

doi:10.3788/gzxb20174612.1206004

基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统

吴兴邦^{1,2}, 文尚胜^{1,2}, 华璩¹

(1 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510000)

(2 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510000)

摘 要: 为了提高室内定位精度, 实现三维定位, 提出一种基于蚁群算法的的可见光通信室内高精度三维定位系统。本系统采用了码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)调制技术, 解决了室内可见光通信多信号源之间的符号间干扰。系统中与发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光信号源地理位置相关的 ID 信息码经过直接扩频调制后加载至发光二极管驱动电路, 以光信号的形式在室内传播。光信号经过放大、滤波、采样处理后, 根据码分多址调制技术中扩频码的正交性恢复出 ID 信息及光强衰减信息。经过计算获得来自不同发光二极管的信号光强衰减因子, 利用蚁群算法的全局搜索性确定最优定位点。引入误差修复因子, 利用蚁群算法的并行搜索性对光强衰减因子偏差进行修正。仿真结果表明, 信噪比为 30 dB, 20 dB, 10 dB 的条件下, 算法的定位精度分别为 2 cm, 4 cm, 8 cm。当计算的精度高于 45 cm 时, 蚁群算法定位解的搜索效率明显高于遍历法。在 10 dB 的信噪比条件下, 对光强衰减因子进行修正后 100% 的测试点都实现了 5 cm 定位精度。实验结果表明, 20 dB 信噪比条件下, 92.59% 的测试点的定位误差小于 8 cm, 96.29% 的测试点定位误差小于 10 cm, 最大定位误差为 11.30 cm。经过误差修复后, 96.2% 的测试点实现了 3 cm 的定位精度, 61.6% 的测试点实现了 2 cm 的定位精度。本算法在实现了高精度定位, 减少了获得最优定位解的计算量。

关键词: 可见光通信; 室内定位; 蚁群算法; 高精度; 码分多址; 三维定位

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1206004-14

High Precision 3D Positioning System Design Using Visible Light Communication Based On Ant Colony Algorithm

WU Xing-bang^{1,2}, WEN Shang-shen^{1,2}, HUA Jun¹

(1 School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

(2 State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to improve indoor localization accuracy and realize three dimensional positioning, a high precision three dimensional positioning system for visible light communication based on ant colony algorithm is proposed. This system adopts Code Division Multiple Access (CDMA) modulation technology and solves the inter symbol interference between multiple signal sources in visible light communication. In the system, the ID information related to the geographical position of LED signal sources are loaded directly to the LED drive circuit through direct spread spectrum modulation. After the optical signal is amplified, filtered and sampled, the ID information and the intensity attenuation information can be recovered according to the orthogonality of the spread spectrum code in the Code

基金项目: 广东省及广州市科技计划项目 (Nos. 2013B090600048, 2015B010134001, 2015B010127004, 2015YT02C093, 201604040004, 201604010006) 资助

第一作者: 吴兴邦(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线光通信技术、信号处理技术。Email: WXBSCUT@163.com

导师(通讯作者): 文尚胜(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 LED 及 OLED 发光器件、可见光通信技术。Email: shshwen@scut.edu.cn

收稿日期: 2017-06-05; **录用日期:** 2017-08-28

<http://www.photon.ac.cn>

division multiple access modulation technology. After calculation, the signal intensity attenuation factors are obtained from different LEDs and the global searching property of ant colony algorithm is used to determine the optimum location point. The error correction factor is introduced and the parallel search of ant colony algorithm is used to correct the deviation of the intensity attenuation factors. The simulation results show that the positioning accuracy of the algorithm are 2 cm, 4 cm, 8 cm respectively when the condition of signal-to-noise ratio are 30 dB, 20 dB and 10 dB. When the computation accuracy is higher than 45 cm, the searching efficiency of the ant colony algorithm is higher than that of the ergodic method. After correcting the attenuation factor of light intensity, 100% of test points can reach the positioning accuracy of 5 cm under the signal-to-noise ratio condition of 10 dB. The experimental results show that under the condition of 20 dB signal-to-noise ratio, the positioning error of 92.59% of test points is 8 cm and 96.29% of the test points have three dimensional localization error of less than 10 cm. The maximum localization error is 11.30 cm. After error correction, 96.2% of the test points achieve the precision of 3 cm and 61.6% of the test points achieve the precision of 2 cm. The algorithm reduces the computation of the optimal localization solution and achieves high-precision positioning.

Key words: Visible light communication; Indoor positioning; Ant colony algorithm; High precision; Code division multiple access; three dimensional positioning

OCIS Codes: 060.4510; 070.6020; 150.2950

0 引言

全球定位系统(Global Positioning System, GPS)目前已被广泛应用于交通、测绘等许多行业.在运动导航,轨迹记录、大地测量、周边信息查询等定位领域的应用越来越广泛^[1-2].近年来室内定位技术的潜在应用吸引了越来越多的关注,如大型仓库的产品定位检测,大型建筑内部的导航服务(博物馆、购物中心、停车场等).但是当涉及到室内定位时,由于金属材料具有表面趋肤效应,信号在钢筋混凝土表层就被衰减吸收,来自卫星的无线电信号将被高建筑物阻挡,使得 GPS 等定位系统用于室内易导致较大的定位误差^[3].为了满足日益增长的室内定位服务需求,已经开发出了许多基于无线电波的室内定位技术,如红外定位、无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、蓝牙、蜜蜂协议(ZigBee)、超宽带(Ultra Wide Band, UWB)和超声波定位等^[4].而这些室内无线定位技术均存在相关局限性:1)UWB可用于室内精确定位,定位精度可保持在 0.1 m~0.5 m,但是相关器件成本很高.2)蓝牙器件和设备的价格比较昂贵,而且对于复杂的空间环境,蓝牙系统的稳定性稍差,受噪声信号干扰大,定位精度约为 5 m.3)RFID 技术作用距离短,一般最长为几十米.4)RFID 室内定位技术典型系统为 LANDMARK.而 LANDMARK 系统定位精度:平均仅为 1 m,且系统定位精度由参考标签的位置决定,参考标签的位置会影响定位效果;同时该系统为了提高定位精度需要增加参考标签的密度,然而密度较高会产生较大的干扰,影响信号强度.5)无线保真(Wireless Fidelity, Wi-Fi)收发器只能覆盖半径 90 米以内的区域,而且很容易受到其他信号的干扰,从而影响其精度,定位器的能耗也较高其定位精度仅为 2~3 m. ZigBee 的定位精度在 2 m 以内,平均 1 m.使用可见光通信(Visible Light Communication, VLC)来进行定位系统是解决室内定位问题的新思路.VLC 可以提高 LED 的利用效率,集照明与通信功能于一体,并且具有定位精度高,无电磁干扰,无通信盲区,通信保密性好,方便快捷,能耗较低等优点^[5-7].

室内可见光多信号源通信中需要解决的首要问题为多参考点通信带来的符号间干扰,常规的解决方案为频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)与时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术,但是考虑到实际室内环境中信号源数量可能较多,应用 FDMA 技术会导致接收机滤波器设计困难;应用 TDMA 技术会导致单个发射机的通信时间片过短,对控制器要求较高.为此本系统采用 CDMA 技术,对每个 LED 的地理 ID 信息进行直接扩频操作后由 LED 驱动电路驱动 LED 发射经过 CDMA 调制的光信号,由扩频码的正交性在接收机可分离来自不同 LED 的光信号.同时信号经过 CDMA 调制后,信号在频域展宽,在一定的信道容量的需求下,系统对噪声的敏感性下降,提高了系统整体稳定性.

在基于 VLC 的室内定位系统中,接收机可通过监测信号的到达时间(Time of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)、到达角(Angle of Arrival, AOA)或接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)等参数来估计接收器与信号源的距离.其中,TOA 系统中参考点及目标使用的时钟要完全同

步,TDOA 系统中要对发射器进行同步处理,由于同步问题,在实际应用中系统复杂程度较高^[8-9].AOA 系统虽然不需要实现参考点与目标之间的同步,但在实际应用中不仅发射器的空间布局难以实现,而且受到接收器接收信号范围的限制,以上两点导致其定位精度不高^[10-12].而基于 RSS 三边定位法的可见光通信室内定位系统简单易行,在国际上已有较多应用实例.

现有的基于可见光通信的室内定位系统大多只能实现二维定位服务,少数三维定位系统均采用遍历的搜索方法,定位算法的计算量较大,不利于在真实室内环境的应用.因此本文将蚁群算法与在室内可见光通信三边定位算法相结合,设计出一种基于蚁群算法的可见光通信室内定位系统,相比与传统的可见光通信定位系统,本系统不仅实现了三维定位服务,同时提高了定位算法效率,进一步地根据蚁群算法的信息素浓度函数可以计算算法定位误差,定位系统精度可调节,具有很大的灵活性.

1 基于可见光通信的室内三维定位系统

1.1 室内无线光通信信道模型

在室内无线光通信信道模型中,LED 为信号源,光电探测器件为接收机.如图 1 室内可见光通信场景图所示,室内可见光通信系统由两部分组成:1)安装在天花板上的 LED.2)接收机.为了描述室内通信过程,引入如下参数:LED 与接收机之间的距离定义为 d ,LED 发射角定义为 θ ,反射角与接收机相垂直的轴的夹角定义为 ϕ ,定位角与接收机有效面积垂直线之间的夹角定义为 φ .由于 LED 与光电探测器的距离较远,且光电探测器的尺寸相较于该距离可以忽略,因此可将 LED 视为朗伯型光源^[13],光强衰减因子可以通过直射链路(LOS)信道的增益来表示,即

$$H(0) = \frac{m_t + 1}{2\pi d^2} A T_s(\phi) G(\phi) \cos^{m_t}(\theta) \cos^{m_r}(\phi) \quad (1)$$

式中 A 为光电探测器(PD)的有效面积, $T_s(\phi)$ 为光滤波器增益, $G(\phi)$ 为聚光透镜增益, m_t, m_r 为朗伯常数^[12].

考虑到背景光噪声的影响,最终接收机的接收信号强度 P_r 可以写为

$$P_r = P_t H(0) + P_B \quad (2)$$

式中 P_B 为入射到 PD 的背景光功率, P_t 为 LED 的光功率.考虑到 PD 为电流型器件,为了方便系统噪声分析,其对光功率变化的响应可换算为平均光电流 μI_r 的变化,即

$$\mu I_r = \frac{R_p P_r}{A} \quad (3)$$

式中 R_p 为 PD 的响应率,只与接收的光波长有关,对于室内单色可见光通信系统而言可视为常数.对光信号接收系统而言,可将噪声分为以下两类:

- 1) 由光信号及背景光入射至 PD 所造成的散粒噪声.
- 2) 接收机电路系统的热噪声.

这两类噪声均可视为加性高斯白噪声,其和依然为高斯白噪声,建模时只需考虑其方差 σ_{noise}^2 ^[13-15],在接

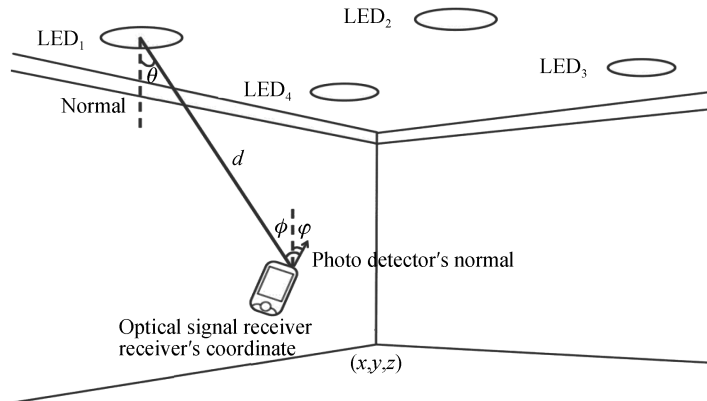


图 1 室内可见光通信场景图

Fig.1 The scene of indoor visible light communication

收机处表现为噪声电流

$$\sigma_{\text{noise}}^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qR_p P_r + 2qI_{\text{bg}} I_2 B \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{thermal}}^2 = \frac{8\pi k T_k}{G_0} \eta A I_2 B^2 + \frac{16\pi^2 k \Gamma T_k}{g_m} \eta^2 A^2 I_3 B^2 \quad (6)$$

式中, $q, B, k, I_{\text{bg}}, T_k, G_0, \Gamma, \eta, g_m$ 分别为元电荷电量, 等效噪声带宽, 波尔兹曼常数, 背景光电流, 绝对温度, 电路开环电压增益, 信道噪声常数, PD 的固定电容量和跨导. 故系统的信噪比可以表示为

$$\text{SNR} = \frac{P_r^2}{\sigma_{\text{noise}}^2} = \frac{P_r^2}{\sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2} \quad (7)$$

1.2 可见光通信室内定位系统原理

基于三边定位法确定接收机在三维空间中的坐标需要先获得接收机到各个通信参考点的距离, 而室内多参考点通信会导致各个发射机的信号混叠, 为此本系统采用 CDMA 调制技术, 在发射机侧, 各个 LED 的 ID 信息先经过扩频调制, 接收机收到混叠信号后通过解扩操作可以恢复来自各个 LED 灯的信号及其衰减信息, 如图 2, 具体步骤如下:

1) 各个 LED 获得一个与地理位置相关的二进制 ID 信息码序列, 该序列用于区分不同的 LED 信号源, 第 i 个 LED 的二进制 ID 信息码序列可以写为

$$\mathbf{S}_i = \{S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,N}\} \quad (8)$$

2) 产生 OOK 调制的 ID 信息码基带信号

3) 直接扩频调制, 在本系统中利用 Walsh 码作为扩频码, 在一个具有 n 个信源的 CDMA 通信系统中需要用到长度为 n 的 Walsh 码, Walsh 码可以由哈达玛矩阵产生, 一个具有 2^n 个元素的哈达玛矩阵可由迭代关系求出^[16]

$$H_n = \begin{pmatrix} H_{n-1} & H_{n-1} \\ H_{n-1} & \bar{H}_{n-1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

将具有 2^n 个元素的哈达玛矩阵按每行或每列取出, 可获得一组长度为 n 的 Walsh 序列

$$\mathbf{W}_i = \{C_{i,1}, C_{i,2}, \dots, C_{i,n}\} \quad (10)$$

直接扩频操作只需将每个 ID 信息码元与该组 Walsh 序列相乘, 第 i 个 LED 的 ID 信息码扩频后的信号为

$$\mathbf{S}'_i = \{S_{i,1} \mathbf{W}_i, S_{i,2} \mathbf{W}_i, \dots, S_{i,N} \mathbf{W}_i\} \quad (11)$$

4) 扩频后的信号经过 LED 驱动电路以光信号的形式发射, 根据上述的室内无线光通信信道模型可知, 并假设系统中所有的 LED 功率相同为 P_t , 接收机接收到的混叠光信号可以表示为

$$\mathbf{r} = P_t \sum_{k=1}^n H^{(k)}(0) \mathbf{S}'_k = \left\{ P_t \sum_{k=1}^n H^{(k)}(0) S_{k,1} \mathbf{W}_k, \dots, P_t \sum_{k=1}^n H^{(k)}(0) S_{k,n} \mathbf{W}_k \right\} \quad (12)$$

根据 Walsh 码的正交性质

$$\langle \mathbf{W}_{j_1} \times \mathbf{W}_{j_2} \rangle = \sum_{k=1}^n C_{j_1,k} C_{j_2,k} = \begin{cases} n, & j_1 = j_2 \\ 0, & j_1 \neq j_2 \end{cases} \quad (13)$$

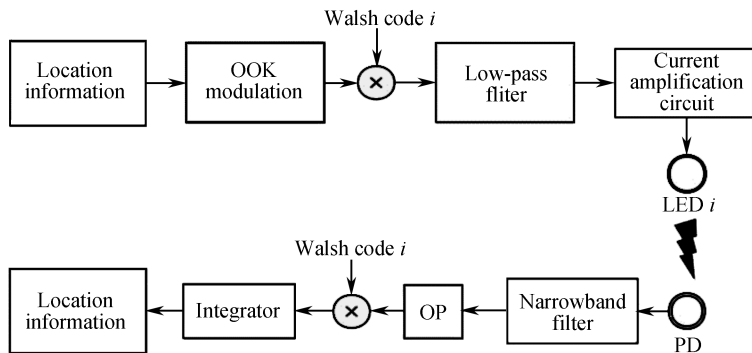


图 2 可见光通信室内定位系统原理图

Fig.2 The scene of indoor visible light communication

假想接收机需要恢复第 i 个 LED 的信号的第 j 个码元,只需要使用与扩频操作相同的 Walsh 序列即第 i 个 Walsh 序列对 r 的第 j 个元素进行内积运算

$$Y_{i,j} = \langle \mathbf{W}_i \cdot \mathbf{r}_j \rangle = \langle \mathbf{W}_i \cdot P_t \sum_{k=1}^n H^{(k)}(0) S_{k,j} \mathbf{W}_k \rangle = n H^{(i)}(0) S_{i,j} P_t \quad (14)$$

n 为系统中 LED 的总数,为已知量,可见从混叠信号中恢复出了光强衰减信息与不同 LED 的 ID 信息.

1.3 基于蚁群算法的室内定位算法

为了实现三维空间定位,提出利用蚁群算法来搜索三维空间中的最优定位解.蚁群算法是一种路径优化算法,在本定位问题中由于接收机高度未知,通过式(1)无法计算得到个体与信号源之间的空间距离,因此仅能通过遍历搜索的方式在三维空间中寻找定位问题的最优解,然而当搜索空间过大时,顺序遍历的计算量很大,无法适应真实的应用场景,而通过蚁群算法的路径优化,可以使得搜索个体在三维空间中以较短的路径收敛至三维定位问题的最优解,可大幅度提高计算效率.如图 3 所示,定位算法包含以下步骤:

1) 定义搜索空间范围,初始化算法参数

设室内的空间为范围为 (X, Y, Z) ,设置范围后算法将更具衰减系数在指定的空间范围内搜寻最优定位点.在蚁群算法中,算法的初始输入有蚁群规模 n ,转移概率常数 p ,信息素挥发常数 ρ ,及算法终止条件.改变算法初始输入条件将影响算法收敛速度.

2) 构建信息素浓度函数

根据上述的室内无线光通信直射链路 (LOS) 信道增益的表达式,假设 h 为接收机到发射机的垂直高度,一般情况下为了简化问题分析可以假设朗伯常数 $m_t = m_r = 1$,并且令 $C = \frac{m_t + 1}{2\pi} A T_s(\phi) G(\phi)$,则上信道增益简写为

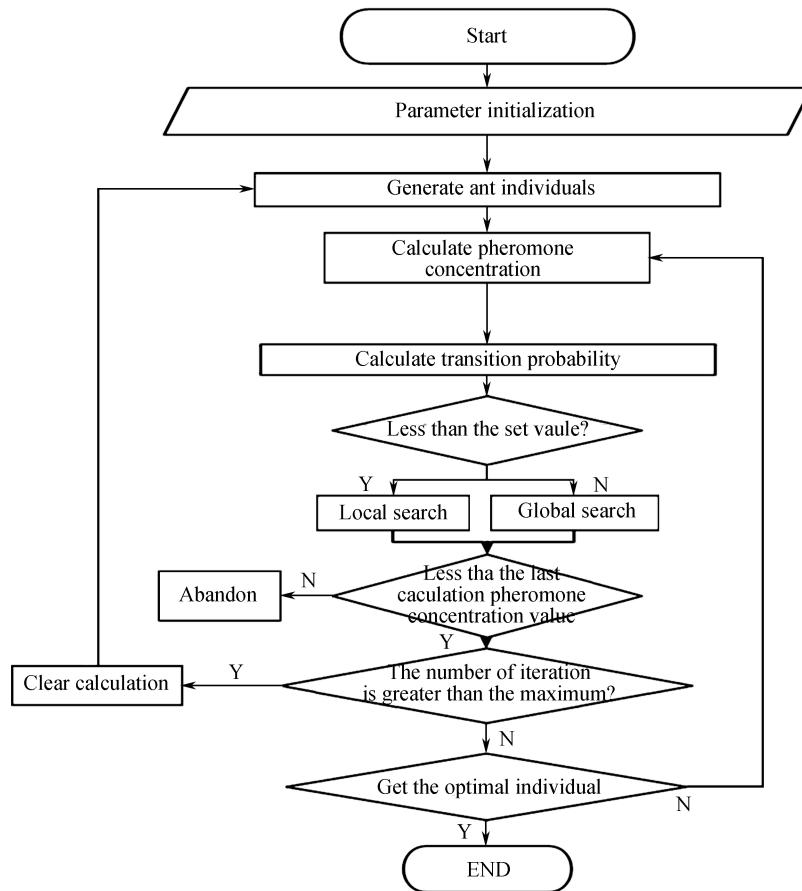


图 3 可见光通信室内定位算法框图

Fig.3 Block diagram of indoor positioning algorithm for visible light communication

$$P_r^{(n)} = \frac{C}{d^2} \cos(\theta) \cos(\phi) P \quad (15)$$

进一步地,假设接收机水平放置,则光电探测器(PD)的法线与垂直方向平行,则LED的辐射角 θ 与光电探测器(PD)的接收角 ϕ 相等.则由上述信道模型表达式可以计算出每一个发射机到接收机的距离 $d^{(n)}$,并假设以4个LED作为一个定位单元,且接收机与LED的垂直距离为 h

$$d^{(n)} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{P_t}{P_r^{(n)}}} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{1}{H^{(n)}(0)}} \quad (n=1,2,3,4) \quad (16)$$

计算每个蚂蚁个体与发射机的距离和实际距离的偏差,可以衡量该个体与最佳定位的差距,并将其作为信息素浓度函数.设第 i 只蚂蚁当前所在的空间位置坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,第 n 个LED的坐标为 $(x_{L_n}, y_{L_n}, z_{L_n})$,蚂蚁个体到第 n 个LED的距离可以表示为

$$L^{(n)} = \sqrt{(x_i - x_{L_n})^2 + (y_i - y_{L_n})^2 + (z_i - z_{L_n})^2}, \quad (n=1,2,3,4) \quad (17)$$

构造的信息素浓度函数为

$$\tau(x_i, y_i, z_i, d^{(1)}, d^{(2)}, d^{(3)}, d^{(4)}) = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (L^{(k)} - d^{(k)})^2} \quad (18)$$

显然在本定位问题中,如果一个蚂蚁越接近于最佳定位点,在该处遗留的信息素浓度应该越低.

3) 确定搜索策略

在蚁群算法中分为全局搜索与局部搜索两种搜索策略,在本最优定位解的问题中,如果蚂蚁个体所处的三维空间位置的信息素浓度越低,表示与最优解偏差越小,则该处附近存在最优解的概率越大,应当采用局部搜索策略,反之则认为该处附近存在最优解的概率很小应当采取全局搜索策略,定义第 i 只蚂蚁的转移概率函数为

$$p_i(\tau_i) = \frac{\tau_i - \tau_{\min}}{\tau_i} \quad (19)$$

其中 τ_{\min} 为所有蚂蚁个体所在处最低的信息素浓度,算法初始输入给定了转移概率常数,如果 $p_i(\tau_i) < p$,应当采取局部搜索策略,反之如果 $p_i(\tau_i) > p$ 应当采取全局搜索策略.

4) 局部搜索

为了提高搜索效率,定义单次搜索的步长系数

$$\lambda = 1/m \quad (20)$$

式中 m 为搜索的次数, λ 代表一次蚂蚁局部搜索中的移动步长,可见在算法开始时移动步长相对较大,有助于扩大搜索范围;在算法后期移动步长很小有助于提高收敛精度.

5) 全局搜索

在全局搜索中,只需在指定三维空间范围内随机移动即可.

6) 信息素的累积与挥发机制

在每次计算结束后,蚂蚁所在新位置的信息素浓度值,应当为其上一次计算值经过比例衰减后加上本次信息素浓度函数计算值

$$\tau_{i,k} = \rho \tau_{i,k-1} + \tau(x_i, y_i, z_i, d^{(1)}, d^{(2)}, d^{(3)}, d^{(4)}) \quad (21)$$

式中 i 代表蚂蚁的序号, k 代表迭代计算的次数, ρ 为信息素挥发常数,为算法初始输入值.

7) 淘汰机制

使用轮盘赌选择法(Roulette Wheel Selection)对蚂蚁种群中的个体进行择优操作,在本定位问题中以信息素浓度函数值衡量个体与最优解大的的距离,当单个蚂蚁个体所处位置的信息素浓度函数值较小时,表示越接近于最优解,应该以较概率保留该个体,反之如果当单个蚂蚁个体所处位置的信息素浓度函数值较大时,应该以较小的概率保留该个体.定义第 i 个蚂蚁个体被淘汰的概率为

$$P_i = \frac{\tau_i}{\sum_{k=1}^n \tau_k} \quad (22)$$

其中 τ_i 代表第 i 个蚂蚁个体所处位置的信息素浓度值.为了维持蚂蚁种群规模不变,被淘汰的蚂蚁个体用当前最优个体(所处位置信息素浓度函数值最小的个体)替换.

8) 算法终止条件

一般而言需要设置两类终止条件,当单个蚂蚁个体所在位置的信息素浓度计算值小于给定的阈值,说明达到计算精度,可以退出算法;当迭代计算次数超过设定的阈值,说明可能收敛过慢,应当重新开始定位算法。

2 仿真与实验

2.1 仿真实验设计

为了测试本系统性能,在 Matlab 软件中建立了一个 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的室内定位系统模型.如图 4 所示,在长方体房间模型的四个顶点上安装 4 个 LED 信号源,它们的坐标分别为 $A(0,0,4)$, $B(3,0,4)$, $C(3,3,4)$ 和 $D(0,3,4)$,这 4 个信号源发射经过 CDMA 调制的 ID 信息,接收机使用光电二极管 (PD) 接收空间光信号,接收信号经过采样处理后执行解扩操作及定位算法.为了测试系统定位误差,仿真实验中选取了 1.00 m , 1.25 m , 1.5 m , 1.75 m 四个高度进行测试,在同一高度平面内,在长度与宽度方向上以 0.25 m 为变化单位放置接收机进行室内定位实验.具体的仿真参数如表 1 所示。

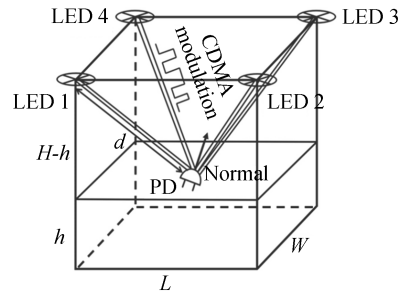


图 4 可见光通信室内定位系统仿真模型图
Fig.4 Simulation Model of indoor positioning system for visible light communication

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Reference
Indoor space unit size ($L \times W \times H$)/m	$3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 4\text{ m}$
Position of the four LED s (x, y, z)/m	LED1 (0,0,4) LED 2 (3,0,4) LED 3 (3,3,4) LED 4 (0,3,4)
Height of the receiver/m	1.0 to 1.75 (resolution:0.25)
Plane range of the receiver/m	(0.5,0.5) to (2.5,2.5) (resolution:0.25)
Transmitter power/W	10
The SNR of system/dB	10,20,30
The FOV of the transmitters/deg	60
The FOV of the receiver/deg	60
The effective area of PD/ cm^2	1.0
The photoelectric transformation efficiency/ $\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$	0.35
The gain of optical filter [$T_s(\phi)$]	1.0
The gain of optical concentrator [$G(\phi)$]	1.0
The modulation depth	12.5%
Population size	100
Transition probability p	0.2
Pheromone volatilization ρ	0.8
Pheromone concentration threshold (algorithm termination condition)	0.000 1

2.2 仿真实验结果

图 5 展示了定位算法的收敛过程,在本仿真实验中接收机的三维空间坐标(2.25 m, 1 m, 1 m)通信的信噪比条件为 20 dB.图中黑色三角形代表蚂蚁群体,蚂蚁群体可根据信息素浓度函数引导收敛至定位点处,在经过 10 次迭代运算后,出现了最优个体,且本次实验中最优解为(2.255 2 m, 0.978 3 m, 1.010 5 m).算法最优解与接收机的实际三维空间坐标依旧存在一定的偏差,偏差产生的主要原因是系统噪声.由于系统噪声的存在,实际测量获得的光强衰减因子与实际值存在一定的偏差导致在三维空间中信息素浓度为 0 的点并不存在,影响算法的收敛过程。

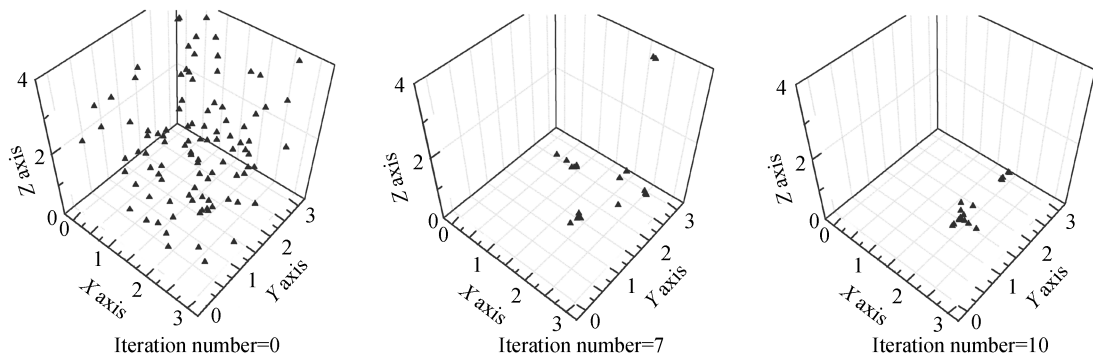


图5 定位算法收敛过程图

Fig.5 Convergence process diagram of localization algorithm

图6展示了在三种不同的信噪比条件下的所有定位仿真实验的结果,图中空心圆代表仿真实验测试点,实心矩形代表各仿真实验的定位结果.从图6可以看出当系统处于30 dB的较好的信噪比条件时,定位结果与接收机的真实位置十分接近,然而随着信噪比的下降,定位结果与接收机的真实位置出现偏差.图7展示了在三种不同信噪比条件下仿真实验的统计结果.

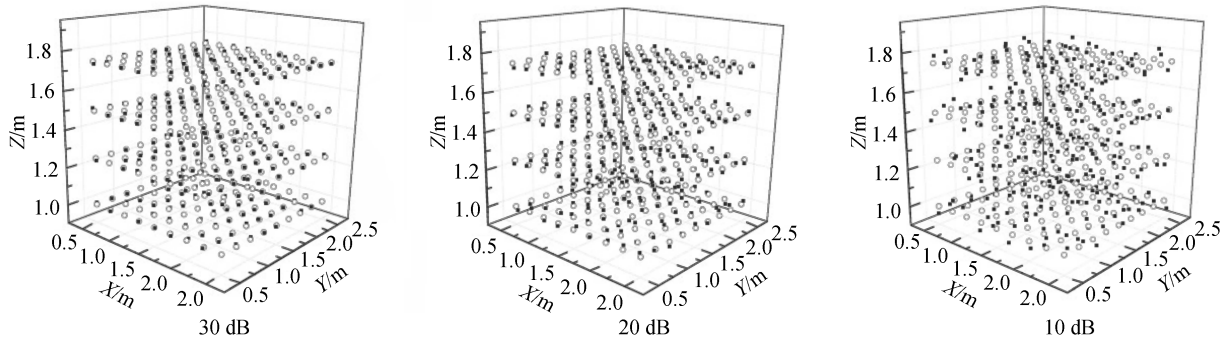


图6 在30 dB,20 dB,10 dB信噪比条件下仿真定位实验整体结果

Fig.6 The overall experiment results under the SNR of 30 dB, 20 dB, 10 dB

图7(a)为仿真实验的定位误差分布直方图,从这幅图可以看出,在30 dB信噪比条件下,定位误差主要分布在0~2 cm的区间内.详细的统计数据表明在324个测试点中全部测试点实现了5 cm的定位精度;当系统的信噪比降低至20 dB时,定位误差主要分布在2~4 cm,在324个测试点中322个测试点实现了5 cm的定位误差;而当系统的信噪比降低至10 dB时,出现了较大的定位误差,在此信噪比条件下定位误差主要分布在6~8 cm,且在此条件下324个测试点中仅有87个测试点实现了5 cm的定位精度.

图7(b)为仿真实验的定位误差累计分布曲线,通过统计80%的定位测试点的定位误差可以估计系统的定位精度.从此图可以看出,当系统的信噪比条件为30 dB时,超过80%的测试点实现了2 cm的定位精度;当系统的信噪比下降为20 dB时超过80%的测试点实现了4 cm的定位精度.而在10 dB的信噪比条件下80%的测试点仅能实现8 cm的定位精度.

在图7(c),(d),(e)中分析了在不同信噪比条件下定位误差的平面分布情况,直观来看在仿真实验中,模型的边角区域定位误差相比于模型的中间区域更大,经分析该现象产生的原因为(1)处在边角区域的LED的出射角 θ 较小使得在计算该LED与接收机的距离时对噪声更为敏感.(2)除去边角区域的LED外,来自其他3个LED的光信号已经超出了PD的视场角,导致PD的电流响应下降.图7(f),(g),(h)给出了更为详细的定位误差平面分布,从图中可以看出在仿真模型的长度与宽度方向的中部定位误差较小;而在接近于LED的区域定位误差相比与模型的中部呈现更大的定位误差.

从上述的分析可以看出当系统的信噪比较高时,本系统能实现较高的定位精度;而反正在较差的信噪比条件下定位误差会显著上升,在实际应用场景中当系统处于低信噪比的应用环境时需要通过相关手段来减小定位误差.

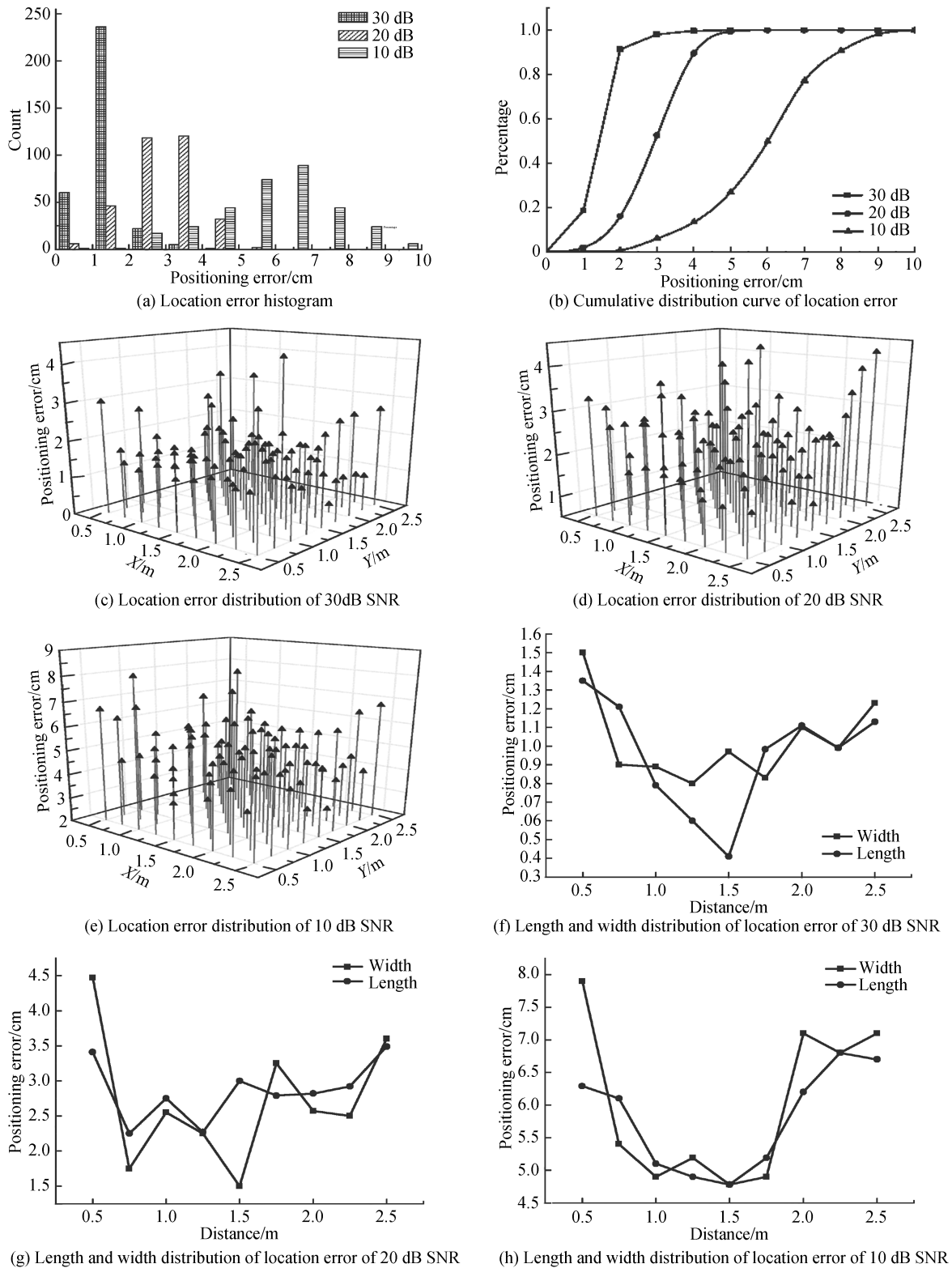


图7 仿真实验统计数据

Fig.7 Simulation experiment statistic data

2.3 定位误差修复算法

从上述的仿真实验可知,设计的定位算法可以在三维空间中通过光强衰减因子信息快速搜索确定定位问题的最优解;但是定位算法本身不具备误差修复能力,在较差的信噪比条件下由于光强衰减因子偏离真实值,导致空间中并不存在使得设计的信息素浓度函数值为0的点.如果能够通过修复光强衰减因子引导信息素浓度函数值收敛为0,则可以使得定位误差最小化.

基于这一假设且认为噪声引起的光强衰减因子的变化远小于其本身,可将修正后的光强衰减因子写为

$$H_c^{(n)}(0) = H^{(n)}(0) \pm \epsilon_n \quad (23)$$

并由此计算得到接收机与各个 LED 的距离可以表示为

$$d_c^{(n)} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{1}{H^{(n)}(0) \pm \epsilon_n}} \quad (24)$$

相应的得到的信息素浓度函数为

$$\tau(x_i, y_i, z_i, d^{(1)}, d^{(2)}, d^{(3)}, d^{(4)}, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4) = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (L^{(k)} - d_c^{(n)})^2} \quad (25)$$

ϵ_n 取值范围需要根据噪声的实际水平选择,在本仿真实验中 ϵ_n 的取值范围设计为 $-0.05 \sim 0.05$. 在信噪比为 10 dB 的条件下,而其他仿真条件不变的情况下得到的仿真结果如图 8 所示.

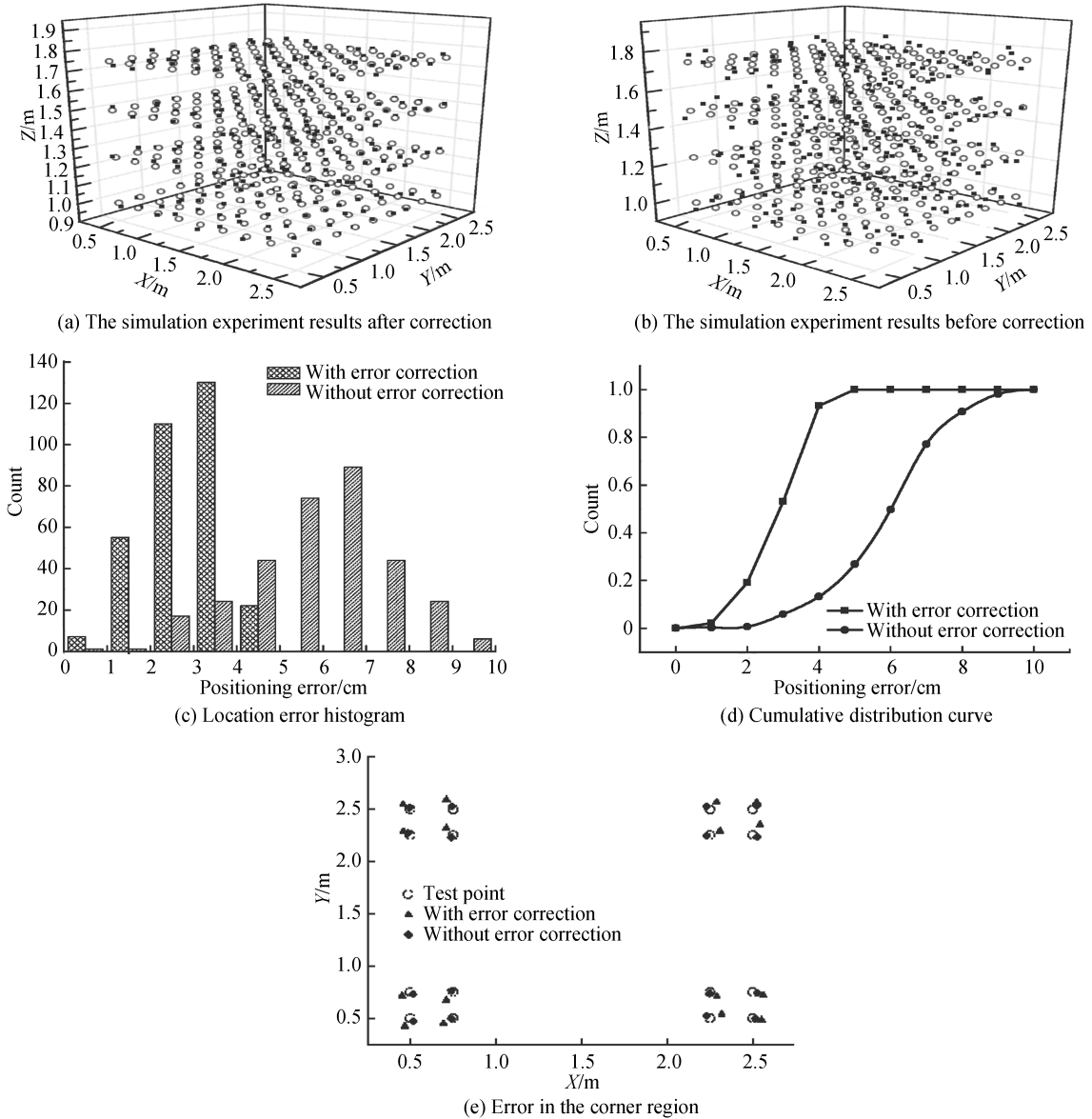


图 8 光强衰减因子修正后与未修正条件下的整体定位结果

Fig.8 The overall localization results after correction of the light attenuation factor and uncorrected conditions

其中,图 8(a)(b)分别展示了对光强衰减因子修正后与未修正条件下的整体定位结果.从整体结果来看修正后的定位结果更加接近于测试点,且分布较为平缓.图 8(c)给出了对光强衰减因子修正后与未修正条件下的整体定位结果的统计分布直方图.可以明显看出,在 10 dB 的信噪比条件下,对光强衰减因子进行修正后定位误差的集中分布区间由原来的 6~8 cm 移动到 2~4 cm.统计数据表明,在 324 个测试点中全部测试

点的定位精度均可以达到 5 cm,而未修正前在 324 个测试点仅有 87 个测试点实现了 5 cm 的定位精度.图 8(d)给出定位误差的累计分布曲线,在 10 dB 的信噪比条件下,相比于未对光强衰减因子修正的情况,对光强衰减因子修正后 80% 的测试点实现了 4 cm 定位精度,如果不进行定位误差修复,80% 的测试点仅能实现 7 cm 的定位精度.

如图 8(e)所示进一步对比边角区域的误差情况发现通过引入误差修复因子 ϵ 后,边角区域的定位误差可以得修复,使得在整个空间的定位误差修复变得更为平缓.

2.4 定位算法的收敛速度

室内可见光通信定位亦可通过遍历整个搜索空间来获得最优三维定位解,然而会大大增大计算量.所谓遍历整个搜索空间通过蚁群算法的路径优化的优势可以使得搜索个体以较短的路径收敛到最优定位解,减少计算量.遍历搜索是指将三维空间网格化,通过测试每一个格点是否满足约束条件来寻找空间中的最优解.网格化单位的选取与计算的精度有关,如果计算的精度为 1 cm,在上述的仿真模型中应当按 $300 \times 300 \times 400$ 的格点数目将空间网格化进行遍历搜索.由于在遍历搜索中同样是通过计算格点到各个 LED 的距离和与测量值的偏差来衡量格点是否接近于最优解,故可通过统计计算偏差的总次数来衡量这两种不同算法的计算量.图 9 对比在 30 dB 信噪比条件下不同计算精度条件下,遍历搜索定位问题最优解与蚁群算法搜索问题最优解的计算量,在此仿真实验中点(2.25 m, 1 m, 1 m)被当作测试点.

从图 9 可以看出当计算的精度高于 45 cm 时,蚁群算法定位解的搜索效率明显高于遍历法,而一般室内定位的精度要求在 10 cm 左右,在此精度量级,使用蚁群算法(蚂蚁数目为 100)得到最优解的计算次数为 1 100,而使用遍历法的计算次数则达到了 36 000,可以看出在高精度的室内定位应用场景,得益于蚁群算法的优秀的路线优化性,可以以较短的搜索路径收敛到最优解.

同样地,选取测试点(2.25 m, 1 m, 1 m)测试无误差修复的蚁群算法、有误差修复的蚁群算法的收敛速度.由于信噪比条件会影响误差修复的效果,故在仿真实验中选取了 10 dB, 30 dB 两种不同的信噪比条件来探究算法的收敛速度.

图 9 展示了算法在不同信噪比条件下不同个体的信息素浓度和随迭代次数的变化,在较优的信噪比条件下有无误差修复个体均可收敛到指定的精度.在 30 dB 条件下如果不进行误差修复,算法在第 14 次迭代运算时满足了算法终止条件且收敛精度小于 10^{-4} ,而进行了误差修复的定位算法则在第 20 次迭代运算时出现了信息素浓度小于 10^{-4} 的个体.而当信噪比条件为 10 dB 时,无误差修复的定位算法在第 17 代时出现了最优个体,但是该个体的信息素浓度仅能收敛到 10^{-2} ,而使用了误差修复的定位算法在第 59 次迭代时出现了信息素浓度收敛至小于 10^{-4} 的个体.

可以看出无论是否进行误差修复,在前 20 次迭代运算中,个体均可以向最优解以较短的路径快速移动;而在高信噪比条件下误差修复对收敛精度影响不大,但是引入的误差修复参数 ϵ 会增大算法的搜索空间,降低收敛速度;而在较差的信噪比条件下引入的误差修复参数 ϵ 可以大幅度提高收敛的精度但是在后期的修复参数调整阶段会需要更多迭代运算以收敛到最优解.

因此在实际应用场景中,可根据实际的通信环境选择是否进行定位误差修复.

2.5 实验设计

实际实验中搭建了一 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的立方体框架,任意信号发生器产生 CDMA 调制信号,经过电流放大器(DD311)驱动照明用 LED(CREE XPE 3W),在接收侧 PD(S6968)检测环境光信号后,经过两级 OP 跨阻放大电路(OPA657)放大后,由高速 AD 进行采样后由 FPGA(Xilinx Artix-7)进行解扩操作,FPGA 与 DSP(TMSC6748)可经由通信总线进行数据交换,并最终由 DSP 执行定位算法(包含数字信号滤波操作).

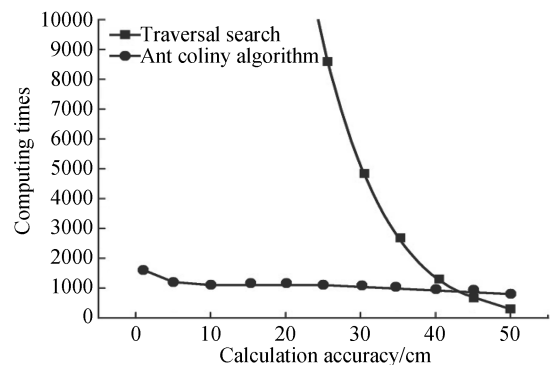


图 9 遍历法与蚁群算法的计算量对比
Fig.9 Comparison of Traversing Algorithm and Ant Colony Algorithm

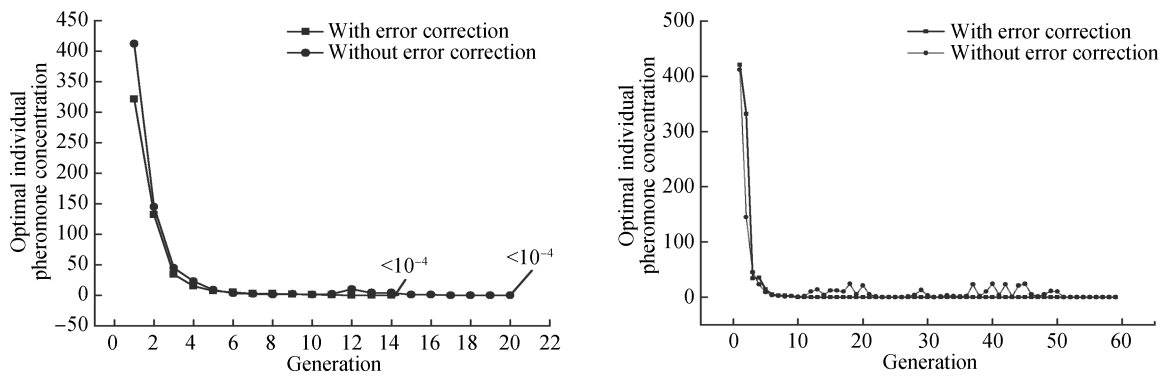


图 10 定位算法在不同信噪比条件下的收敛速度对比

Fig.10 Comparison of convergence rate of positioning algorithm under different SNR

实际实验中在 0.15 m, 0.3 m, 0.45 m 三个高度进行测试, 平面测试范围为 (0.25 m, 0.25 m) - (0.65 m, 0.65 m), 长度与宽度方向的单次增量均为 0.2 m 即每个高度包含 9 个不同的测试点, 定位实验结果如图 12 所示, 此图中, 空心圆代表定位测试点, 实心矩形代表实验结果.

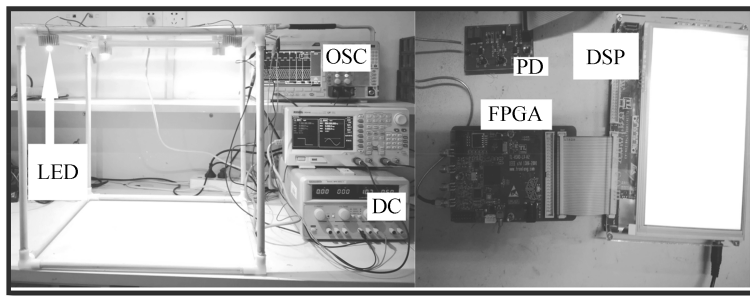


图 11 定位系统实物模型

Fig.11 Physical model of positioning system

从图 12 接收信号波形图可知定位误差主要来源于系统噪声影响, 由于 PD 的散粒噪声及电路热噪声影响导致采样时采样值偏离真实值, 进一步的从实验的接收波形来看, 接收波形的噪声大约在 100~200 mV 的量级, 考虑到接收机在定位模型的边角处应该为定位误差最大情况 (由于此时处于边角处的 LED 与接收机连线与垂直方向夹角很小, 平面距离变化率较大, 对噪声敏感), 同时在最低测试平面 (0.15 m) 接收到的信号幅度最小, 噪声对 LED 与接收机空间距离的估计影响较大, 即可用在高度 0.15 m 的边角处测试点的定位误差用于估计本系统的最大定位误差, 实验中在此高度的 4 个边角处的定位误差分别为 8.59 cm, 11.30 cm, 9.12 cm, 7.69 cm, 取其平均值 9.175 cm, 可推测本系统的最大定位误差大约为 9 cm.

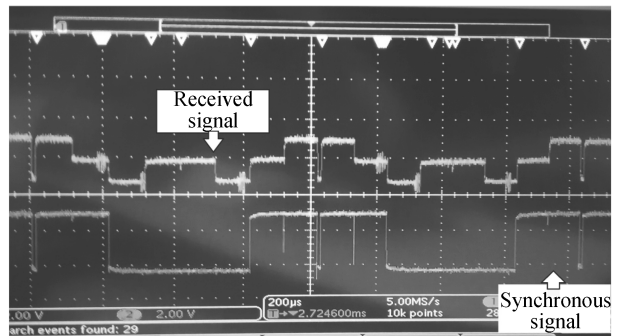


图 12 接收信号波形图

Fig.12 Received signal waveforms

图 14(b)、(c) 分别给出了定位误差的直方图与累计分布图, 从图中可知, 定位误差集中分布在 4~8 cm. 进一步地, 统计结果表明: 92.59% 的测试点的定位误差小于 8 cm, 96.29% 的测试点定位误差小于 10 cm. 同时最大定位误差为 11.30 cm, 与上述理论推导符合较好.

进一步地, 以带误差修复的定位算法对定位结果进行计算, 得到的实验结果如图 14 所示.

从图 14(a) 可以看出在对定位误差进行修复后整体的定位结果更加接近于测试点, 进一步地, 图 14(b) 与 (c) 的统计结果表明, 在经过误差修复后, 实验的定位误差主要分布在 2~4 cm 的区间内. 本实验中, 全部定位测试点实现了 5 cm 的定位精度, 且 96.2% 的测试点实现了 3 cm 的定位精度, 61.6% 的测试点实现了 2 cm 的定位精度. 而 3 个高度的 4 个边角处的定位误差分别为: 3.03 cm, 3.12 cm, 3.31 cm, 3.21 cm, 可见在

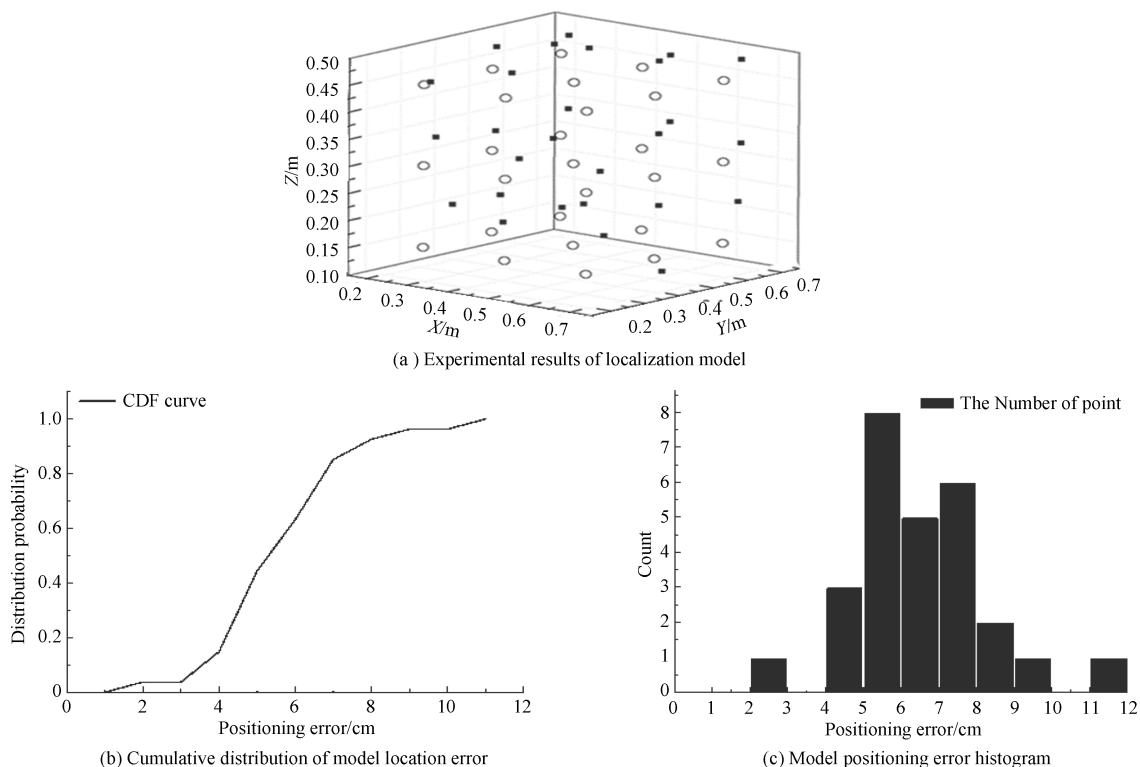


图 13 定位系统模型实验结果:不使用误差修复算法

Fig.13 Experimental results of localization system model without error correction algorithm

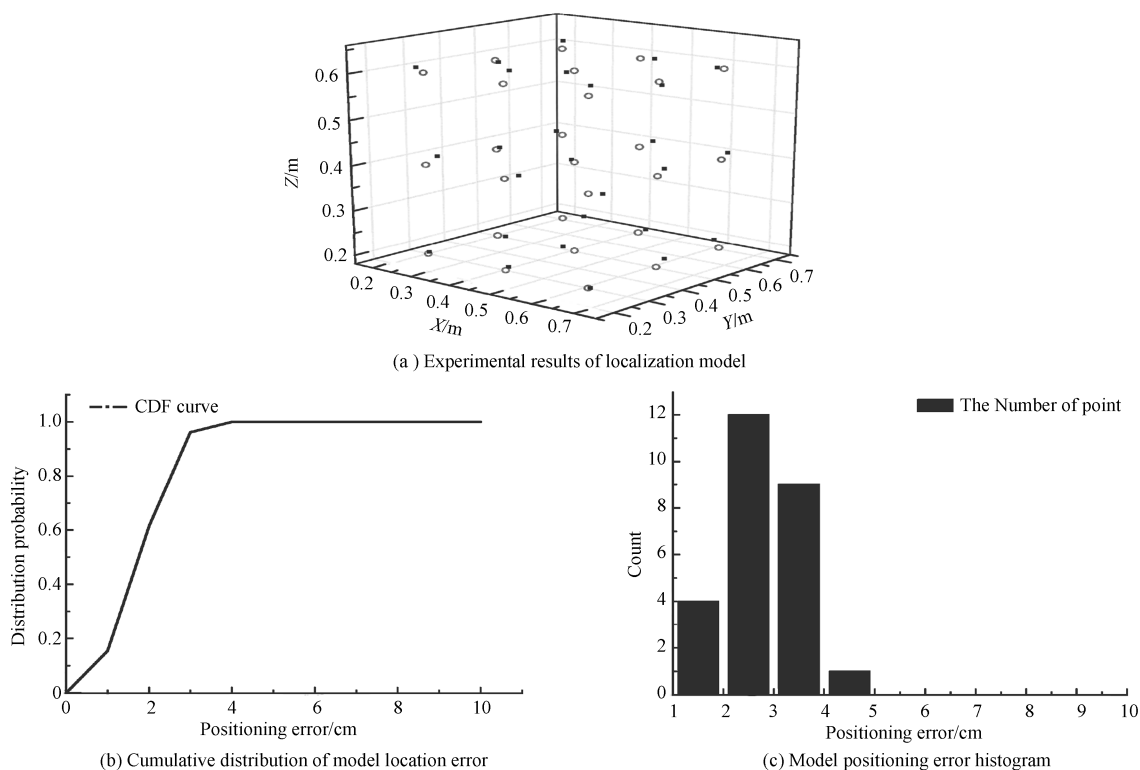


图 14 定位系统模型实验结果:使用误差修复算法

Fig.14 Experimental results of localization system model with error correction algorithm

引入误差修正因子后在实际应用中由噪声引起的定位误差可在一定程度上被降低。

3 结论

本文提出一种基于蚁群算法的可见光室内定位系统,通过 CDMA 调制技术解决了室内多参考点可见光

通信的符号间干扰问题,同时降低了系统对噪声的敏感性,提高了定位精度.通过引入蚁群算法,实现了室内三维定位.通过蚁群算法的全局搜索性,可在三维空间内通过 LED 的 ID 信息及其光强衰减因子快速确定最佳定位点,且算法收敛精度可控,提高了应用的灵活性.进一步地,通过应用蚁群算法的并行搜索性,通过引入误差修复算法,可对噪声引起的定位误差进行修复.仿真与实验结果均表明:本系统在室内常规通信信噪比下能实现 cm 级别的三维定位服务,具有广阔的应用前景.

参考文献

- [1] GU Wen-jun, ZHANG Wei-zhi, WANG Jin, *et al.* Three dimensional indoor positioning based on visible light with Gaussian mixture sigma-point particle filter technique[C]. SPIE, 2015, **9387**: 93870O.
- [2] FUKUCHI K, KOJIMA S, HISHIDA Y, *et al.* Optical water-level sensors using fiber Bragg grating technology[J]. *Hitachi Cable Review*, 2002, **21**(3): 23-28.
- [3] JIANG Xi-rui. The design and implementation of positioning system based on GSM/GPRS and GPS[D]. Beijing: Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, 2006: 8-12.
姜西瑞. 基于 GPS 和 GSM/GPRS 的定位系统的设计与实现[D]. 北京:中国科学院计算技术研究所,2006:8-12.
- [4] CHI Nan. Key devices and applications of LED visible light communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015: 238-247.
迟楠. LED 可见光通信关键器件与应用[M]. 北京,2015:238-247.
- [5] KIM H S, KIM D R, YANG S H, *et al.* An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 2013, **31**(1): 134-144.
- [6] LUO Peng-fei, GHASSEMLOO Z, Le MINH H, *et al.* Experimental demonstration of an indoor visible light communication positioning system using dual-tone multi-frequency technique[C]. 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications, IWOW, 2014: 55-59.
- [7] ZHOU Z, KAVEHRAD M, DENG P. Indoor positioning algorithm using light-emitting diode visible light communications[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(8): 5009.
- [8] JUNG S Y, HANN S, PARK C S. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, **57**(4): 1592-1597.
- [9] WU P, LIAN J, LIAN B W. Optical CDMA-based wireless indoor positioning through time-of-arrival of light-emitting diodes[C]. Proceedings of 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks, 2015: 1-3.
- [10] HANN S, KIM J H, JUNG S Y, *et al.* White LED ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications[C]. European Conference on Optical Communication, ECOC, ECOC2010-36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Proceedings, 2010, 1-2.
- [11] LEE YU, KAVEHRAD M. Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, **58**(4): 1176-1184.
- [12] ARMSTRONG J, SEKERCIOGLU Y, NELID A. Visible light positioning: A roadmap for international standardization [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2013, **51**(12): 68-73.
- [13] HECHT J. Understanding fiber optics[M]. JIA Dong-fang, YU Zhen-hong, WANG Zhao-ying, transl. Beijing: Post & Telecom Press, 2004.
HECHT J. 光纤光学[M]. 贾东方,余震虹,王肇颖,译. 北京:人民邮电出版社,2004.
- [14] GUAN Wei-peng, WU Yu-xiang, WEN Shang-sheng, *et al.* High precision three-dimensional iterative indoor localization algorithm using code division multiple access modulation based on visible light communication[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(10): 106105.
- [15] GUAN Wei-peng, WEN Shang-sheng, HU Hui-xin, *et al.* Research on visible light communication system based on hybrid modulation technique[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, **26**(11): 2125-2132.
关伟鹏,文尚胜,胡卉馨,等. 基于双重调制技术的可见光通信系统研究[J]. 光电子·激光,2015,**26**(11):2125-2132.
- [16] GUAN Wei-peng, WEN Shang-sheng, HUANG Wei-ming, *et al.* Research on visible light communication receiving system based on artificial neural networks[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(11): 1105002.
关伟鹏,文尚胜,黄伟明,等. 基于神经网络的可见光通信接收系统的研究[J]. 中国激光,2015,**42**(11):1105002.
- [17] MA X, LEE K. Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination[J]. *Electron Letter*, 2012, **48**(18): 1137-1139.
- [18] WANG Zhe-bo. Research on channel estimation and multiuser access for MC-CDMA modulated two-way relay systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 20-26.
王浙波. MC-CDMA 双向中继的信道估计算法和多用户接入研究[D]. 杭州:浙江大学,2014:20-26.