

基于免疫算法的高精度室内可见光三维定位系统

王鹏飞^{1,2}, 关伟鹏^{3*}, 文尚胜^{1,2**}, 谢勇坚³, 吴玉香³, 张美琦¹

¹华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;

²华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;

³华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640

摘要 针对现有室内可见光三维定位系统存在的计算复杂、精度低等缺点,提出了一种基于免疫算法的室内可见光高精度三维定位系统。免疫算法是受生物免疫系统的启示而设计出来的一种具有全局寻优能力的智能算法,可以用于解决全局优化问题,而基于可见光通信(VLC)的室内定位,可以将其转化为全局优化问题。因此,在三维室内定位中,可以通过免疫算法获得最佳的接收机坐标。由于系统噪声和系统中使用的设备不完善,接收器和发射器之间的距离偏离实际值,产生定位误差。通过将误差修正因子引入免疫算法,可以精确地确定接收机在三维空间中的坐标。仿真结果表明,在 3 m×3 m×4 m 的室内环境中,80 次迭代的定位误差为 0.69 cm。多点定位测试的平均定位误差为 2.13 cm。运动场景定位的扩展实验也表明,所提方法 96.04% 的定位误差在 1.7 cm 以下,优于现有的三维可见光室内定位方法。因此,基于免疫算法的室内可见光三维定位系统可以实现高精度的定位服务,在各种室内定位场景中具有潜在的应用价值。

关键词 光通信; 室内定位系统; 免疫算法; 定位精度

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1006007

High Precision Indoor Visible Three-Dimensional Positioning System Based on Immune Algorithm

Wang Pengfei^{1,2}, Guan Weipeng^{3*}, Wen Shangsheng^{1,2**}, Xie Yongjian³,

Wu Yuxiang³, Zhang Meiqi¹

¹ School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

² State Key laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

³ School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China

Abstract In view of the disadvantages of the indoor visible light three-dimensional positioning system, such as complex calculation and low precision, we propose an indoor visible high precision three-dimensional positioning system based on immune algorithm. The immune algorithm, which is designed according to the biological immune system, is an intelligent algorithm with global optimization ability. The immune algorithm can be used to solve the global optimization problem. In the visible light communication (VLC)-based indoor positioning, it can be transformed into a global optimization problem. Therefore, in the three-dimensional indoor positioning, the best receiver coordinates can be obtained through the immune algorithm. However, owing to the system noise and the imperfection of device used in the system, distance between receiver and transmitters deviates from the real value, and results in positioning error. By introducing the error correction factors into the immune algorithm, we can precisely determine the coordinates of the receiver in three-dimensional space. The simulation result shows that the average distance error is 0.69 cm within 80 iterations in an indoor environment of 3 m×3 m×4 m. The average

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-25

基金项目: 教育部国家级大学生创新创业训练计划项目(201510561003, 201610561065, 201610561068, 201710561006, 201710561054, 201710561057, 201710561058, 201710561199, 201710561202)、广东大学生科技创新培育专项“攀登计划”(pdjh2017b0040, pdjha0028)

* E-mail: gwpscut@163.com; ** E-mail: shshwen@scut.edu.cn

positioning error of the multi-point positioning test is 2.13 cm. The extended experiment in motion scene positioning also shows that 96.04% positioning errors of the proposed method are below 1.7 cm, which is superior to that of other existing methods for three-dimensional visible light indoor positioning. Therefore, the indoor visible three-dimensional positioning system based on the immune algorithm can achieve high-precision positioning services, and have potential application in various indoor positioning scenes.

Key words optical communications; indoor positioning systems; immune algorithm; positioning accuracy

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 220.4830

1 引 言

全球定位系统(GPS)是良好的户外应用导航系统,目前已被广泛应用于交通、测绘等许多行业,且具有较高的定位精度。然而,受到多径效应、电磁屏蔽效应和信号穿过墙壁时强度的衰减等因素的影响,GPS等传统的室外定位技术在室内的信号覆盖率较差,用于室内的定位时存在较大定位误差。随着室内定位服务需求的日益增长^[1-3],十多年来,各科技巨头和研究机构相继提出了许多基于无线电电磁波的室内定位技术,如红外定位、无线局域网(WLAN)、射频识别(RFID)、蓝牙、紫蜂协议(ZigBee)、超宽带(UWB)和超声波定位等^[4],这些方法的定位精度可由几米到几十厘米。然而,从定位精度和系统成本两方面考虑,基于无线电电磁波的定位系统均存在相关局限性^[5]。使用可见光通信(VLC)进行室内定位是解决室内定位问题的新思路。与传统定位系统相比,基于VLC的定位系统可以具有以下优点:1)VLC系统通信保密性好,不会轻易泄漏位置信息;2)VLC不容易受到多径效应的影响,这意味着使用VLC技术可以实现更高的定位精度;3)在诸如医院的某些应用环境下,传统的无线电电磁波通信系统将产生电磁干扰,而由于发光二极管(LED)不会产生电磁干扰,因此基于VLC的方法可以适用于这类环境;4)提供VLC服务仅需基础照明设施,而不需要将额外的设备添加到内部环境中,从而可将硬件成本降至最低。

基于VLC的定位系统可以分为两种:基于光电探测器(PD)的定位系统和基于图像传感器^[6-7]的定位系统。基于图像传感器的定位系统通常需要使用图像处理技术,对系统性能提出了很高的要求。而基于PD的定位系统具有系统简单、可靠性高和成本低等优点,在室内定位领域被广泛应用。迄今为止,各国科研工作者对基于PD的可见光定位已有较深入的探索,在国内外已经有一些计算接收机位置的方法,例如通过监测信号的到达时间(TOA)^[8-9]、到达时间差(TDOA)^[10]、到达角度(AOA)^[11]和接

收信号强度(RSS)^[12-13]等获得接收机位置。在这些方法中,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;AOA系统虽然不需要实现参考点与目标之间同步,但在实际应用中不仅发射器的空间布局难以实现,而且受接收器接收信号范围的限制,因此其定位精度不高^[14]。而基于RSS算法的VLC室内定位系统简单易行,仅通过测量可见光信号在空间传递过程中的衰减因子即可检测出定位的距离,控制简单且具有更高的定位精度。基于VLC的室内定位算法,定位的参考点为LED点光源,而定位目标为光电检测器件;利用RSS算法进行定位至少需要知道三个参考点的位置,而不同参考点信源所发出的身份识别(ID)定位信息在时域和频域上一般是重叠的,从而产生码间干扰,大大降低了定位的精度。因此,在已有的研究^[15-17]中,为了降低由于定位系统中存在多个参考点而引起的区间干扰,采用了码分多址(CDMA)对不同LED发送的ID信息进行调制。CDMA调制可以分离时域和频域重叠的信号,其中的扩频技术也可以减少室内多径效应引起的符号间干扰。CDMA在VLC中的高有效性和良好性能已被报道。

近年来,国内外已经提出了一些三维(3-D)室内可见光定位的方法。但是,这些三维定位方法仍然有很多限制。Yasir等^[1]使用智能手机的光传感器和加速度计测量光照强度,结合低复杂度定位算法确定了智能手机的位置,实现了低于25 cm的定位误差;Fang等^[18]利用精心设计的无闪烁线路编码方案和轻量级图像处理算法,提供了准确、高速的室内导航,但这些方法需要添加额外的设备,增加了成本。Hou等^[19]使用RSS和AOA混合算法实现室内三维定位,其定位误差为10.2 cm,这种方法采用混合算法进行定位,计算复杂。Lim^[20]提出了一种基于最大似然方法的定位系统,该方法采用迭代最大似然方法和最小二乘解作为初始猜测值,提高了定位性能,但定位精度不高。Wu等^[21]在线性光强

衰减模型下建立了简化的三维指纹数据库,并结合指纹库方法和迭代算法实现了 X-Y 平面误差为 4.1 cm,Z 方向误差为 5.4 cm 的三维定位。该方法取得了较为满意的精度,但该方法需要先建立指纹数据库。综上所述,到目前为止,三维定位的结果并不令人满意。

本文提出了一种室内高精度三维定位方法,采用免疫算法进行三维可见光室内定位。免疫算法是一种强大的基于种群的启发式仿生进化算法,可用于求解全局优化问题。将三维室内定位转化成最优解问题,从而可以在三维室内定位中获得最佳的定位坐标。与现有的三维定位系统相比,本文提出的方法精度更高,搜索效率更高,不需要额外的设备。仿真结果表明,采用免疫算法进行三维室内定位时,平均误差为 2.13 cm,定位精度优于目前已有的三维定位系统。

2 系统原理

2.1 室内无线光通信信道模型

基于 VLC 的室内定位系统的信道模型如图 1 所示,LED 为信号源,PD 为接收机。所有 LED 都安装在天花板上以满足照明要求,接收器位于房间的一定高度。CDMA 调制信号通过 VLC 技术从 LED 发送到位于房间特定高度的接收器。由于 LED 与 PD 的距离较远,且 PD 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。光强衰减因子可以通过直射链路(LOS)信道的增益可表示为

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) \cos \phi T_s(\phi) G(\phi), & 0 \leq \phi \leq \phi_c \\ 0, & \phi \geq \phi_c \end{cases}, \quad (1)$$

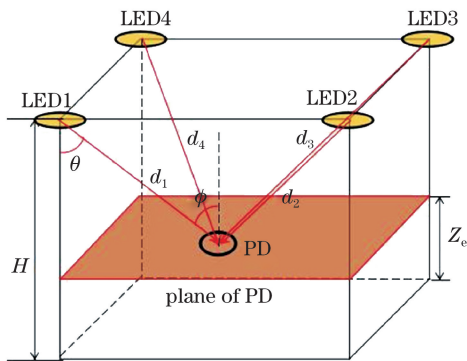


图 1 室内可见光定位系统

Fig. 1 Indoor visible light positioning system

式中: d 为 LED 与接收机之间的距离; A 为 PD 的有效面积; θ 为相对于 LED 垂直轴的发射角; ϕ 为反射角与接收机垂直轴的夹角; $T_s(\phi)$ 为光滤波器增益; $G(\phi)$ 为聚光透镜增益; m 为朗伯发光阶数,与 PD 的半功率角 $\theta_{1/2}$ 有关,即

$$m = -\frac{\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}. \quad (2)$$

因此,当 LED 的光功率为 P_t 时,接收机的信号强度 P_r 可以表示为

$$P_r = H(0) \cdot P_t = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) \cos \phi T_s(\phi) G(\phi) P_t. \quad (3)$$

假设接收机所在的平面平行于天花板,则 PD 的法线与垂直方向平行,则 LED 的辐射角 θ 与 PD 的接收角 ϕ 相等。因此(3)式的信道增益可以简写为

$$P_r = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^{m+1}(\theta) T_s(\phi) G(\phi) P_t. \quad (4)$$

令 $C = \frac{(m+1)A}{2\pi} T_s(\phi) G(\phi)$,信道增益可以进一步简写为

$$P_r = \frac{C}{d^2} \cos^{m+1}(\theta) P_t. \quad (5)$$

LED 与接收机之间的距离 d 可以最终表示为

$$d = \sqrt{\frac{C}{H(0)} \cos^{m+1}(\theta)}. \quad (6)$$

在 VLC 系统中,系统信道噪声的总方差服从高斯分布,即散粒噪声和热噪声的总和满足^[22]

$$N = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{thermal}}^2, \quad (7)$$

式中: σ_{shot}^2 为取决于总入射光功率的散粒噪声方差; $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 为取决于接收机参数的热噪声方差。 σ_{shot}^2 , $\sigma_{\text{thermal}}^2$ 在文献[23]中有详细的描述。因此 VLC 定位系统的信噪比(SNR)可以表示为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{P_r}{N}. \quad (8)$$

2.2 基于免疫算法的室内定位算法

为了实现三维空间定位,提出利用免疫算法搜索三维空间中的最优定位解。在本定位问题中,由于接收机高度未知,通过(1)式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,而通过免疫算法^[24-25]可以使得搜索个体在三维空间中较快地收敛至三维定位问题的最优解,从而大幅度提高计算效率。基于免疫算

法的三维定位框架如图 2 所示。定位算法包含以下步骤。

1) 生成初始抗体种群

设置种群的每个个体包含 11 条染色体,其中 3 条染色体代表坐标分量(X, Y, Z),其余 8 条染色体代表误差修正因子 γ_n 和 ϵ_n ($n=1, 2, 3, 4$)。产生 N 个抗体构成初始抗体种群,使用二进制编码对初始抗体进行编码。为了提高抗体种群的多样性,当生成个体时,将对个体进行相似性检查。定义一个相似度常数 ζ 衡量个体的相似度:

$$\zeta = \frac{l_{\text{same}}}{l}, \quad (9)$$

式中: l_{same} 为染色体中相同基因的数目; l 为全部基因的数目。设置阈值 ζ_0 以判断新生成的个体是否与种群中存在的个体相似。如果 ζ 高于阈值 ζ_0 , 则应该重新生成该个体。在生成种群后,可以将种群中的个体写成矩阵($X, Y, Z, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$)的形式,其中所有元素都是染色体长度为 l 的二元列向量。因此,抗体种群中的个体可以用以下二进制矩阵形式表示:

$$(X, Y, Z, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) = \begin{pmatrix} X_1 & \cdots & \gamma_{4,1} \\ \vdots & & \vdots \\ X_l & \cdots & \gamma_{4,l} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

2) 计算抗体适应度

为了简化系统的复杂性,假设朗伯发光阶数 $m=1$, 并且假设接收机水平放置,所以 PD 的接收角 $\theta = \arccos \left| \frac{h}{d} \right|$, h 为接收机与 LED 的垂直距离。则(6)式可以简化为

$$d_c^{(n)} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{P_t}{P_r^{(n)}}} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{1}{H^{(n)}(0)}}, n=1, 2, 3, 4. \quad (11)$$

然而,因为系统噪声以及 PD 的滤光器和聚光器的增益没有被考虑在内,故 $d^{(n)}$ 不是准确的估计距离。为了获得精确的距离, ϵ_n 被用于补偿由系统噪声引起的测量偏差, γ_n 被用于补偿由 PD 的响应拟合误差引起的测量偏差。因此修正后接收机与各个 LED 的距离可以表示为

$$d_c^{(n)} = \sqrt[4]{Ch^2 \frac{1}{\gamma_n H^{(n)}(0) \pm \epsilon_n}}, n=1, 2, 3, 4. \quad (12)$$

(9)式给出了以二进制矩阵形式表示的个体。如果房间模型的最大空间范围被定义为(L, W, H),

通过二进制到十进制的转换,抗体个体的空间坐标(x_0, y_0, z_0)可以表示为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{L \sum_{i=1}^l X_i 2^{i-1}}{2^l - 1} \\ y_0 = \frac{W \sum_{i=1}^l Y_i 2^{i-1}}{2^l - 1} \\ z_0 = \frac{H \sum_{i=1}^l Z_i 2^{i-1}}{2^l - 1} \end{cases}. \quad (13)$$

设 LED 的空间位置坐标为($x_{L_n}, y_{L_n}, z_{L_n}$),其中 $n=1, 2, 3, 4$, 抗体和 4 个 LED 之间的空间距离可以表示为

$$d_{L_n}^{(n)} = \sqrt{(x_0 - x_{L_n})^2 + (y_0 - y_{L_n})^2 + (z_0 - z_{L_n})^2}, n=1, 2, 3, 4. \quad (14)$$

在室内定位中,空间距离偏差用于衡量个体是否接近理想位置,个体距理想位置越近,则适应度函数越接近于零。因此构建适应度函数为

$$f(x_0, y_0, z_0, d_c^{(1)}, d_c^{(2)}, d_c^{(3)}, d_c^{(4)}) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (d_{L_n}^{(i)} - d_c^{(i)})^2}. \quad (15)$$

保留适应度值最小的前 M 个抗体进入疫苗(最优抗体)记忆库。对疫苗记忆库中的这 M 个最佳个体进行克隆(复制),生成临时克隆群体。对临时克隆群体进行下文所述的交叉操作和变异操作,从而生成一个成熟的抗体群体。对这个成熟的抗体群体进行再选择,保留适应度值最小的前 M 个抗体组成疫苗记忆库。

3) 选择操作

使用轮盘赌选择法对抗体种群中的个体进行择优操作,在图 1 所示的室内定位场景中,较低的适应度值意味着更精确的定位。适应度值较低的个体被选择的概率也相应较高。假设适应度值矩阵 \mathbf{F} 包含所有个体的适应度值,即

$$\mathbf{F} = (F_1, F_2, \dots, F_n), \quad (16)$$

则第 t 个抗体被选择的概率为

$$p_t = 1 - \frac{F_t}{\sum_{i=1}^n F_i}. \quad (17)$$

4) 交叉操作

为了保持抗体种群的多样性,在进行交叉操作之前,应该提前进行相似性检查。具体操作如下:先随机选择两个个体,通过(9)式计算两个个体的相似

度常数;如果相似度常数大于阈值,则重新选择进行交叉操作的个体,如果相似度常数小于阈值,则进行交叉操作。

5) 变异操作

将变异算子作用于群体,即对群体中的个体的某些基因值进行变动。来自不同个体的两个染色体参与变异操作。在两个染色体片段上分别进行异或逻辑运算和同或逻辑运算。设来自不同个体的两个染色体片段为 l_1 和 l_2 ,则变异后的两个染色体片段可以写为

$$\begin{cases} l_{1,new} = l_1 \oplus l_2 \\ l_{2,new} = l_1 \odot l_2 \end{cases}, \quad (18)$$

式中: \oplus 表示异或运算; \odot 表示同或运算。

6) 注射疫苗操作

将疫苗记忆库中的染色体加入进行了交叉、变异操作的群体,共同构成新一代群体。对新一代种群中的个体转去执行第 2)步,重新计算其适应度,并对疫苗记忆库中的疫苗进行更新。

7) 设置算法终止条件

一般来说,需要设置两种终止条件。当抗体的适应度值小于给定的阈值时,意味着由于达到了计算精度,此时算法可以终止;当迭代次数超过设定的最大迭代次数时,说明收敛速度太慢,应重新启动定位算法。

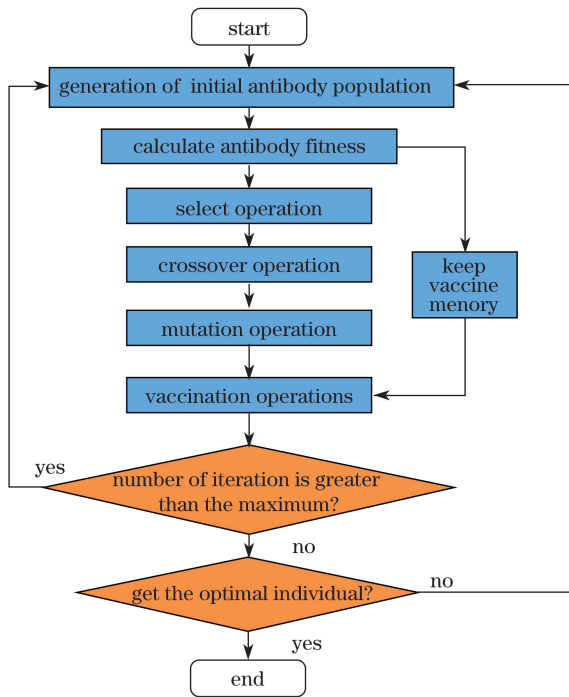


图 2 基于免疫算法的三维定位框架

Fig. 2 Framework of 3-D positioning based on immune algorithm

3 模拟仿真及结果分析

3.1 室内三维定位仿真模型设计

采用 Matlab 软件对所提出的基于免疫算法的高精度室内可见光三维定位系统进行建模仿真,建立一个尺寸为 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 4\text{ m}$ 的长方体房间模型,房间的天花板上有 4 个 LED,将 LED 视为朗伯型光源,LED 的坐标分别为 LED1(0,0,4),LED2(3,0,4),LED3(3,3,4)和 LED4(0,3,4)。这 4 个信号源发射经过 CDMA 调制 ID 信息。将室内无线光通信信道模型视为直射链路信道,通过仿真模拟光强衰减因子,进而计算得到接收端与 LED 的距离。接收机使用 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以及免疫定位算法,最终获得接收机的精确位置。表 1 列出了用于三维室内定位系统的具体仿真参数。

表 1 三维定位系统的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of 3-D positioning system

Parameter	Value
Room size $L \times W \times H / \text{m}^3$	$3 \times 3 \times 4$
Position of each LED $(x, y, z) / \text{m}$	LED1(0,0,4)
	LED2(3,0,4)
	LED3(3,3,4)
	LED4(0,3,4)
LED power P_i / W	5
ϕ_c of PD $(^\circ)$	90
Effective area of PD A / cm^2	1
Gain of optical filter $T_s(\phi)$	1
Gain of optical concentrator $G(\phi)$	1
Half-power angle of LED $\theta_{1/2} / (^\circ)$	60
Order of Lambert's luminous intensity m	1
Similarity threshold ζ_0	0.5
Population size S	100
Chromosome length l	8
Vaccine pool number M	15
Max evolutionary generation	100
Crossover probability	0.5
Mutation probability	0.2
Convergence accuracy	0.0001

3.2 迭代次数分析

图 3 为免疫算法的收敛过程,图中红色正方形代表所选测试点,坐标为(1.5,1.5,2),蓝点代表免疫算法中的抗体。第一代抗体是随机设置在房间中的,在适应度函数的指导下,大多数任意分散的个体

随着进化而移动到测试点。如图 3 所示,当迭代到 80 次时,抗体逐渐聚集在测试点,此时最优抗体的坐标为 (1.4962, 1.5044, 2.0023), 定位误差为 0.69 cm。因此,以适应度函数作为选择标准,随着迭代次数增加,抗体变得更接近测试点的坐标。这证明了所提算法与其他算法相比,具有较高的精度和较快的收敛速度。在文献[26]中,Yang 等使用遍历搜索来定位接收机,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。这一方法可以提高定位精度,但遍历搜索比基于免疫算法的定位方法复杂得多。如果想在模拟中达到厘米级精度,步长为 1 cm,

遍历搜索需要 $300 \times 300 \times 400$ 次计算,而利用免疫算法只需要 80 次计算。考虑到算法的时间复杂度,在数据结构中,文献[26]中所提到的遍历搜索算法,其时间复杂度为线性阶,计算的时间复杂度为 $O(p)$;免疫算法过程中有二重迭代,其时间复杂度为平方阶,计算的时间复杂度为 $O(n^2)$, n 为计算的次数。虽然在计算相同次数时,免疫算法的时间复杂度比遍历算法大,但是在定位精度为 1 cm 时,免疫算法的计算次数为 80 次,远小于遍历算法的计算次数,因此在室内定位中免疫算法的计算复杂度更小。故在相同的硬件条件下,所提算法的算法复杂度较低,优于其他许多算法。

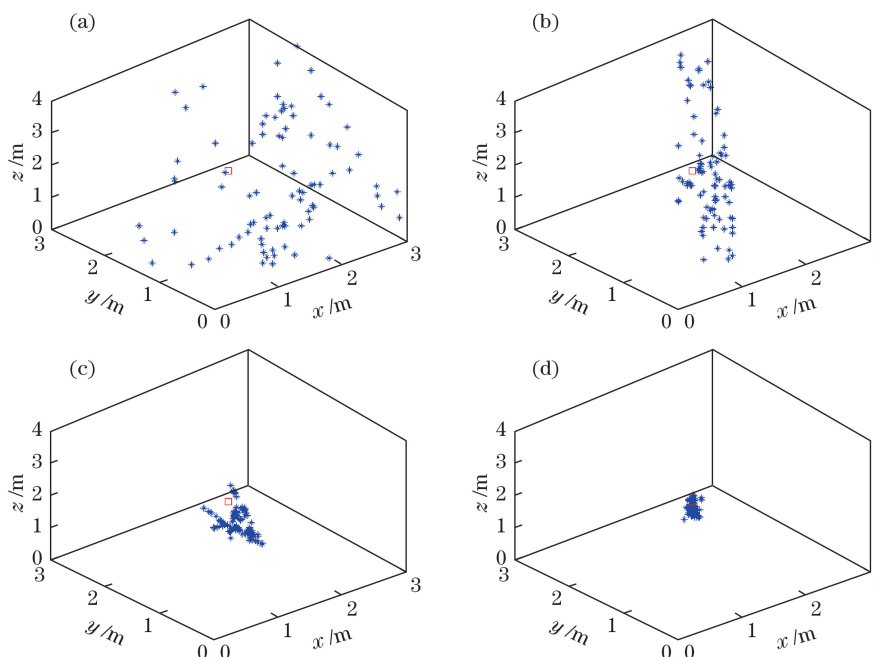


图 3 算法收敛过程。(a) 20 次迭代;(b) 40 次迭代;(c) 60 次迭代;(d) 80 次迭代

Fig. 3 Convergence process of algorithm. (a) 20 iterations; (b) 40 iterations; (c) 60 iterations; (d) 80 iterations

3.3 多点定位实验

为了测试免疫算法在室内三维定位中的性能,进行多点定位测试。选取 8 个高度分别为 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0 m 的平面进行仿真。测试位置的分辨率为 0.5 m, 每个平面选定的位置测试点的数量为 25 个,共 200 个测试点。图 4 为不同高度实际位置点和免疫算法计算位置点的分布。图 4(a)~(h)中,符号“○”代表免疫算法的计算位置,符号“×”代表接收机实际位置。

由图 4 可见,所提出的定位方法在整个房间中定位效果较好,接收机的实际位置非常接近免疫算法计算得到的位置。为了更准确、更直接地评估定位系统的性能,进行进一步定量分析。将实际位置与计算位置之间的欧式距离定义为定位误差,在每

一个多点测试的平面计算定位误差,得到不同高度的三维误差如图 5 所示。计算得到的不同高度的平均误差如图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,当高度为 0.25 m 时,最大误差为 0.45 cm,平均误差为 0.32 cm;当高度为 0.5 m 时,最大误差为 0.44 cm,平均误差为 0.38 cm;当高度为 0.75 m 时,最大误差为 0.46 cm,平均误差为 0.38 cm;当高度为 1.0 m 时,最大误差为 0.53 cm,平均误差为 0.40 cm;当高度为 1.25 m 时,最大误差为 0.85 cm,平均误差为 0.42 cm;当高度为 1.5 m 时,最大误差为 1.12 cm,平均误差为 0.52 cm;当高度为 1.75 m 时,最大误差为 3.65 cm,平均误差为 0.74 cm;当高度为 2.0 m 时,最大误差为 9.75 cm,平均误差为 1.76 cm。

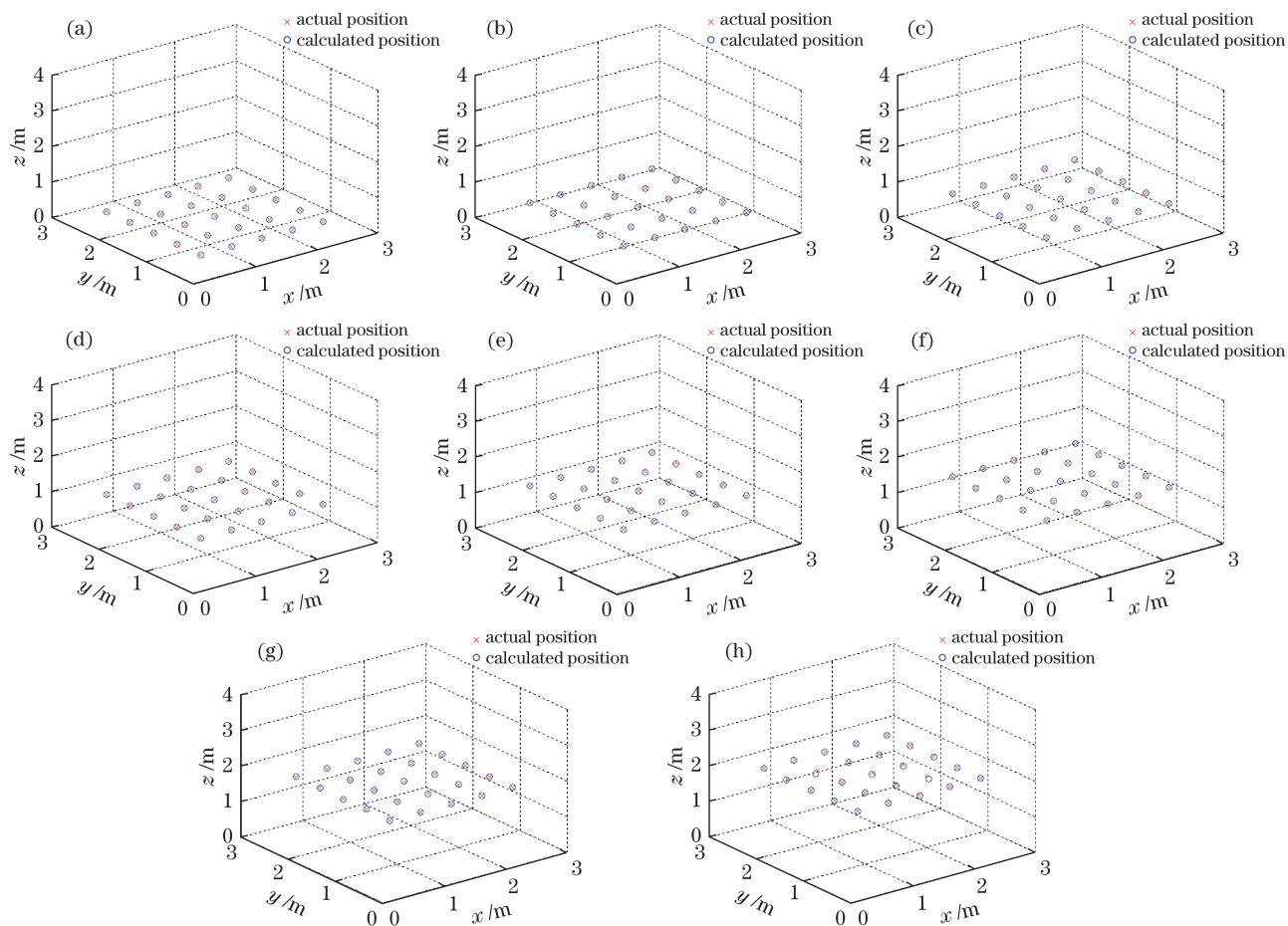


图4 不同高度实际位置点和免疫算法计算位置点的分布。(a) 0.25 m; (b) 0.50 m; (c) 0.75 m; (d) 1.00 m; (e) 1.25 m; (f) 1.50 m; (g) 1.75 m; (h) 2.00 m

Fig. 4 Distributions of the actual location points and the location points calculated by immune algorithm at different heights. (a) 0.25 m; (b) 0.50 m; (c) 0.75 m; (d) 1.00 m; (e) 1.25 m; (f) 1.50 m; (g) 1.75 m; (h) 2.00 m

这一结果表明免疫算法可较好地完成三维定位,定位精度达到了厘米级别。此外,分析上述数据可知,当定位高度较低时,不同高度的误差基本相同;而到达一定高度时,误差随着高度的增加而增加。对(12)~(15)式进行分析可得,定位误差主要是由光强衰减因子 $H(0)$ 的测量误差导致的。当接收机的平面高度增加时,LED光源的发射角 θ 随着接收机平面高度的增加而增大,根据(1)式可知,这会导致更大的光信号衰减,从而导致接收机接收到的光功率误差增大,定位精度下降。

多点定位测试中,计算200个测试定位点与其计算定位点之间的误差。定位误差直方图如图7所示,由图7可见,最大误差为9.75 cm,平均误差为2.13 cm,大部分定位误差在1.5 cm以下。图8为位置误差的累积分布函数(CDF)曲线。从图8可以看出,95%的定位误差在1.35 cm以下。以上结果表明,免疫算法对三维定位的效果较好。

3.4 运动场景中的定位实验

为了测试免疫算法在运动场景定位中的性能,进行了轨迹跟踪实验。在模拟中,通过给出随机路径模拟房间中的移动目标,该路径中共有101个样本点。图9为运动场景中的三维位置。在图9中,蓝线为移动路径,红色“*”为免疫算法计算得到的位置。为了更好地呈现结果,图10和图11分别给出了定位结果的水平视图和垂直视图。结果表明,使用所提出的算法,定位结果可很好地跟踪给出的随机路径。

为了更直接地呈现三维定位效果,给出了运动场景中定位误差直方图和位置误差的CDF曲线,分别如图12和图13所示。从图12可以看出,运动场景中的大部分定位误差在1.5 cm以下,随着高度的增加,定位误差较大,这与3.3节的分析一致。从图13可以看出,运动场景中96.04%的定位误差在1.7 cm以下。上述结果表明免疫算法在运动定位场

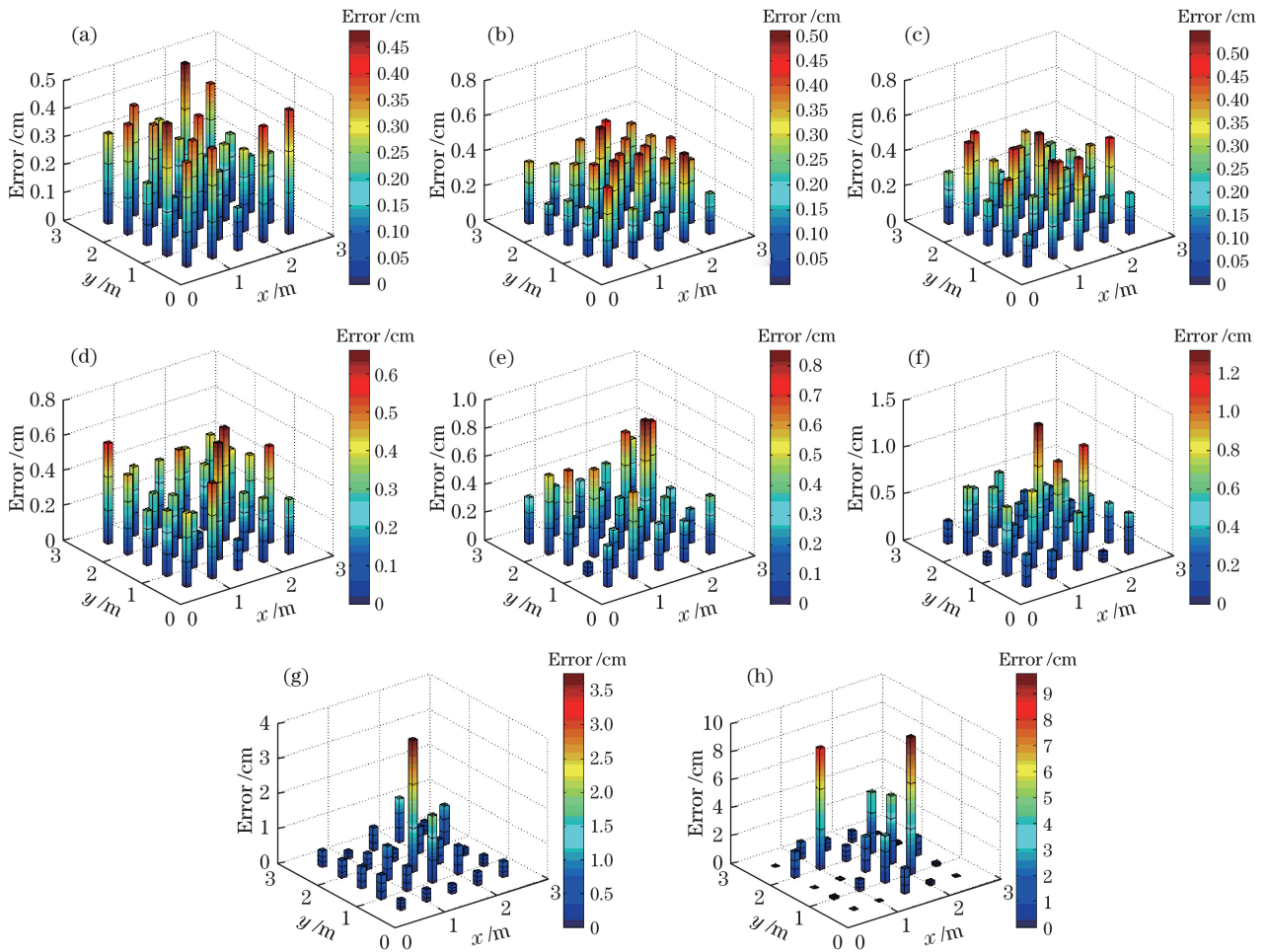


图 5 不同高度的三维定位误差。(a) 0.25 m; (b) 0.50 m; (c) 0.75 m; (d) 1.00 m; (e) 1.25 m; (f) 1.50 m; (g) 1.75 m; (h) 2.00 m

Fig. 5 Three-dimensional positioning errors at different heights. (a) 0.25 m; (b) 0.50 m; (c) 0.75 m; (d) 1.00 m; (e) 1.25 m; (f) 1.50 m; (g) 1.75 m; (h) 2.00 m

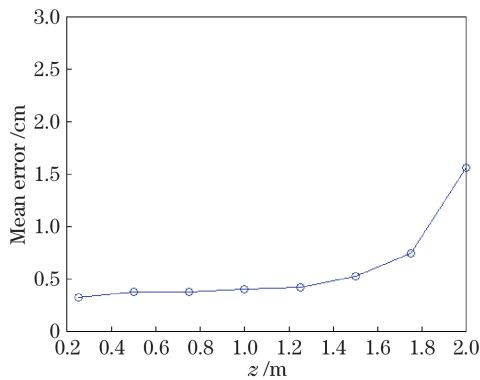


图 6 不同高度的平均误差

Fig. 6 Mean error at different heights

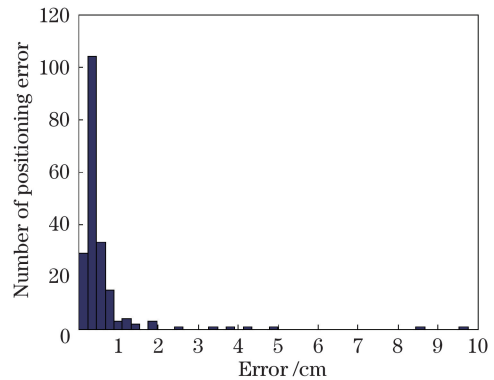


图 7 定位误差直方图

Fig. 7 Histogram of positioning errors

景中具有较好的效果。

4 结 论

提出了一种基于免疫算法的室内可见光高精度三维定位系统。将 VLC 定位问题转化为全局优化

问题,利用免疫算法的全局寻优能力对其进行求解。在该定位系统中,每个 LED 向接收端发送唯一信号,在引入定位误差修复因子后,免疫算法可以在三维空间内通过 LED 的 ID 信息及其光强衰减因子确定最佳定位点。通过仿真,证明了该定位系统具有

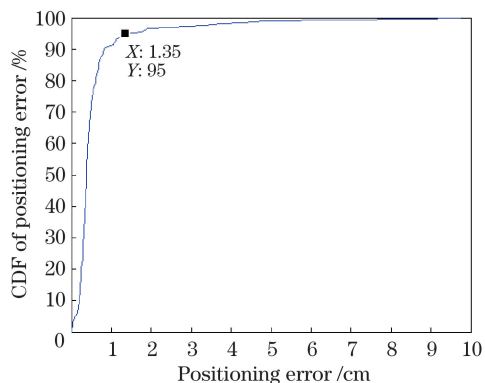


图 8 定位误差的 CDF 曲线

Fig. 8 CDF curve of positioning errors

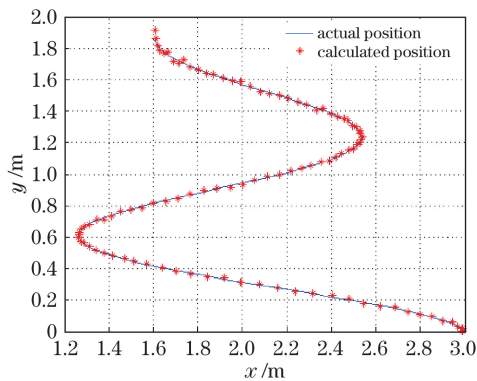


图 11 定位结果的垂直视图

Fig. 11 Vertical view of positioning result

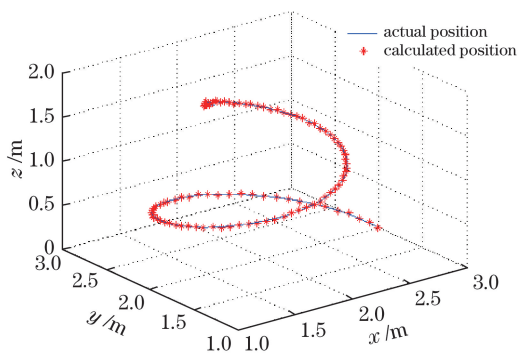


图 9 运动场景中的三维位置

Fig. 9 Three-dimensional position in motion scene

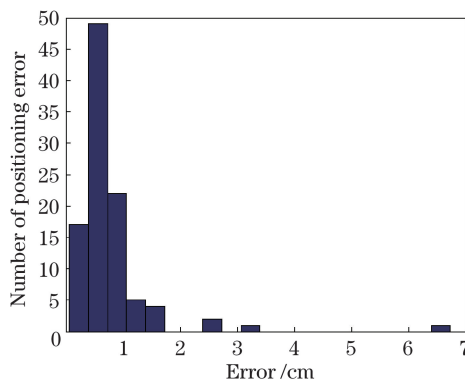


图 12 运动场景中的定位误差直方图

Fig. 12 Histogram of positioning error in motion scene

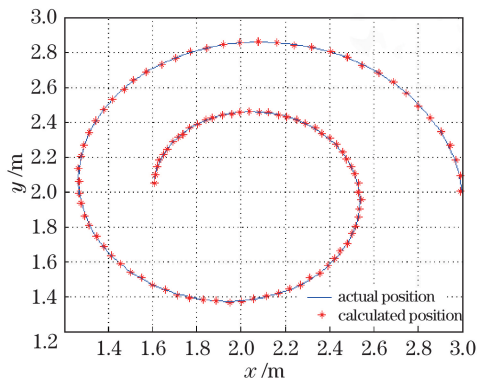


图 10 定位结果的水平视图

Fig. 10 Horizontal view of positioning result

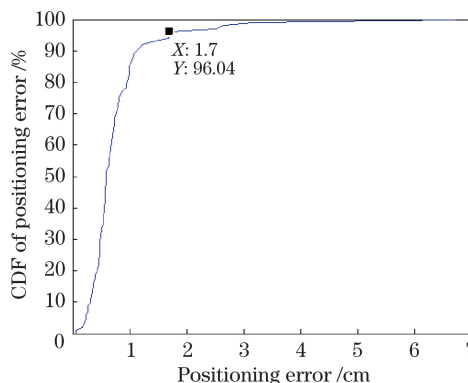


图 13 运动场景中定位误差的 CDF 曲线

Fig. 13 CDF curve of positioning error in motion scene

较好的收敛速度,且算法的复杂度较低。仿真结果表明,定位的平均误差约为 2.13 cm,大多数定位误差小于 1.5 cm,其中 95% 的定位误差在 1.35 cm 以下。为了评估免疫算法在运动场景定位中的性能,进行了轨迹跟踪的扩展实验,结果表明绝大多数情况下定位误差在 1.5 cm 以下,96.04% 的定位误差在 1.7 cm 以下。仿真结果证实了所提出的定位系统可以实现厘米级的室内定位;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也会在一定程度上得到降低。因此,基于免疫算

法的室内可见光高精度三维定位系统具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yasir M, Ho S W, Vellambi B N. Indoor positioning system using visible light and accelerometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(19): 3306-3316.
- [2] Wang J A, Che Y, Lü C, et al. LED layout for indoor visible light communication based on energy

- optimization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0806003.
- 王加安, 车英, 吕超, 等. 基于能量最优的室内可见光通信 LED 布局[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0806003.
- [3] Roehr S, Gulden P, Shmakov D, *et al.* Wireless local positioning-existing solutions and novel system concepts[C]// 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), April 27-29, Heidelberg, Germany. New York: IEEE, 2015: 1-4.
- [4] Yang S H, Kim D R, Kim H S, *et al.* Indoor positioning system based on visible light using location code[C]// 2012 Fourth International Conference on Communications and Electronics (ICCE), August 1-3, Hue, Vietnam. New York: IEEE, 2012: 360-363.
- [5] Qiao T Z. Position estimation in indoor localization system[J]. *International Journal of Science & Research*, 2014, 3(11): 2870-2877.
- [6] Choi Y H, Park I H, Kim Y H, *et al.* Novel LBS technique based on visible light communications[C]// 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), January 13-16, 2012, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2012: 576-577.
- [7] Zhang W, Kavehrad M. Comparison of VLC-based indoor positioning techniques[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8645: 86450M.
- [8] Alavi B, Pahlavan K. Modeling of the TOA-based distance measurement error using UWB indoor radio measurements[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(4): 275-277.
- [9] Sun X Q, Duan J Y, Zou Y G, *et al.* Impact of multipath effects on theoretical accuracy of TOA-based indoor VLC positioning system[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 296-299.
- [10] Wann C D, Yeh Y J, Hsueh C S. Hybrid TDOA/AOA indoor positioning and tracking using extended Kalman filters[C]// 2006 IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, May 7-10, 2006, Melbourne, Victoria, Australia. New York: IEEE, 2006: 1058-1062.
- [11] Dakkak M, Nakib A, Daachi B, *et al.* Indoor localization method based on RTT and AOA using coordinates clustering[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(8): 1794-1803.
- [12] Won Y Y, Han S K, Kim D H, *et al.* Three-dimensional optical wireless indoor positioning system using location code map based on power distribution of visible light emitting diode[J]. *IET Optoelectronics*, 2013, 7(3): 77-83.
- [13] Wang W D, Zhu Q X. RSS-based Monte Carlo localisation for mobile sensor networks[J]. *IET Communications*, 2008, 2(5): 673-681.
- [14] Wu P, Lian J, Lian B W. Optical CDMA-based wireless indoor positioning through time-of-arrival of light-emitting diodes[C]// 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), July 3-5, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 1-3.
- [15] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, *et al.* A novel three-dimensional indoor positioning algorithm design based on visible light communication[J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 282-293.
- [16] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, *et al.* Errata: high precision three-dimensional iterative indoor localization algorithm using code division multiple access modulation based on visible light communication[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 119801.
- [17] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, *et al.* Indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106006.
- 关伟鹏, 吴玉香, 文尚胜, 等. 基于 CDMA 调制的可见光通信室内定位技术的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106006.
- [18] Fang J, Yang Z, Long S, *et al.* High-speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-11.
- [19] Hou Y N, Xue Y K, Chen C, *et al.* A RSS/AOA based indoor positioning system with a single LED lamp[C]// 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), October 15-17, 2015, Nanjing, China. New York: IEEE, 2015: 1-4.
- [20] Lim J. Ubiquitous 3D positioning systems by led-based visible light communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(2): 80-85.
- [21] Wu D B, Feng L H, Yang A Y. VLC indoor positioning system based on iterative algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9619: 96190E.
- [22] Guan W P, Wen S S, Hu H X, *et al.* Research on visible light communication system based on hybrid modulation technique[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(11): 2125-2132.
- [23] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100-107.
- [24] Yıldız A R. A novel hybrid immune algorithm for global optimization in design and manufacturing[J].

- Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(2): 261-270.
- [25] Wang L, Pan J, Jiao L C. The immune algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 96-101.
王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 96-101.
- [26] Yang S H, Jeong E M, Kim D R, *et al.* Three-dimensional localization based on visible light optical wireless communication[C]//2013 Fifth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 2-5, 2013, Da Nang, Vietnam. New York: IEEE, 2013: 468-469.