

基于改进粒子群优化算法的可见光室内定位技术

成湘,白元涛,郭鑫,刘继红

(西安邮电大学 电子工程学院,西安 710121)

摘要:为了提高可见光室内定位的精度和稳定性,基于带收缩因子的粒子群优化算法(CFPSO)设计了一种可见光室内定位算法,避免了经典粒子群优化算法容易早收敛导致定位误差较大的问题,同时,建立测距经验模型代替朗伯辐射模型降低测距误差。在室内 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 的实验环境下测试算法性能,结果表明:提出的算法只需较低的复杂度代价即可明显改进定位精度,其中 90% 和 47.5% 测试点的定位误差分别不超过 5cm 和 4cm。

关键词:可见光室内定位;粒子群算法;收缩因子;测距经验模型

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)04-0008-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light indoor positioning technology based on improved particle swarm optimization algorithm

CHENG Xiang, BAI Yuantao, GUO Xin, LIU Jihong

(School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and stability of visible light indoor positioning, a new indoor positioning algorithm based on particle swarm optimization with constriction factor (CFPSO) is designed, which avoids the problem that the classical particle swarm optimization algorithm is easy to converge early and leads to large positioning error. At the same time, an empirical ranging model is established to replace Lambert radiation model to reduce the ranging error. The performance of the proposed algorithm is tested in an indoor $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ experimental environment. The results show that the proposed algorithm significantly improves the positioning accuracy with low cost of complexity. The positioning errors of 90% and 47.5% of the test points are less than 5cm and 4cm, respectively.

Key words: visible light indoor positioning; particle swarm optimization; contractile factor; empirical model of ranging

0 引言

室内定位在大型商场、矿井、图书馆和机场大厅等场景有着广泛的应用。然而,传统的室内定位方式,如无线局域网、射频识别、红外、蓝牙和超宽带等存在成本高、定位误差大和易受电磁干扰等缺点^[1,2]。可见光通信作为新一代无线通信技术,具有无电磁辐射干扰、频带资源丰富和传输速率高等优点^[3]。因此,基于

收稿日期:2019-01-02。

基金项目:陕西省教育厅专项科学研究计划项目(17JK0697)资助。

作者简介:成湘(1994-),女,陕西铜川人,硕士研究生,现就读于西安邮电大学电子工程学院电路与系统专业,主要从事可见光通信室内定位系统研究,其中重点研究可见光室内定位算法。2017年12月获得全国研究生数学建模三等奖。



可见光通信的室内定位技术得到了广泛关注,该技术将LED光源作为信号源,兼顾照明与定位。另外,由于LED光源普遍存在,使得室内可见光定位系统易于搭建,在一些电磁敏感区域如医院、机场和加油站等仍可使用。

定位算法是室内定位技术的关键,常见的可见光室内定位算法主要有基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)、到达时间(Time of Arrival, TOA)、到达角度(Angle of Arrival, AOA)及到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)测距的三边测量算法,以及指纹分析算法、近似感知算法和图像传感器算法等^[4]。考虑到可见光室内定位的成本、难度和精度,目前提出的定位方案大多是基于RSS测距的三边测量算法。文献[5]提出了一种基于差分检测的定位算

法,该算法虽然可以降低 LED 光强度起伏的不稳定性对定位精度的影响,但是要辅助额外的设备,成本较高。文献[6]结合 AOA 和 RSS 提出了一种室内混合定位算法,平均定位误差为 10cm,但由于需要在接收端部署传感器阵列,且混合了 2 种算法,所以系统的成本和复杂度都比较高。文献[7]提出的基于 4 个 LED 的质心加权算法定位精度较低。文献[8]提出了一种基于粒子群优化(PSO)的室内定位算法,并通过模拟退火(SA)算法来改进 PSO 算法中的早收敛问题,但由于该算法是 2 种优化算法的融合,算法复杂度相对较高。另外,实验中是基于理想朗伯辐射模型进行 RSS 测距的,而实际定位时朗伯辐射模型的测距误差较大。基于此,本文在 RSS 算法的基础上,基于带收缩因子的 PSO(CFPSO)算法^[9]设计一种新的定位算法,并建立 RSS 测距经验模型代替朗伯辐射模型。

1 可见光室内定位原理

1.1 定位模型

可见光室内定位模型如图 1 所示,发射端由挂在天花板的 4 个 LED 组成,每个灯都分配一个代表自身位置的坐标,坐标信息调制到 LED 发出的可见光上,接收端采用放置在水平地面上的光电传感器进行检测。由于信道衰减与距离有关,当已知发射端 LED 光源强度时,通过测量接收端光信号强度,根据信道衰减模型,如朗伯辐射模型等可以得到 LED 光源到接收端之间的距离,然后利用定位算法确定接收端位置。

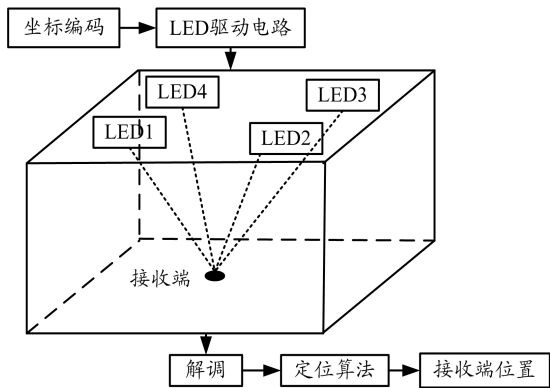


图 1 可见光室内定位模型

在实际定位应用中,由于环境因素的变化、发射端和接收端的器件与理想假设存在差异,如果选择朗伯辐射模型,会产生较大的定位误差。因此,本文在实验研究中将根据实际定位场景建立发射端与接收端之间距离与光强分布的测距经验模型。

1.2 三边定位原理

基于三边定位原理的室内定位模型至少包含 3 个 LED,假设它们的坐标分别为 LED1(x_1, y_1, z_1)、LED2(x_2, y_2, z_2)和 LED3(x_3, y_3, z_3),到接收端的距离分别为 d_1 、 d_2 和 d_3 ,接收端的坐标为 $P(x_p, y_p, z_p)$,则有:

$$\begin{cases} d_1^2 = (x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2 \\ d_2^2 = (x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2 \\ d_3^2 = (x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $z_1=z_2=z_3=h$, h 为室内高度, $z_p=0$ 。理想情况下式(1)的解 $P(x_p, y_p)$ 是 3 个分别以 LED 的投影点为圆心、投影点到接收端的距离为半径的圆的交点。但由于实际环境变化、多径效应等影响, RSS 测距会存在一定的误差, 3 个圆不会严格交于一点, 而是相交形成如图 2 所示的阴影区域。因此, 实际定位结果(即式(1))没有解析解, 只能通过最小二乘算法等寻求最优解。

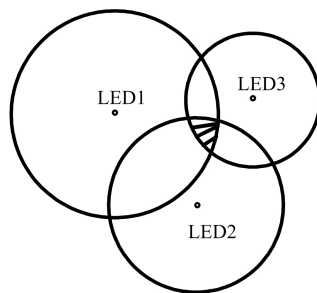


图 2 有测距误差时 3 个圆相交形成的阴影区域

本节是基于定位模型包含最少 LED 数目来讨论的, 本文采用 4 个 LED 的定位模型, 定位原理与 3 个 LED 时类似。增加的 LED 使可用条件变多, 但如果 LED 数目过多, 多径效应会加剧, 反而会降低定位精度。因此, 定位模型中的 LED 数目应适中。

2 基于 CFPSO 的定位算法

根据图 2 可知, 由于通过 RSS 测量接收端和发射端间的距离存在误差, 定位问题可转化为最优化问题:

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2} - d_i \quad (2)$$

即求解定位模型 $F(x, y, z)$ 的最小值。本文引入 CFPSO 算法求解最优定位目标解, 该算法在保留基于种群的全局搜索策略、减少复杂的遗传变异操作等优点的同时, 能避免经典 PSO 算法容易出现局部极值和早收敛等问题。基于 CFPSO 设计的室内定位算法实现步骤如下:

①随机生成一组数量为 N 的粒子, 并对各个粒子的速度、位置、个体最优位置及全局最优位置进行随机初始化, 每个粒子对应一个坐标 (x, y) 为定位系统中的初始位置。

②调用 RSS 测距经验模型分别得到 4 个 LED 到接收端之间的距离 d_i 。

③根据式(3)计算每个粒子的适应度值,比较其优劣性,然后存储每个粒子的最好位置和适应度值,并在种群中选择适应度值最好的粒子作为全局最优位置。

$$fitness = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + h^2} - d_i \right)^2, n=4 \quad (3)$$

④根据式(4)更新每个粒子的速度和位置:

$$v_{ij}(t+1) = \varphi \{ v_{ij}(t) + c_1 r_1 [p_{ij} - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [p_{gj} - x_{ij}(t)] \} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{2}{2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}}, C = c_1 + c_2 \quad (5)$$

其中, φ 称为收缩因子, v_{ij} 表示粒子的飞行速度, c_1 和 c_2 表示加速常数, r_1 和 r_2 表示 2 个随机值, x_{ij} 表示粒子的当前位置, p_{ij} 表示当前粒子的最优位置, p_{gj} 表示全局最优位置。针对经典粒子群优化算法容易出现早收敛的情况,利用收缩因子方式选取合适的参数,取消对速度边界的限制,从而更好地约束粒子飞行速度。

⑤计算更新位置后每个粒子的适应度值,将每个粒子的适应度值与其以前经历过的最好位置的适应度值做比较,如果当前位置更好,则将其当前的位置作为该粒子的当前历史最优位置。然后再与全局最优位置比较,如果也更好,则更新全局最优位置的值。

⑥若达到最大迭代次数,算法终止,输出最优定位结果 (x_p, y_p) 。否则返回步骤③继续搜索。

3 定位实验

3.1 实验系统

我们搭建了如图 3 所示的 1m×1m×1m 的室内定位环境,4 个功率为 15W 的 LED 灯作为信号源安装在天花板上,以其中一个灯的位置定义为坐标原点,4 个灯分别固定在 (0,0)、(60,0)、(60,60) 和 (0,60) 的位置,单位为 cm。接收端采用感光面积为 1cm² 的光照度探测器接收信号。



图 3 室内定位实验环境

3.2 定位结果及分析

为了减小直接利用朗伯辐射模型测距带来的偏差,我们根据图 3 所示的实验环境建立测距经验模型。在室内地面区域随机选取采集点,根据 4 个 LED 的坐标、采集点的坐标,通过三维距离公式分别求得采集点到 4 个 LED 的距离 d_i ($i=1,2,3,4$)。然后根据这些采集点的光照度值和相应的 d_i 进行数据拟合。图 4 是由 LED1 测试数据得到的拟合关系曲线,拟合后的经验模型为 $d_1 = 0.0005 \times r_1^2 - 0.4678 \times r_1 + 188.509$,其中 r_i 表示光照度。同理,可得 LED2、LED3 和 LED4 对应的经验模型分别为 $d_2 = 0.0005 \times r_2^2 - 0.4442 \times r_2 + 185.907$ 、 $d_3 = 0.0005 \times r_3^2 - 0.4171 \times r_3 + 179.582$ 和 $d_4 = 0.0004 \times r_4^2 - 0.3820 \times r_4 + 174.087$ 。

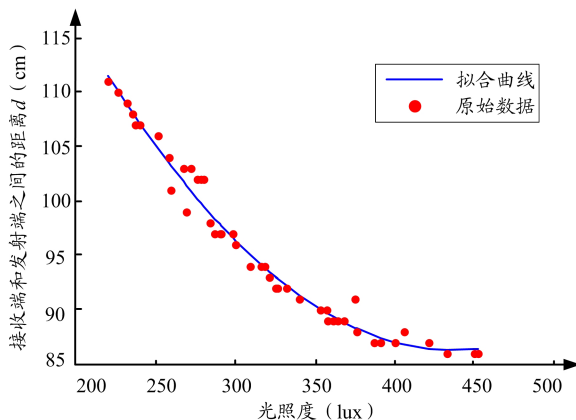


图 4 光照度与距离的拟合曲线

为了验证本文设计的基于 CFPSO 定位算法的定位精度,实验中同时对最小二乘算法、基于 4 个 LED 的质心加权定位算法^[7]和基于 SA 的 PSO (SA_PSO) 定位算法^[8]进行了测试。我们在室内随机选取目标点进行测试,采用定位误差 err 作为评价不同算法的标准:

$$err = \sqrt{(x - x_e)^2 + (y - y_e)^2} \quad (6)$$

其中, (x, y) 和 (x_e, y_e) 分别表示实际目标位置坐标和当前估计的位置坐标。当选取的目标读数为 10~60 个时,利用不同算法得到的平均定位误差如图 5 所示。可以看出,质心加权算法定位精度最低,SA_PSO 算法比最小二乘算法有一定改进,而本文基于 CFPSO 算法设计的定位算法的定位精度最好,所有测试点数下的定位误差均不大于 5cm。

图 6 是随机选取 50 个测试点利用 CFPSO 算法得到的定位误差分布直方图。可以看出,90% 测试点的定位误差不大于 5cm,47.5% 测试点的定位误差不大于

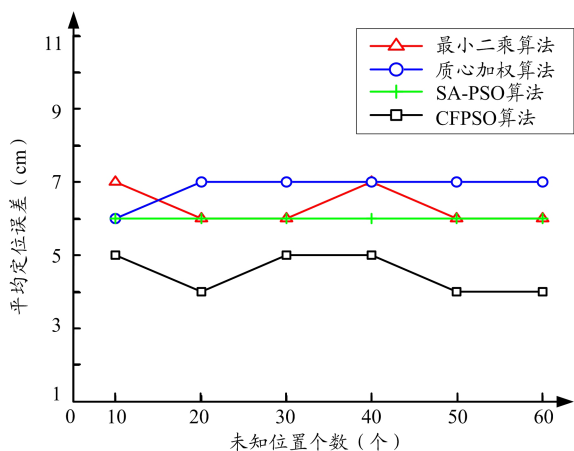


图5 不同算法的定位结果

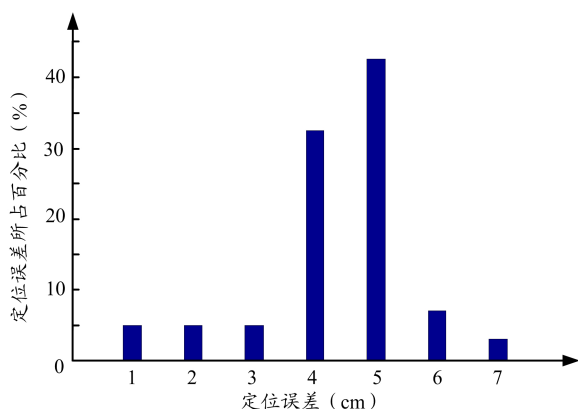


图6 定位误差分布直方图

4cm,最大定位误差为7cm,仅占3%。因此,CFPSO定位算法性能较稳定。

算法复杂度是衡量算法性能的主要指标之一,在实验中,每种定位算法运行100次,求取平均定位时间。最小二乘法、质心加权定位算法、SA-PSO定位算法以及CFPSO定位算法的平均定位时间如图7所示。

综合定位精度和运行时间表明,虽然最小二乘法运行时间短,但是其定位精度有限。SA-PSO算法的定

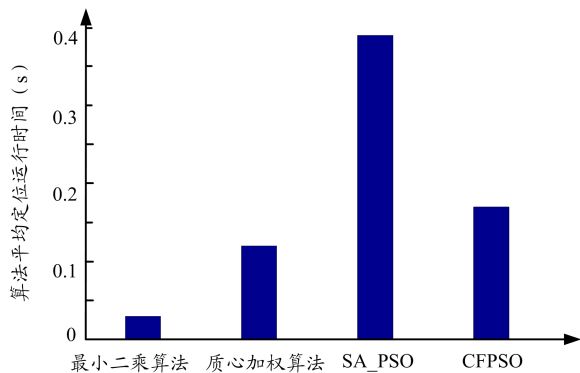


图7 各种算法运行时间图

位精度有改善,但运行时间最长,因为该算法通过SA算法来改进PSO算法,算法相对比较复杂。CFPSO算法的运行时间比质心加权算法略大,但定位精度最高。因此,在保证定位精度的条件下,本文基于CFPSO设计的定位算法复杂度相对较低。

4 结束语

可见光室内定位问题可转化为全局优化问题,PSO算法在解决全局优化问题上表现出较好的寻优能力,但是经典PSO算法容易早收敛导致定位结果误差较大,本文在经典PSO算法的基础上引入收缩因子设计定位算法,同时考虑实际中的非理想因素影响,建立测距经验模型代替朗伯模型测距,得到了较好的定位结果。在室内搭建的可见光定位实验环境中进行测试,实验结果表明:使用基于CFPSO的定位算法时,90%测试点的定位误差不大于5cm,47.5%测试点的定位误差不大于4cm。可见,CFPSO定位算法和测距经验模型能够在算法复杂度代价较小的条件下获得更高的定位精度和稳定性。

参考文献:

- [1] ZHUANG Y, HUA L C, QI L N, et al. A survey of positioning systems using visible LED lights [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 1963–1987.
- [2] WU N, FENG L H, YANG A Y, et al. Localization accuracy improvement of a visible light positioning system based on the linear illumination of LED sources[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(5): 1–10.
- [3] 迟楠. LED可见光通信关键器件与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2015:238–257.
- [4] ZHANG R, ZHONG W D, KEMAO Q, et al. A single LED positioning system based on circle projection [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 1–10.
- [5] LV H, FENG L, YANG A Y, et al. High accuracy VLC indoor positioning system with differential detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3):1–14.
- [6] HOU Y, XUE Y, CHEN C, et al. A RSS/AOA based indoor positioning system with a single LED lamp [C]//IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 15–17, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015.
- [7] 胡晴晴,王旭东,吴楠. 基于距离加权的室内可见光定位算法[J]. 光电工程, 2015, 42(5): 1–6.
- [8] CAI Y, GUAN Y P, WU Y X, et al. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using particle swarm optimization[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1–15.
- [9] CLERE M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[J]. Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation, 1999(8): 1951–1957.