, 周牧, 等. 基于改进对比学习和并行融合神经网络的室内 WiFi 定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 101-110.
- [4] VENA A, ILLANES I, ALIDIERES L, et al. RFID based indoor localization system to analyze visitor behavior in a museum[C]/IEEE. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications(RFID-TA). Piscataway: IEEE, 2021: 183-186.



(a) 本文测试点定位结果



(b) 加权质心法测试点定位结果

图 5 不同方法定位结果

- [5] ZHUANG Y, SYED Z, LI Y, et al. Evaluation of two WiFi positioning systems based on autonomous crowdsourcing of handheld devices for indoor navigation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(8): 1982–1995.
- [6] ZHUANG Y, HUA L, QI L, et al. A survey of positioning systems using visible LED lights[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1963–1988.
- [7] BREGAR K. Indoor UWB positioning and position tracking data set[J]. Scientific Data, 2023, 10(1): 744–744.
- [8] MAHEEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 3971–3995.
- [9] SHAO S, KHREISHAH A, KHALIL I. Enabling real-time indoor tracking of IoT devices through visible light retroreflection[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 19(4): 836–851.
- [10] SATO T, SHIMADA S, MURAKAMI H, et al. ALiSA: a visible-light positioning system using the ambient light sensor assembly in a smartphone[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 4989–5000.
- [11] ZHANG S, LIU K, ZHANG Y, et al. A coarse fingerprint-assisted multiple target indoor device-free localization with visible light sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(2): 1461–1473.
- [12] STEENDAM H, WANG T Q, ARMSTRONG J. Cramer-rao bound for AOA-based VLP with an aperture-based receiver[C]/IEEE. Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE, 2017: 1–6.
- [13] ZHAO H X, WANG J T. A novel three-dimensional algorithm based on practical indoor visible light positioning[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(3): 1–8.
- [14] 曹阳, 党宇超, 彭小峰, 等. TOA/RSS 混合信息室内可见光定位方法[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 133–141.
- [15] DU P F, ZHANG S, CHEN C, et al. Demonstration of a low-complexity indoor visible light positioning system using an enhanced TDOA scheme[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1–10.
- [16] 潘兴驰, 闫文林. 融合迭代平均滤波的 RSSI 室内定位算法[J]. 导航定位学报, 2024(2): 79–85, 93.
- [17] 任晓奎, 于百川, 李岩. 基于 RSSI 的加权质心定位算法的改进[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 150–153.
- [18] 黄承汉, 冯锋. 基于 RSSI-SO 算法的 WSN 定位研究[J]. 物联网技术, 2024, 14(5): 3–5, 8.
- [19] 张益, 李飞. 基于信号强度差值的改进质心定位算法[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024(5): 81–87.
- [20] 苏辰希, 张艳语, 李盾, 等. 基于空间优化的室内可见光定位方法研究[J]. 光学学报, 2024(13): 78–87.