光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023050901

# 基于改进粒子群算法的室内可见光定位研究

王加安*，顾偲雯，张思琦
（常州工学院 光电工程学院，江苏 常州 213032）

**摘　要：** 为了提高现行室内可见光定位系统的定位精度，提出考虑噪声干扰的动态惯性权重及认知因素的改进型粒子群算法。首先，将决定定位精度的欧式距离转换为目标函数最小值优化问题；其次，利用惯性权重动态赋值，增强粒子群算法初期的全局搜索能力和后期的局部搜索能力；然后，利用正弦函数使得个体认知因素值非线性地减小，利用余弦函数使得群体认知因素值线性地增加，以进一步提升定位精度；最后，通过仿真与实验测试对所提定位算法进行验证。仿真测试结果表明，在5 m×5 m×3 m和5 m×4 m×3 m两种定位模型中，在0，0.5，1.0和1.5 m四个高度平面的空间定位平均误差分别为0.65和0.54 cm；实验结果显示，在搭建的1 m×1 m×0.8 m和1 m×0.8 m×0.8 m室内空间中的平均定位误差分别为2.67和1.81 cm。

**关键词：** 可见光通信；室内定位；动态惯性权重；改进型粒子群算法
**中图分类号：** TN929.1　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0729－07

## Research on Indoor Visible Light Location Based on Improved Particle Swarm Optimization

WANG Jiaan，GU Xiewen，ZHANG Siqi
（School of Optoelectronic Engineering，Changzhou Institute of Technology，Changzhou 213032，CHN）

**Abstract：** In order to improve the positioning accuracy of the current indoor visible light positioning system，an improved particle swarm optimization algorithm considering the dynamic inertia weight and cognitive factors of noise interference is proposed. Firstly，the Euclidean distance that determined the positioning accuracy was transformed into the optimization problem of the minimum value of the objective function. Secondly，the dynamic assignment of inertia weight was used to enhance the global search ability in the initial stage and the local search ability in the later stage of PSO. Then，the value of individual cognitive factors was reduced nonlinearly by sine function，and the value of group cognitive factors was increased linearly by cosine function，which further improved the positioning accuracy. Finally，the proposed localization algorithm was verified by simulation and experimental test. The results show that in the simulation test，in the 5 m×5 m×5 m and 5 m×4 m×3 m positioning models，the average spatial positioning errors of the four height planes of 0，0.5，1 and 1.5 m are 0.65 and 0.54 cm respectively. In the experimental test，the average positioning errors in the 1 m×1 m×0.8 m and 1 m×0.8 m×0.8 m indoor space are 2.67 and 1.81 cm respectively.

**Key words：** visible light communication；indoor positioning；dynamic inertia weight；improved particle swarm optimization algorithm

**收稿日期：**2023－05－09.
**基金项目：**江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB510041，21KJD530002).
* **通信作者：**王加安　**E-mail：**wangja@czu.cn

## 0 引言

随着无线传感器网络和物理网络技术的快速发展，对基于位置服务需求逐渐呈现出显著的增长趋势[1-3]。常用的全球定位系统(GPS)，由于建筑物内电磁波的强烈衰减以及高昂的成本，导致大的定位误差，不适合提供精确的室内定位。为了满足日益增长的室内定位服务需求，已经开发了 Wi-Fi、蓝牙、射频识别(RFID)和基于相机的定位系统来补充 GPS。上述所有定位系统都可以提供从几十厘米到几米的定位精度，其中一些已经在室内环境中使用。然而，由于成本高、定位精度低和电磁干扰等缺点，上述方案都存在一定的缺陷[4-7]。

基于可见光通信(VLC)的定位是一种新的室内定位解决方案，具有定位精度高、无电磁干扰、额外模块少、通信保密性好、可实现照明和通信一体化等优点[8]。基于 VLC 的定位系统可分为基于光电二极管 (PD)、基于图像传感器和基于太阳电池等多种形式，其中基于 PD 的定位系统因其简单性、可靠性和低成本等优点在室内定位领域有着广泛的应用。文献[9]演示了一个使用白光发光二极管(LED)的 VLC 系统，它可以在 1 m 的传输距离内实现 1 Gb/s 的数据速率。在基于 PD 的系统中，从信号源收集光信号，估计自身与信号源之间的距离，接收机通过接收信号强度(RSS)[10-13]、到达角(AOA)[14]、到达时间(TOA)[15-16]、到达时间差(TDOA)[17]实现定位。其中，TOA 和 TDOA 不受噪声的影响，AOA 通过接收信号的角度来测量距离，而这对于发射机的布局来说在现实中很难实现，PD 的接收范围对测量的 AOA 有很大的影响，导致定位精度有很大的误差，而 RSS 仅根据 RSS 来检测距离，在确保定位精度的同时降低了发射机电路的复杂度。但是在实际定位过程中基于 RSS 定位的三个圆无法理想地相交于一点，通常通过优化算法来提高定位精度，例如最小二乘法、加权最小二乘法、黄金正弦算法等[11,18-21]。文献[22]提出基于二维颜色特征直方图的改进 Camshift 算法，利用 6 盏 LED 光源在 2.1 m×1.1 m×2 m 空间内平均定位误差为 0.95 cm，尽管实现了较高的定位精度，但该定位精度为固定高度获得，未考虑整个空间的情况。文献[23]提出了在二维和三维情况下基于 RSS 的改变接收器高度的可见光定位，并提出了一种通过改变接收器高度来提高定位精度的方法，通过实施垂直可测位移方法，在仿真条件下，将整个房间中一次反射的高度误差控制在 34 cm 以内，未进行实验验证。

对于室内可见光定位系统易受到噪声干扰，定位精度不高，提出动态惯性权重及认知因素的改进型粒子群算法。在将欧式距离转换为目标函数最小值求解的基础上，利用动态变化的动态惯性权重值和认知因素值，增强算法获得最优解的能力，显著提高了定位系统的精度，降低了定位误差，取得了较好的定位效果。

## 1 室内可见光定位系统模型

### 1.1 室内定位空间模型

室内可见光定位系统的模型如图 1 所示。作为信号发生器的光源 LED 分布在室内的天花板上，为了满足室内照度的国际标准，通常需要使用多个 LED 光源，它们的坐标分别为：$L_1(x_1,y_1,z_1)$，$L_2(x_2,y_2,z_2)$，$L_3(x_3,y_3,z_3)$，$L_4(x_4,y_4,z_4)$，利用光电二极管构成的光探测器作为信号接收端接收光强数据。

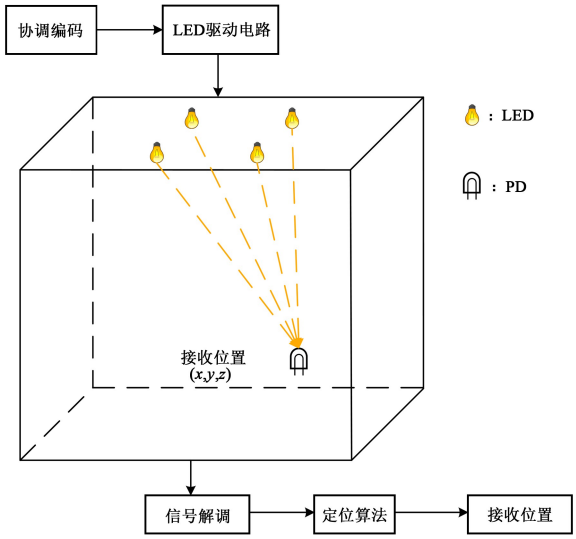



图 1 室内可见光定位系统模型

### 1.2 室内可见光定位系统信道

LED 分布在天花板上，PD 在室内模型中的任意位置接收光强信号。首先将带有位置信息的坐标编码进行信号调制，调制后的数字信号转化为模拟信号，经过信号放大后通过 LED 驱动电路将位置信息加载到 LED 上，光探测器 PD 将接收到的光信号转化成电信号，通过滤波和放大电路后将电信号转化成数字信号，最后通过信号解调得到位置坐标信

息，从而实现定位功能。

光信号在室内传输过程中，有一部分通过直射视距链路（LOS）被 PD 接收，还有一部分通过非直射视距链路（NLOS）即经过室内包括墙壁、地面等在内物体的反射后被 PD 接收，光信道存在一阶反射、二阶反射等形式，两种信道传输模型如图 2 所示。由于二阶反射及以上对光信道的影响非常小，可以忽略不计。将 LED 作为 Lambert 模型，LED 的辐照强度可以表示为：

$$I(\theta)=I(0)\cos^m(\theta)=\frac{m+1}{2\pi}\cos^m(\theta) \tag{1}$$

式中，$\theta$ 表示辐射角度，当 $\theta=\theta_{1/2}$ 时，$I(\theta)=\frac{1}{2}I(0)$，$m$ 表示 Lambert 系数：

$$m=\frac{\ln(1/2)}{\ln(\cos\theta_{1/2})} \tag{2}$$

式中，$\theta_{1/2}$ 表示 LED 的半功率角。此时 LOS 信道的增益可以表示为：

$$H(0)=\begin{cases}\dfrac{(m+1)A}{2\pi d^2}\cos^m\phi T(\psi)G(\psi)\cos\psi & 0\leqslant\psi\leqslant\psi_c\\ 0 & \psi>\psi_c\end{cases} \tag{3}$$

式中，$A$ 为探测器的有效面积，$d$ 为 LED 和 PD 之间的距离，$\phi$ 为 LED 辐射角，$\psi_c$ 为探测器的视场角，$T(\psi)$为滤光器的增益，$G(\psi)$为光学聚光器的增益。由于一阶反射带来的 NLOS 信道的增益可以表示为：

$$H_{\text{ref}}(0)=\begin{cases}\dfrac{(m+1)A}{2\pi d_1^2 d_2^2}\rho\,\mathrm{d}A_{\text{wall}}\cos\alpha\cos\beta\cos^m\phi T(\psi)G(\psi)\cos\psi, & 0\leqslant\psi\leqslant\psi_c\\ 0, & \psi>\psi_c\end{cases} \tag{4}$$

式中，$d_1$ 为 LED 与反射点之间的距离，$d_2$ 为反射点与接收器之间的距离，$\rho$ 为反射系数，$\mathrm{d}A_{\text{wall}}$ 为墙壁微反射元面积；$\alpha$ 为 LED 与反射点之间的辐射角，$\beta$ 为反射点和接收器之间的辐射角。接收器接收到的光信号为：

$$P_r=P_tH(0)+P_tH_{\text{ref}}(0)+\sigma^2 \tag{5}$$

式中，$P_r$ 为接收功率，$P_t$ 为辐射功率，$\sigma^2$ 为噪声方差，可由下式给出：

$$\sigma^2=\sigma^2_{\text{shot}}+\sigma^2_{\text{thermal}} \tag{6}$$

式中，$\sigma^2_{\text{shot}}$ 为散粒噪声，$\sigma^2_{\text{thermal}}$ 为热噪声：

$$\sigma^2_{\text{shot}}=2q\xi P_rB+2qI_{\text{bg}}B \tag{7}$$

$$\sigma^2_{\text{thermal}}=\frac{4kT}{R_L}B \tag{8}$$

式中，$q$ 为电荷数，$\xi$ 为接收器的响应速率，$I_{\text{bg}}$ 为暗电流，$B$ 为带宽，$T$ 为绝对温度，$R_L$ 为负载，$k$ 为玻尔兹曼常数。

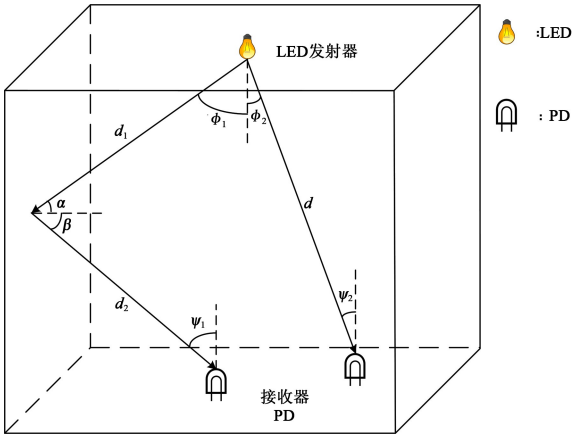



图 2　LOS 和 NLOS 信道的传输模型

## 2　改进 PSO 室内定位算法

光信号由 LED 光源发出后，由于室内空间存在多径效应，光信号在传输过程中会存在损耗，接收器在任意位置接收到的光信号会与该位置实际的光信号之间存在差异，通过计算差异值的大小，将定位问题转化为优化问题，即求解公式(9)的最小值问题。

$$F(x,y,z)=\sum_{i=1}^{4}\sqrt{(x_i-x_p)^2+(y_i-y_p)^2+(z_i-z_p)^2}-D_i \tag{9}$$

式中，$(x_i,y_i,z_i)$为 LED 位置坐标，$(x_p,y_p,z_p)$为 PD 位置坐标，$D_i$ 为 LED 和 PD 之间的距离。

粒子群算法由单个粒子组成，每个粒子都可以看作是一个潜在的解，每个粒子在空间中以一定的速度运动。粒子将根据自身经验和其他粒子的经验动态调整速度，并向组中最佳粒子的位置移动，从而获得待优化问题的最优解。粒子通过式(10)和(11)更新其速度和位置：

$$v_i(n+1)=w\times v_i(n)+c_1\times r_1\times(Pbest_i(n)-x_i(n))+c_2\times r_2\times(Gbest_i(n)-x_i(n)) \tag{10}$$

$$x_i(n+1)=x_i(n)+v_i(n) \tag{11}$$

式中，$n$ 为迭代次数，$x_i$ 和 $v_i$ 分别代表粒子在群体中的位置和速度，$Pbest$ 为个体极值，$Gbest$ 为群体

极值，$r_1$ 和 $r_2$ 是介于 0 和 1 之间的随机常数，$w$ 为惯性权重，取值为常数，其值决定粒子的全局和局部搜索能力，$c_1$ 为个体认知因素，$c_2$ 为群体认知因素，取值为常数，它们的值也会影响粒子的全局和局部搜索能力。

为了实现 PSO 的惯性权重值在搜索的初始阶段较大，并增强全局搜索能力，而惯性权重值则在搜索的后期迅速减小，并增强局部搜索能力，以更大的可能性锁定最优解，对惯性权重进行了修改：

$$w(k)=w_{\max}-(w_{\max}-w_{\min})R^2 \tag{12}$$

式中，$R=n/n_{\max}$，$n$ 为当前迭代次数，$n_{\max}$ 为最大迭代次数，$w_{\max}$ 为惯性权重的初始值，$w_{\min}$ 为最后一次迭代的惯性权重值。

对于 $c_1$ 和 $c_2$，为了进一步提高算法的优化能力，提升定位精度，通过正弦函数使得 $c_1$ 的值可以非线性地减小，通过余弦函数使得 $c_2$ 的值可以线性地增加：

$$c_1=2\sqrt{1-|\cos\pi/2\times R|} \tag{13}$$

$$c_2=2\sqrt{|\cos\pi/2\times R|} \tag{14}$$

基于改进 PSO 算法室内定位步骤如下：

①根据公式(9)建立评估函数；

②随机生成一组数量为 $N$ 的粒子，初始化粒子群迭代时间、最大和最小惯性权重、粒子的初始位置和速度以及其他参数。每个粒子对应于坐标$(x,y)$作为定位系统中的初始位置；

③根据公式(9)计算粒子的评价函数值，比较所有粒子的函数值，找到最佳评价函数值 *Gbest*，并记录此时的粒子位置为最佳位置 *Pbest*；

④根据公式(10)和公式(11)更新粒子的速度和位置，再次计算所有粒子的函数值，更新最佳评估函数值 *Gbest*，并更新粒子的最佳位置 *Pbest*；

⑤当达到迭代次数时，输出评估函数值 *Gbest* 和粒子的最佳位置 *Pbest*，并输出最佳定位结果$(x_p,y_p)$，否则返回步骤 4。

## 3 仿真与实验

为了验证本文提出的改进 PSO 算法，分别进行了仿真测试和实验测试。

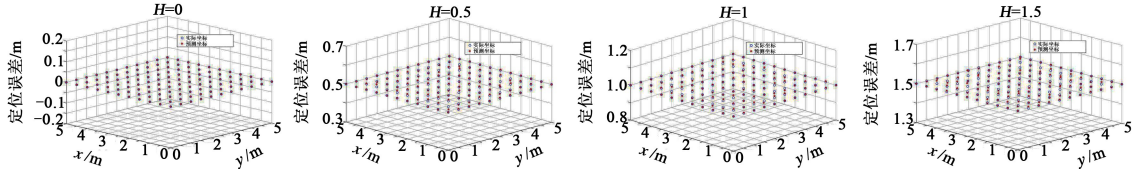
### 3.1 仿真测试

本文分别搭建了典型空间 5 m×5 m×3 m 大小及非典型空间 5 m×4 m×3 m 大小的仿真测试模型。在 5 m×5 m×3 m 模型中，4 个 LED 光源坐标分别为(1 m，1 m，3 m)，(1 m，4 m，3 m)，(4 m，1 m，3 m)和(4 m，4 m，3 m)，在 5 m×4 m×3 m 模型中 4 个 LED 光源的位置分别为(1 m，2 m，3 m)，(1 m，3 m，3 m)，(4 m，2 m，3 m)和(4 m，3 m，3 m)。在两个模型空间中分别选择高度为 $H=0$ m，0.5 m，1 m 和 1.5 m 的 4 个平面，每个平面以 5 cm×5 cm 划分网格作为定位测试点。仿真参数如表 1 所示。

**表 1 定位系统仿真参数**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| LED 发射功率 $P_t$/W | 5 |
| 种群数 $N$ | 1 000 |
| 最大迭代次数 $n_{\max}$ | 200 |
| 最大权重 $w_{\max}$ | 0.9 |
| 最小权重 $w_{\min}$ | 0.5 |
| 个体认知因素 $c_1$ | 公式(13) |
| 群体认知因素 $c_2$ | 公式(14) |

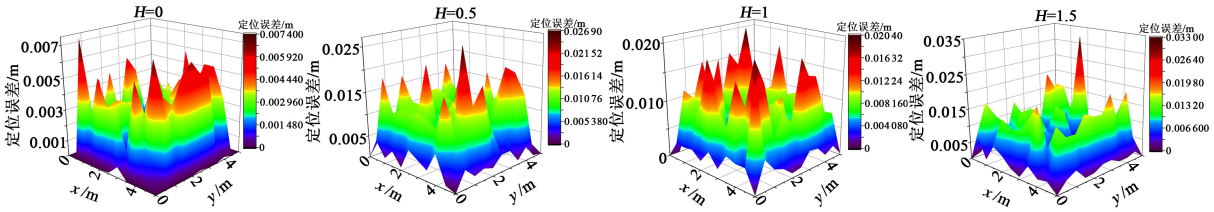
首先在典型空间模型中进行仿真测试，结果如果图 3 所示。图中 $x$ 轴、$y$ 轴表示定位点的坐标，$z$ 轴表示定位误差，实际定位点用蓝色“O”表示，预测点用红色“*”表示。




(a) $H=0$ m (b) $H=0.5$ m (c) $H=1$ m (d) $H=1.5$ m

图 3 典型空间模型实际坐标与预测坐标分布

由图 3 可以看出，当高度 $H=0$ m 时，实际坐标与预测坐标的位置较接近，表示定位误差较小，随着高度 $H$ 的上升，实际坐标与预测坐标之间的距离增大，表示定位误差逐渐增大。为了进一步分析和评估系统的定位性能，对 4 个高度层的定位误差进行了定量分析，如图 4 所示。

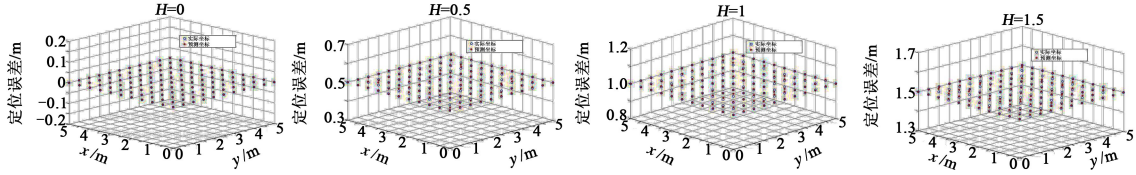



（a）$H=0$ m　（b）$H=0.5$ m　（c）$H=1$ m　（d）$H=1.5$ m

图 4　典型空间模型不同高度定位误差结果分布

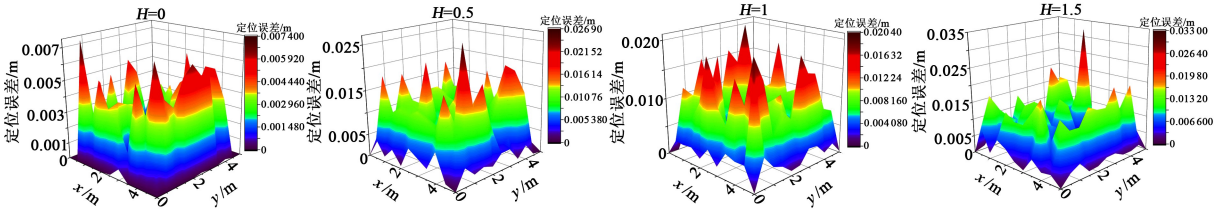
图 4 分别为 4 个高度层各个测试点的定位误差，当高度 $H=0$ m 时，平均定位误差为 0.21 cm，最大定位误差为 0.74 cm，达到毫米级定位精度；当高度 $H=0.5$ m 时，平均定位误差为 0.86 cm，最大定位误差为 2.69 cm，平均定位误差达到毫米级；当高度 $H=1$ m 时，平均定位误差为 0.76 cm，最大定位误差为 2.03 cm，平均定位误差达到毫米级；当高度 $H=1.5$ m 时，平均定位误差为 0.78 cm，最大定位误差为 3.3 cm，平均定位误差达到毫米级。四个高度平面的定位误差小于 3 cm 的占比为 99.8%，仅在 $H=1.5$ m 高度层有 1 个测试点的定误差超过 3 cm，四个高度平面的定位误差小于 2 cm 的占比为 98.6%。综上分析，在典型空间模型中，随着高度的增加，接收器视场角对接收器接收到光信号的限制不断增强，测试点的最大定位误差和平均定位误差不断增大，但平均定位误差依然达到毫米级的定位精度。

为了进一步验证本文提出的算法的有效性，我们对非典型空间模型同样进行了仿真测试，结果如图 5 所示。与典型空间模型相同，随着高度的增加，平均定位误差与最大定位误差也增大，定量分析如图 6 所示。




（a）$H=0$ m　（b）$H=0.5$ m　（c）$H=1$ m　（d）$H=1.5$ m

图 5　非典型空间模型实际坐标与预测坐标分布



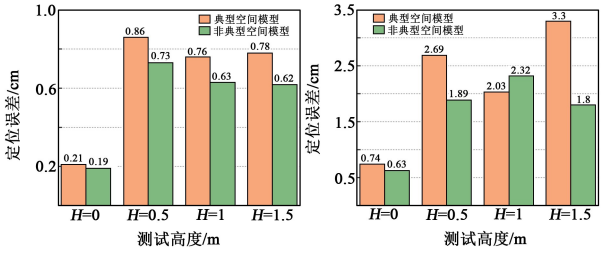

（a）$H=0$ m　（b）$H=0.5$ m　（c）$H=1$ m　（d）$H=1.5$ m

图 6　非典型空间模型不同高度定位误差结果分布

由图 6 可知，当高度 $H=0$ m 时，平均定位误差为 0.19 cm，最大定位误差为 0.63 cm，已经达到毫米级的定位精度；当高度 $H=0.5$ m 时，平均定位误差为 0.73 cm，最大定位误差为 1.89 cm，平均定位误差达到毫米级；当高度 $H=1$ m 时，平均定位误差为 0.63 cm，最大定位误差为 2.32 cm，平均定位误差达到毫米级；当高度 $H=1.5$ m 时，平均定位误差为 0.65 cm，最大定位误差为 1.8 cm，平均定位误差达到毫米级。四个高度平面的定位误差均小于 3 cm，四个高度平面定位误差小于 2 cm 的占比为 99.8%，仅在 $H=1$ m 高度层有 1 个测试点的定误差超过 2 cm，四个高度平面的定位误差小于 1 cm 的占比为 82.1%。综上分析，在非典型空间模型中，随着高度的增加，接收器视场角对接收器接收到光信号的限制依然存在，测试点的最大定位误差和平均定位误差不断增大，但平均定位误差仍然达到毫米级的定位精度。

图 7 为两种空间模型定位误差对比图，由图 7（a）可知，非典型空间模型的平均定位误差为 0.54 cm，小于典型空间模型的平均定位误差

0.65 cm，平均定位精度提升了 16.9%。尽管如此，两种空间模型的平均定位误差均达到了毫米级。由图 7(b)可知，非典型空间模型的最大定位误差为 2.32 cm，小于典型空间模型的最大定位误差 3.30 cm，最大定位精度提升了 29.7%。说明非典型空间模型由于有一边的距离变小，在接收器视场角相同的情况下能够接收到更多的光信号，提升了定位精度。




(a) 平均定位误差 (b) 最大定位误差

图 7 两种空间模型定位误差对比图

### 3.2 实验测试

为了进一步测试所提出的改进 IPSO 算法的有效性，分别搭建了 1 m×1 m×0.8 m，1 m×0.8 m×0.8 m 的实验测试系统，如图 8 所示，每间隔 20 cm 选取点进行测试，各测试点的误差分布如图 9 所示。

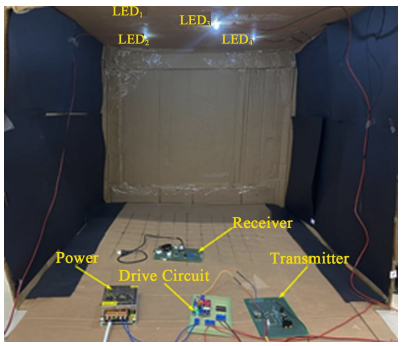
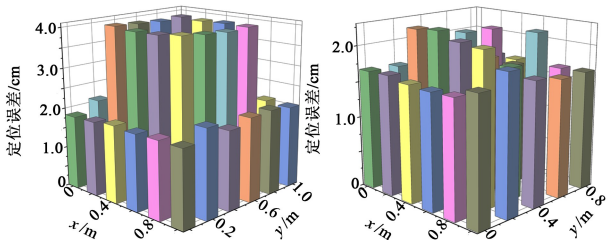



图 8 实验测试系统




(a) 1 m×1 m×0.8 m 实验 (b) 1 m×0.8 m×0.8 m 实验

图 9 两种测试实验定位误差图

由图 9 可知，在 1 m×1 m×0.8 m 测试系统中，平均定位误差为 2.67 cm，85%的测试点定位误差小于 4 cm，最大定位误差为 4.08 cm；在 1 m×0.8 m×0.8 m 测试系统中，平均定位误差为 1.81 cm，87%的测试点定位误差小于 2 cm，最大定位误差为 2.26 cm。表明改进后的粒子群优化算法在实测系统中也具有较高的定位精度。

## 4 结论

针对传统室内可见光定位系统定位精度不高，容易受到噪声干扰，提出了一种改进型 PSO 优化算法，实现 PSO 惯性权重值在搜索的初始阶段较大，增强全局搜索能力，而惯性权重值则在搜索的后期迅速减小，增强局部搜索能力，以更大的可能性锁定最优解，显著提高了定位系统的精度，降低了定位误差。在典型空间 5 m×5 m×3 m 大小仿真模型中，实现了接收面高度为 0，0.5，1 和 1.5 m 的精确定位，平均定位误差为 0.65 cm，在非典型空间 5 m×4 m×3 m 大小的仿真模型中实现了接收面高度为 0，0.5，1 和 1.5 m 的精确定位，平均定位误差为 0.54 cm。在 1 m×1 m×0.8 m 实际测试系统中平均定位误差为 2.67 cm，在 1 m×0.8 m×0.8 m 实际测试系统中平均定位误差为 1.81 cm，取得了较好的定位效果。

**参考文献：**

[1] Peng Q, Guan W P, Wu Y X, et al. Three-dimensional high precision indoor positioning strategy using Tabu search based on visible light communication[J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 016101.

[2] Ao C Y, Hsia W C. An indoor positioning system based on the dual-channel passive RFID technology[J]. IEEE Sensors J., 2018, 18(11): 4654-4663.

[3] Bianchi V, Ciampolini P, De Munari I. RSSI-based indoor localization and identification for ZigBee wireless sensor networks in smart homes [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(2): 566-575.

[4] Cai Y, Guan W P, Wu Y X, et al. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using particle swarm optimization[J]. IEEE Photon. J., 2017, 9(6): 1-20.

[5] Ho Y H, Chan H. Decentralized adaptive indoor positioning protocol using bluetooth low energy [J]. Computer Communications, 2020, 159: 231-244.

[6] 迟 楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京：清华大学出版社，2013.
Chi Nan. LED Visible Light Communication Technology[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2013.

[7] 陈雄斌，闵成彧. 看得见的无线通信技术——可见光通信[J]. 物理，2020，49(10)：688-696.
Chen Xiongbin, Min C Y. Visible wireless communication

technology——visible light communication[J]. Physics, 2020, 49(10): 688-696.

[8] 赵　黎, 韩中达, 张　峰. 基于神经网络的可见光室内立体定位研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0706004.
Zhao Li, Han Zhongda, Zhang Feng. Research on stereo location in visible light room based on neural network[J]. Chinese J. of Lasers, 2021, 48(7): 0706004.

[9] Wei C, Hsu, Wai C, et al. High speed imaging 3×3 MIMO phosphor white-light LED based visible light communication system[J]. IEEE Photon. J., 2016, 8(6): 7907406.

[10] Shao S H, Khreish A, Khalil I. Enabling real-time indoor tracking of IoT devices through visible light retro reflection [J]. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2020, 19(4): 836-851.

[11] Sato T, Shimada S, Murakmi, et al. ALiSA: A visible-light positioning system using the ambient light sensor assembly in a smartphone[J]. IEEE Sensors J., 2022, 22(6): 4989-5000.

[12] 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 J., 2022, 22(2): 1461-1473.

[13] Arfaoui M A, Soltani M D, Tavakkolnia I, et al. Invoking deep learning for joint estimation of indoor LiFi user position and orientation [J]. IEEE J. on Sel. Areas in Communications, 2021, 39(9): 2890-2905.

[14] Steendam H, Wang T Q, Armstrong J. Cramer-Rao bound for AOA-based VLP with an aperture-based receiver[C]// Proc. of 2017 IEEE Inter. Conf. on Communications (ICC), 2017: 1-6.

[15] Zhao H X, Wang J T. A novel three-dimensional algorithm based on practical indoor visible light positioning[J]. IEEE Photon. J., 2019, 11(3): 1-8.

[16] 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): 127-135.
Cao Yang, Dang Yuchao, Peng Xiaofeng, et al. Indoor visible light localization method using TOA/RSS hybrid information [J]. Chinese J. of Lasers, 2021, 48(1): 127-135.

[17] 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 Photon. J., 2018, 10(4): 1-10.

[18] Steendam H. A 3-D positioning algorithm for AOA-based VLP with an aperture-based receiver[J]. IEEE J. on Sel. Areas in Communications, 2018, 36(1): 23-33.

[19] Othman R, Gaafar A, Muaaz L, et al. A hybrid RSS+AOA indoor positioning algorithm based on visible light communication [C]// Proc. of 2020 Inter. Conf. on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 2021: 1-5.

[20] Abe K, Sato T, Watanabe H, et al. Smartphone positioning using an ambient light sensor and reflected visible light[C]// Proc. of 2021 Inter. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2021: 1-8.

[21] 张慧颖, 王　凯, 于海越, 等. 基于自适应Levy飞行的黄金正弦可见光定位研究[J]. 激光技术, 2022, 46(4): 519-524.
Zhang Huiying, Wang Kai, Yu Haiyue, et al. Research on golden sine visible light positioning based on adaptive Levy flight[J]. Laser Technol., 2022, 46(4): 519-524.

[22] Xie H, Tan Z, Mao W, et al. High precision indoor positioning method based on visible light communication using improved Camshift tracking algorithm [J]. Opt. Communications, 2020, 468(19): 125599.

[23] Hao X L, Sun W J, Yu C Y, et al. Vertical measurable displacement approach for altitude accuracy improvement in 3D visible light positioning[J]. Opt. Communications, 2021, 490: 126914.

## 作者简介：

**王加安**(1990—)，男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为无线光通信、系统过程优化等。