

引用格式: FENG Yue, FENG Lifang, JIN Jianli, et al. Adaptive Visible Light Location Algorithm Based on Region Division [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0306005

冯越,冯莉芳,金建力,等. 基于区域划分的自适应可见光定位算法研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0306005

基于区域划分的自适应可见光定位算法研究

冯越¹,冯莉芳¹,金建力¹,黄顺义²

(1 北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

(2 北京扬华基业科技有限公司, 北京 100038)

摘要: 为了提高传统可见光定位算法的定位精度,提出一种基于区域划分的新型自适应可见光定位算法。在对单光源和多光源定位算法的研究基础上,设计基于对称结构接收机的两光源定位算法来弥补边缘区域的定位误差。依据上述三种算法在不同区域的定位误差分布特性,构建公平性函数,并结合朗伯辐射模型,将定位区域划分为多个子区域。在定位阶段,先根据接收信号特征粗略判断接收机所处区域,实现粗定位,再自适应选择性能更优的定位算法实现精准定位。仿真结果表明,在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的室内环境下,算法的平均定位误差约为 2.5 cm ,相比单光源、两光源和多光源定位算法分别改善了 46% , 24% , 55% 。在室内 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的环境下搭建可见光定位系统平台并测试算法性能,结果表明,提出的算法在较低的复杂度代价下能够明显改进定位精度。

关键词: 可见光通信;室内定位;区域划分;定位性能;高精度

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225103.0306005

0 引言

随着发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的迅速普及,可见光通信(Visible Light Communication, VLC)凭借宽阔的频谱资源、通信保密性好、无电磁干扰、绿色低功耗等优点受到了广泛的关注^[1]。与此同时,作为VLC的重要应用,可见光定位成为了室内定位技术的研究热点^[2-3]。常见的室内可见光定位方法有接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)^[4]、到达时间(Time of Arrival, TOA)^[5]、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)^[6]和到达角(Angle of Arrival, AOA)^[7]。在这些方法中,TOA要求收发端严格同步,TDOA要对发射端进行同步处理,AOA需要特殊的角度检测设备,而基于RSS的室内定位系统易实现,无需增加额外的硬件设备,在室内定位领域被广泛应用。在相关研究中,文献[8]研究了多光源和多光电探测器(Photoelectric Detector, PD)组合条件下的室内定位问题,证明了当LED个数与PD个数之和大于3时可见光定位系统才具备可行性。文献[9]和文献[10]分别利用基于对称结构接收机的几何测量法和基于M5模型树的迭代算法实现单光源定位,有效避免了多光源干扰问题。但是在大多数室内场景中,单个光源数量难以满足国际标准化组织(International Organization for Standardization, IOS)对室内 $300\sim 1\ 500\text{ lx}$ 光照度的要求^[1]。对于两光源定位系统,文献[11]详细分析了两光源场景下的定位精度,由于存在定位对称点,故两光源位置必须限制在墙角处。在多光源定位系统中,基于最小二乘解的三边定位算法较为成熟^[12],应用广泛,但是该算法存在定位区域小、边缘误差大的问题^[13]。针对定位光源不足的场景,文献[14]利用等效虚拟灯概念,提出一种镜像辅助方案,在有限光源下能够实现定位。但所提算法引入了镜面反射,定位精度不高。综上所述,现有的可见光定位算法多适用于光源数目或拓扑结构固定的场景,且定位精度不高,无

基金项目:北京市融合网络与泛在业务工程技术研究中心国家级基地培育计划(No.FRFBD-20-11A),佛山市人民政府科技创新专项资金(No.BK19BF008)

第一作者:冯越(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为可见光定位。Email:18220178368@163.com

导师(通讯作者):冯莉芳(1980—),女,副教授,博士,主要研究方向为可见光通信与可见光定位。Email:lfeng@ustb.edu.cn

收稿日期:2021-09-06;录用日期:2021-09-25

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

法做到全覆盖的高精度定位。

针对上述问题,本文根据不同RSS定位算法在室内场景中的定位性能特征,以朗伯辐射模型和公平性函数为依据划分定位区域,设计了一种基于区域划分的自适应可见光定位算法。借鉴可见光MIMO系统中对信道空间相关性的分析^[15-16],采用具有对称结构的多PD模型作为目标接收机,引入倾斜PD,在较小的PD间隔下更好地区分来自同一光源的信号强度。在平面坐标求解过程中,实现多种算法最优定位区域解的融合,改善了传统定位算法的定位性能,实现了较高精度的定位。

1 系统模型及相关算法性能分析

1.1 收发机结构

一般的室内场景中(如超市、办公室、仓库),天花板上均匀分布多个LED用来提供室内照明。在室内定位模型中,LED作为信号源,需要不断发送自身ID位置信息与PD通信。PD作为接收机,感应光信号并将其转换为电信号交给处理机处理。可见光定位系统模型及接收机结构如图1所示,文中光源布局采用典型的方形拓扑。为更好地适应不同定位场景、融合多种定位算法,目标接收机选用具有对称结构的多PD模型。水平PD₀位于接收机中心,多个倾斜PD_{*i*}(*i*=1, 2, 3, 4)对称环绕在PD₀四周。水平PD₀位置(x_R, y_R, z_R)与倾斜PD_{*i*}位置(x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri})关系为

$$\begin{cases} x_{Ri} = x_R + l \cos \alpha \cos \omega_i \\ y_{Ri} = y_R + l \cos \alpha \sin \omega_i \\ z_{Ri} = z_R + l \sin \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中,记通过PD_{*i*}中心且垂直于 x 轴的直线为 p ,则 l 表示PD₀中心到直线 p 与倾斜平面平行的线段, α 表示PD_{*i*}的仰角($0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$), ω_i 表示PD₀与PD_{*i*}的连线在 xoy 平面的投影与 x 轴正方向的夹角($\omega_1=0^\circ, \omega_2=90^\circ, \omega_3=180^\circ, \omega_4=270^\circ$)。

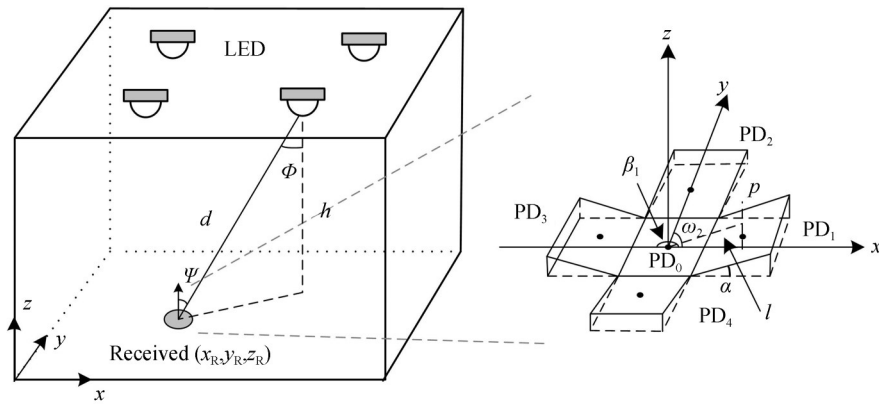


图1 可见光定位系统模型与接收机结构

Fig. 1 Visible light positioning system model and receiver structure

在VLC定位系统中,多个光源的光信号在时域上是重叠的。为了在接收端区分各个光源信息,对发射端必须进行抗干扰处理。目前,已有的定位系统多采用码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)、时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)、正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA)等技术^[17-18]消除多光源间的干扰。本文通过为不同光源分配正交码来区分不同ID的LED光源,采用开关键控(On Off Keying, OOK)方式来调制每一个LED光源的ID信息。接收端通过解码获得来自各个光源的ID信息及接收信号强度。

1.2 信道模型

室内可见光信道模型分为直射链路(Line of Sight, LOS)和非直射链路(Non Line of Sight, NLOS)。由于非直射链路在光信道中的脉冲响应所占比例极低,故本文仅考虑直射链路光信道。直射链路的光信道增益 H_{LOS} 可以表示为^[1]

$$H_{\text{LOS}} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cos \psi T(\psi) G(\psi) & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0 & \psi \geq \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, A 表示光电探测器的物理接收面积; m 表示朗伯辐射模式数, 其值与 LED 半功率半角 $\phi_{1/2}$ 相关, $m = -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2})$; d 是 LED 光源到 PD 的直线距离; ϕ 是 LED 相对于 PD 的辐射角; ψ 是 PD 的光入射角; ψ_c 为探测器的接收视场角 (Field of View, FOV), $T(\psi)$ 表示光滤波器增益, $G(\psi)$ 表示光集中器增益, 文中 $T(\psi) = G(\psi) = 1$ 。

对于 PD_0 的光入射角余弦有 $\cos \psi = \cos \phi = h/d$, h 代表光源到 PD 的垂直高度。对于 PD_i 的光入射角余弦有

$$\cos(\Psi_i) = \frac{(x_i - x_{Ri}) \sin \alpha \cos \beta_i + (y_i - y_{Ri}) \sin \alpha \sin \beta_i + (z_i - z_{Ri}) \cos \alpha}{\sqrt{(x_i - x_{Ri})^2 + (y_i - y_{Ri})^2 + (z_i - z_{Ri})^2}} \quad (3)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为 LED 坐标, β_i 为倾斜 PD 的方位角 ($\beta_1 = 180^\circ$, $\beta_2 = 270^\circ$, $\beta_3 = 0^\circ$, $\beta_4 = 90^\circ$)。

发射光功率 P_t 和接收光功率 P_r 之间的关系可以表示为

$$P_r = P_t \times H_{\text{LOS}} \quad (4)$$

故当接收功率 P_r 已知时, 由式(2)~(4)可以得到 PD_0 到光源之间的距离 d 为

$$d = m + 3 \sqrt{\frac{P_t (m+1) A}{2\pi P_r} \times h^{(m+1)}} \quad (5)$$

1.3 相关算法性能分析

本节以图 1 中的拓扑结构为定位场景, 对文献[9]中的单光源定位算法和文献[12]中的多光源定位算法进行研究。在图 1 场景中, 对于单光源定位算法, 不论接收机处于哪个位置都以 PD_0 接收到的最强信号对应的发射机 Tx_1 作为信标节点。假设 PD_0 接收来自 Tx_1 的信号功率为 P_{r0} , 其余 PD 接收 Tx_1 发射的信号功率依次为 P_{r1} 、 P_{r2} 、 P_{r3} 、 P_{r4} 。将接收信号代入文献[9]中的定位算法求出位置坐标。推导出此定位系统的定位误差为^[9]

$$P_{e_{\text{ave}}} = \frac{h}{\sin \alpha} \sqrt{\left(\frac{\Delta_1 - \Delta_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_2 - \Delta_4}{2}\right)^2} \quad (6)$$

式中, Δ_i 表示为倾斜 PD_i 和水平 PD_0 接收信号强度比的测量误差

$$\Delta_i = \frac{P_{r_i, m}}{P_{r0, m}} - \frac{P_{r_i, r}}{P_{r0, r}} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

式中, $P_{r_i, m}$ 与 $P_{r0, m}$ 是定位过程中实际测量得到的 PD_i 和 PD_0 的接收信号强度, $P_{r_i, r}$ 与 $P_{r0, r}$ 是理论上的接收信号强度。此系统的定位误差主要来源于在进行单光源定位算法设计时将光源到所有 PD 的辐射角近似为一致引起的。由式(6)可得, 相互对称的两个倾斜探测器和水平探测器的强度比测量误差相互抵消。在光源正下方时, $\Delta_1 \approx \Delta_3$, $\Delta_2 \approx \Delta_4$, 此时, 抵消的误差最大, 定位误差最小。对于多光源定位算法, 仅使用 PD_0 作为接收机, 以 PD_0 接收到的最强的前三个信号对应的发射机作为信标节点分别为 Tx_1 , Tx_2 , Tx_3 , 采用最小二乘解法求解位置坐标。此系统定位误差主要来源于信号衰减对估计距离 d 的影响, 当接收机远离光源时, 噪声越大, 光功率受到的衰减越大, 文献[12]详细分析了估计距离 d 的误差理论。

图 2 为以上两种算法在表 1 仿真环境下的定位误差分布。为尽量消除随机噪声对定位误差的影响, 对每一个点进行 M 次误差测量, 定义定位误差求解公式为

$$e = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sqrt{(\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2} \quad (8)$$

式中, (\hat{x}, \hat{y}) 为估计坐标, (x, y) 为真实坐标, $M=10$ 。

结合理论分析及仿真可知, 利用单光源算法实现定位时, 当目标接收机位于光源正下方时, 对称结构抵消的误差分量最大, 此时定位误差最小。随着接收机远离光源, 定位误差逐渐增大。利用多光源算法实现定位时, 由于边缘位置距离某一个光源较远, LED 辐射角更大, 故造成了更大的光强衰减。当目标接收机位于定位区域中心时, 定位误差最小, 由中心至边缘处定位误差逐渐增大。由此可得, 不同定位算法在不同区

域定位误差不一致的特性会导致仅使用某一种算法无法实现全覆盖的精准定位。

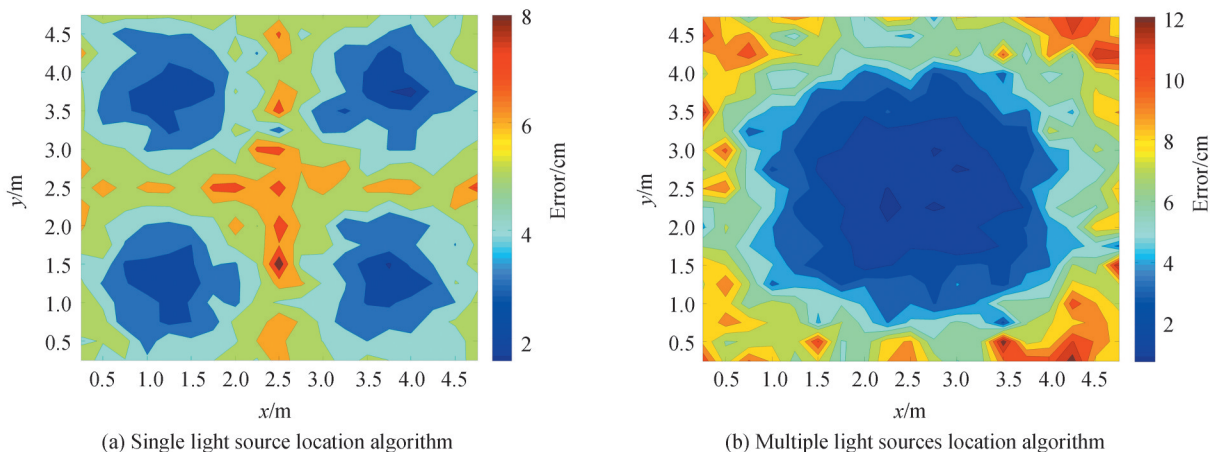


图2 两种定位算法误差分布

Fig. 2 Error distribution of two location algorithms

2 算法设计

2.1 基于对称结构接收机的两光源定位算法设计

通过对单、多光源定位算法平面误差分析可知,两种算法在两光源外侧的房屋边缘处定位误差均较大。在此区域,使用两个光源作为信标节点,具有较小的信号衰减。因此,为弥补此区域的定位误差,本节设计了一种基于对称结构接收机的两光源定位算法。在传统算法中,当发射机数量减少时,需要增加PD数量完成定位。为了能够区分每个PD接收到的信号强度值,要求PD之间相隔较远距离^[19],此设计并不适用于一些小设备。本节利用对称结构接收机实现两光源定位,能够在接收机尺寸减小的同时提高定位精度。算法通过两个步骤实现定位。

步骤1:在噪声场景下得到一个真实解与一个镜像解。

依据PD₀接收到的最强的两个光信号及式(5)可以求出接收机距离发射机Tx1和发射机Tx2的距离 d_1 , d_2 。由平面几何关系可以得到

$$\begin{cases} (x_R - x_1)^2 + (y_R - y_1)^2 = d_1^2 - h^2 \\ (x_R - x_2)^2 + (y_R - y_2)^2 = d_2^2 - h^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 分别为Tx1和Tx2在 xOy 平面上的投影位置。式中仅有接收机坐标未知,求解上述方程组可以得到两个解 $(x_{R1}, y_{R1}), (x_{R2}, y_{R2})$,其中一个为真实解,另一个为镜像解,两解关于两个信标节点的连线对称。图3为多光源场景下两个可能解的对称关系。特别地,在两光源连线附近容易出现无解的情况,

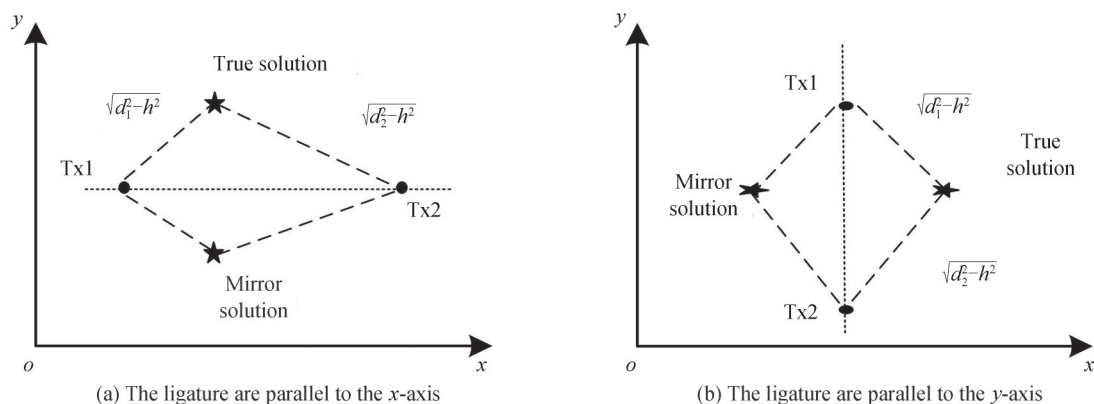


图3 多光源场景下两个可能解的对称关系

Fig. 3 Symmetry of two possible solutions in multiple lights scene

若求出的解为虚数,则直接切换为单光源定位算法计算坐标位置。

步骤2:利用辅助定位坐标消除镜像解,得到真实解坐标即为目标接收机位置。

由图3可以看到,不论Tx1和Tx2连线是与x轴平行还是与y轴平行,对称解总是分布于Tx1两侧(上下侧或左右侧)。故以最强接收信号对应的光源作为坐标原点,将接收平面分为4个象限,如图4所示。

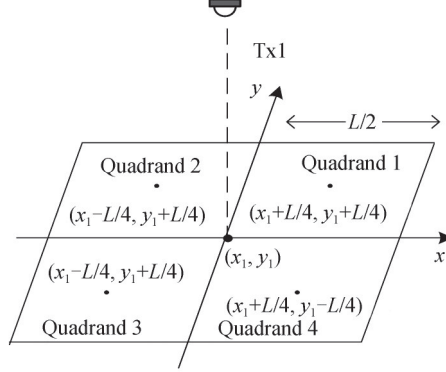


图4 辅助定位解示意图

Fig. 4 Schematic diagram of auxiliary positioning

由于各PD之间排列紧密,故有

$$d \approx d_i \approx \sqrt{(x_i - x_{Ri})^2 + (y_i - y_{Ri})^2 + (z_i - z_{Ri})^2} \quad (10)$$

以PD₂和PD₄为例,将 $\beta_2=270^\circ, \beta_4=90^\circ$ 代入式(3)可得

$$\begin{cases} \cos \Psi_2 = \frac{-(x_1 - x_{R2}) \sin \alpha + (z_1 - z_{R2}) \cos \alpha}{d} \\ \cos \Psi_4 = \frac{(y_1 - y_{R4}) \sin \alpha + (z_1 - z_{R4}) \cos \alpha}{d} \end{cases} \quad (11)$$

当接收机位于第一象限时,根据接收机和信标节点相对位置关系有 $x_1 - x_{R2} < 0, y_1 - y_{R4} < 0$ 。因此,由式(11)可推出 $\cos \Psi_2 > \cos \Psi_4$,其他象限同理可推出不同PD的接收角余弦大小关系。据此,由不同方位PD的相对大小关系可以确定真实解所处象限,从而消除镜像解。为简化算法流程,设计辅助定位坐标解,该解由各倾斜PD的相对大小关系得到,为各象限的中心坐标。辅助定位坐标求解过程如下:

1) 若真实解位于第一象限,恒有 $\cos \Psi_1 > \cos \Psi_3, \cos \Psi_2 > \cos \Psi_4$,因此 $P_{r2} > P_{r4}$ 且 $P_{r1} > P_{r3}$,辅助解 $x_r = x_1 + L/4, y_r = y_1 + L/4$,以下同理;

2) 若真实解位于第二象限,有 $P_{r2} > P_{r4}$ 且 $P_{r1} < P_{r3}$,辅助解 $x_r = x_1 - L/4, y_r = y_1 + L/4$;

3) 若真实解位于第三象限,有 $P_{r2} < P_{r4}$ 且 $P_{r1} < P_{r3}$,辅助解 $x_r = x_1 - L/4, y_r = y_1 - L/4$;

4) 若真实解位于第四象限,有 $P_{r2} < P_{r4}$ 且 $P_{r1} > P_{r3}$,辅助解 $x_r = x_1 + L/4, y_r = y_1 - L/4$ 。

其中, $P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}, P_{r4}$ 分别为PD_{1}, PD_{2}, PD_{3}, PD₄接收到的Tx1发送的光信号。 (x_1, y_1) 为Tx1的二维位置坐标, (x_r, y_r) 为辅助定位坐标。 L 为两光源在 xoy 平面投影上的距离。}}}

确定好辅助坐标解后,使用欧氏距离定义两解与辅助解之间的相似程度。欧氏距离较小的点即为目标接收机的真实解。欧式距离求解公式为

$$\begin{cases} E_1 = \sqrt{(x_{R1} - x_r)^2 + (y_{R1} - y_r)^2} \\ E_2 = \sqrt{(x_{R2} - x_r)^2 + (y_{R2} - y_r)^2} \end{cases} \quad (12)$$

若 $E_1 < E_2$,则接收机的位置坐标为 (x_{R1}, y_{R1}) ;若 $E_1 > E_2$,则接收机的位置坐标为 (x_{R2}, y_{R2}) 。

图5为基于对称结构接收机的两光源定位算法的平面误差分布,仿真环境为表1所示。可以看到,两光源外侧房屋边缘处的定位性能有所改善。利用最近的两个信标节点完成定位,减少了信号衰减对边缘误差的影响。当接收机从边缘向边缘角落移动时,其中一个信号衰减变大,定位误差逐渐增大。较为特殊的是,在两光源连线上,噪声影响下的真实解和镜像解距离相近,无法依据对称PD接收信号大小关系正确解出位

置坐标,故在此区域,定位误差有所增加。图6为基于对称结构接收机的两光源定位算法定位误差随倾斜角 α 的变化。 α 越大时,不同方位PD之间的相对大小关系越明显,受噪声干扰越小。因此,随着 α 增大,定位误差逐渐减小,之后趋于平稳。

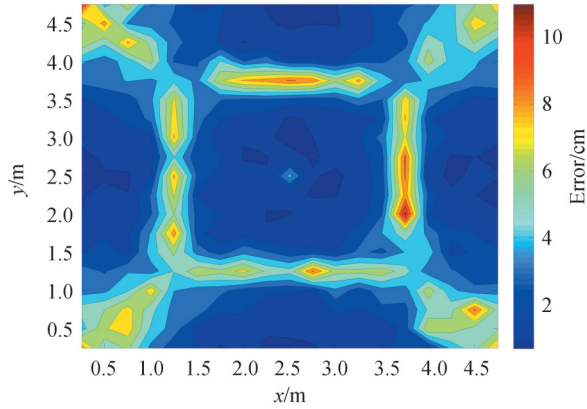


图5 两光源算法定位误差分布

Fig. 5 Location error distribution of two light sources

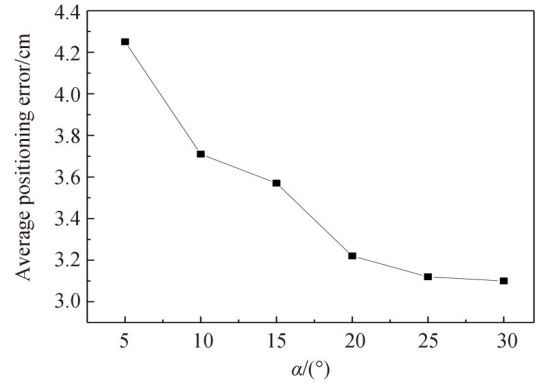
图6 定位误差随仰角 α 的变化Fig. 6 The change of positioning error with α

表1 室内定位系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of indoor positioning system

Parameter	Value
Room size $L \times W \times H / m^3$	$5 \times 5 \times 3$
Position of each LED(x, y, z)/m	LED1(1.25, 1.25, 2.5)
	LED2(1.25, 3.75, 2.5)
	LED3(3.75, 3.75, 2.5)
	LED4(3.75, 1.25, 2.5)
LED power P_i / W	45
Effective area of PD A / cm^2	1
Gain of optical filter $T(\psi)$	1
Gain of optical concentrator $G(\psi)$	1
Half-power angle of LED $\Phi_{1/2} / (^\circ)$	70
Field of view angle of PD $\phi_c / (^\circ)$	70
Distance between PD ₀ to PD _i l / cm	1.2
Polar angle $\alpha / (^\circ)$	20
Threshold value	$\gamma_1=0.5, \gamma_2=0.05$
	$\gamma_3=0.15, \gamma_4=0.1$
SNR/dB	20

2.2 自适应定位算法设计

2.2.1 区域划分思想

通过对以上几种算法的误差分布对比分析,基于不同算法在不同区域定位误差不一致的特性,本节提出一种自适应定位算法,以实现平面全覆盖、高精度定位。为了实现各个算法间的自适应切换,基于朗伯辐射模型和公平性函数设置阈值参数,将定位区域划分为光源下方(D_1 区域)、两光源连线(D_2 区域)、边缘角落(D_3 区域)、房屋中心(D_4 区域)及其它(D_5 区域),图7为区域划分示意图。由朗伯辐射公式和空间几何关系可得,目标接收机至光源投影的平面距离为

$$r = \sqrt{d^2 - h^2} \quad (13)$$

当接收机位于某个光源正下方时,接收机距Tx1投影的平面距离 $r_1=0$ 。在两光源连线上时,恒有 r_1+

$r_2=L, r_1, r_2$ 分别为接收机与距离最近的两个LED在 xoy 平面上的投影距离。据此,基于参数 r 可以识别光源下方和两光源连线区域。为识别接收机是否位于房屋中心及边缘角落处,构建公平性函数 $F(x, y)$

$$F(x, y) = \frac{\left(\sum_{j=1}^N P_r^{(j)}\right)^2}{N \sum_{j=1}^N \left(P_r^{(j)}\right)^2} \quad (14)$$

式中, (x, y) 为当前接收机位置, N 为LED个数, $P_r(j)$ 为接收到的第 j 强信号功率。图8为 $FOV=60^\circ$ 时的公平性函数分布。由式(14)可知,当公平值为1时,来自各个LED的接收信号功率相等,此时目标接收机位于房屋正中心;当接收机远离房屋中心时,公平值减小,到最边角处仅能接收到1个光源信号,此时公平值约为0.25。据此,基于函数 $F(x, y)$ 可以识别边缘角落和房屋中心区域。

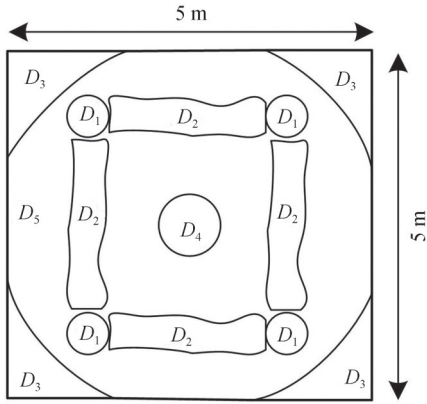


图7 区域划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of regional division

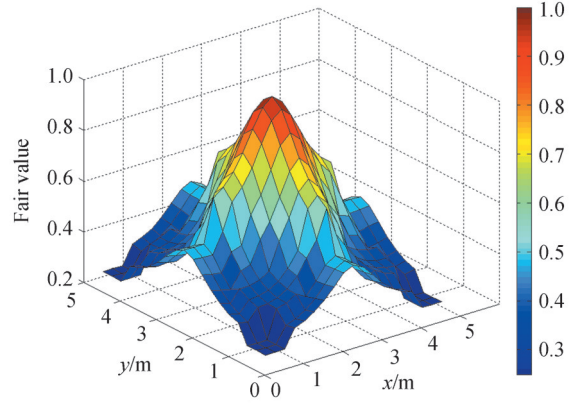


图8 室内公平性函数分布

Fig. 8 Distribution of indoor fairness function

2.2.2 定位算法实现

基于上述区域划分思想,自适应定位算法实现步骤为

步骤1:信号强度排序。首先对 PD_0 接收信号依照从强到弱排序,接收信号集合为 $\Lambda = \{P_{r_0,1}, P_{r_0,2}, P_{r_0,3}, P_{r_0,4}\}$ 。由于接收信号强度和 d 成反比,故由近至远的发射机集合为 $T_x = \{Tx1, Tx2, Tx3, Tx4\}$ 。

步骤2:位置区域识别。根据 Λ 计算出 r_1, r_2 及 $F(x, y)$ 。若能够定位,则要求接收机至少接收到一个光源信号,故 $F(x, y)$ 至少需要等于0.25。基于由朗伯辐射模型推出的参数 r_1, r_2 及公平性函数 $F(x, y)$,对目标接收机所处区域进行识别:1)当 $r_1 \in [0, \gamma_1]$ 时,目标接收机位于半径为 γ_1 m的圆区域 D_1 ;2)当 $r_1 + r_2 \in [L, L + \gamma_2]$ 时,目标接收机位于区域 D_2 ;3)当 $F(x, y) \in [0.25, 0.25 + \gamma_3]$ 时,目标接收机位于区域 D_3 ;4)当 $F(x, y) \in [1 - \gamma_4, 1]$ 时,目标接收机位于区域 D_4 ;5)若以上条件都不满足,则目标接收机位于区域 D_5 。其中,考虑到环境因素对定位精度影响较大,光源拓扑结构、光源半功率角、接收机视场角都有可能影响定位性能,故引入环境参量 γ_i 对不同环境下的阈值进行适当调整。 γ_i 越大,表明某种定位算法在该区域使用范围越广,被选择概率越高。

定义室内平均定位误差 er 为

$$er = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e_k \quad (15)$$

式中, K 为测试的待定位点数量, e_k 为第 k 个点的测量误差。根据多组实验数据拟合, γ_i 与 er 具有函数关系 G_i (3.1节确定了本文实验中的最佳环境参量)。

$$\gamma_i = G_i^{-1}[(er_{\min})] \quad (16)$$

步骤3:位置坐标计算。经过区域识别后,若目标接收机位于区域 D_1 或 D_3 ,选取 T_x1 作为信标节点,利用所有PD的接收信息和单光源定位算法^[9]实现定位;若目标接收机位于区域 D_2 或 D_4 ,选取 T_x1, T_x2, T_x3 作为信标节点,利用 PD_0 的接收信息和基于最小二乘解的多光源定位算法^[12]完成定位;若目标接收机位于区域 D_5 ,选取 T_x1 和 T_x2 作为信标节点,利用所有PD的接收信息及两光源定位算法完成定位。

3 仿真及实验分析

3.1 仿真参数配置

建立 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的定位区域, 仿真环境如表 1 所示, 接收机放置于高度为 0.75 m 的桌面上接收信号。综合考虑单光源定位算法^[9]及两光源定位算法性能, 若 α 过小, 则定位误差增大; 若 α 过大, 由于接收器视场角的限制, 定位覆盖面积会减小, 故取倾斜 PD 的仰角 α 为 20° 。

由于可见光定位性能受到诸多因素的影响, 故在不同场景下, 最佳环境参量有所不同。但是只要光源和接收机参数及定位场景固定, 则可以确定最佳环境参量 γ_i 。为验证 γ_i 对定位精度的正向作用, 图 9 对比了不同 γ_i 取值对室内平均定位误差的影响。文中采用列文伯格-马夸特算法对多组实验数据进行非线性曲线拟合。由拟合曲线可以看到, 随着 γ_i 的增加, 平均定位误差呈现先减小, 后增大的规律。 γ_i 过大或过小都会对定位精度产生不利影响。根据 γ_i 与 er 具有的函数关系 G_i , 可以确定定位场景下的最佳环境参量。本场景下的最佳环境参量为 $\gamma_1=0.5, \gamma_2=0.05, \gamma_3=0.15, \gamma_4=0.1$ 。

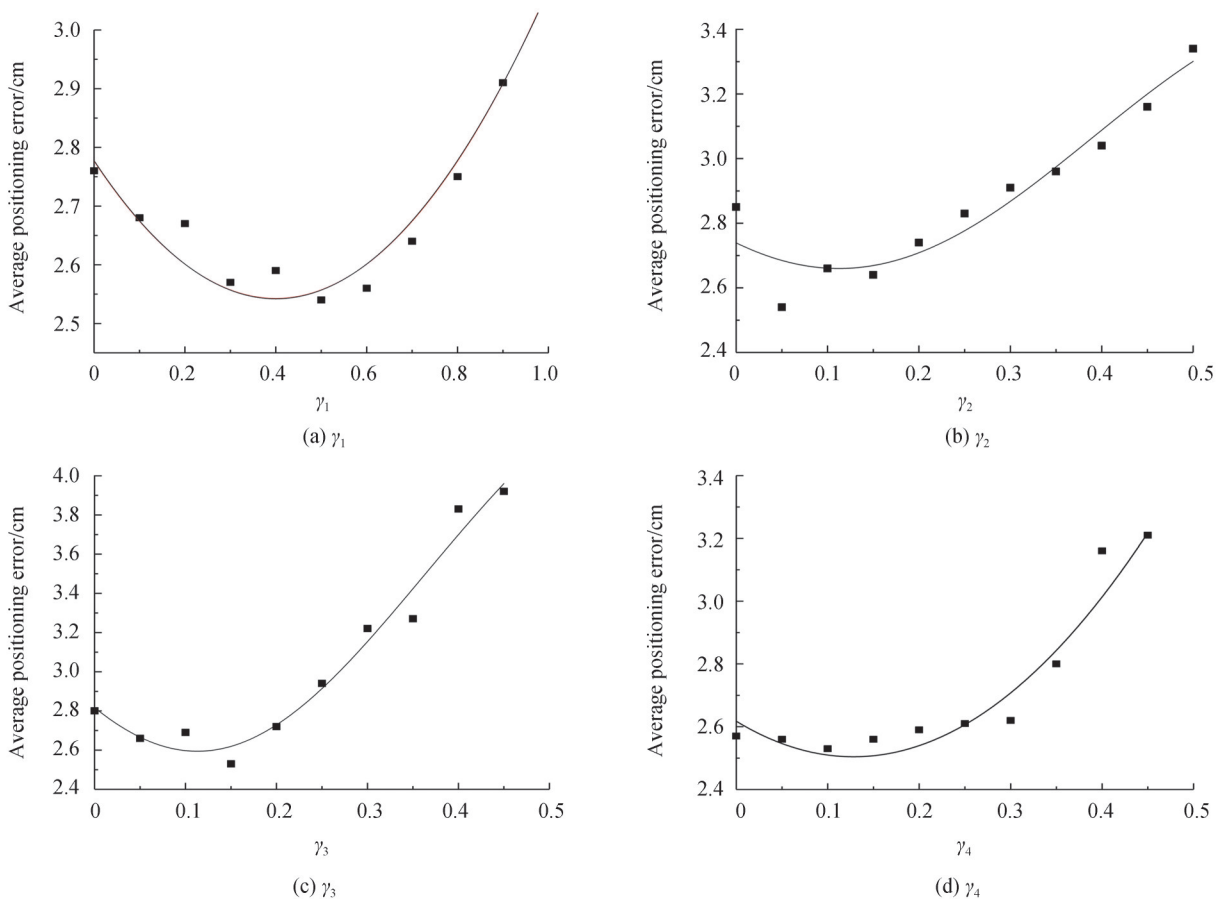


图9 环境参量对定位误差的影响

Fig. 9 Influence of environmental parameters on positioning error

3.2 仿真结果分析

为测试自适应定位算法的定位性能, 在 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的平面上选取 361 个点进行测试, 图 10 为自适应定位算法误差分布图。可以看到, 所提出的定位算法在整个房间中的定位效果较好, 平均定位误差为 2.5 cm , 最大定位误差为 6.6 cm 。为进一步验证自适应定位算法的优越性, 选择单光源定位算法^[9], 多光源定位算法^[12]及本文提出的两光源定位算法进行对比。图 11 给出了 4 种算法的累积误差分布函数, CDF 表示定位误差小于某个值的频数。可以看到, 单光源定位、两光源定位、多光源定位及自适应定位算法在误差为 5 cm 处的 CDF 分别为 61% 、 79% 、 42% 及 96% , 其 CDF 达到最大值相应的误差分别为 8.8 cm 、 11.3 cm 、 12.7 cm 、 6.6 cm 。自适应定位算法平均定位误差约为 2.5 cm , 相比单光源定位算法改善了 46% , 相比传统多光源定位算法改

善了 55%,相比文中提出的两光源定位算法改善了 24%。

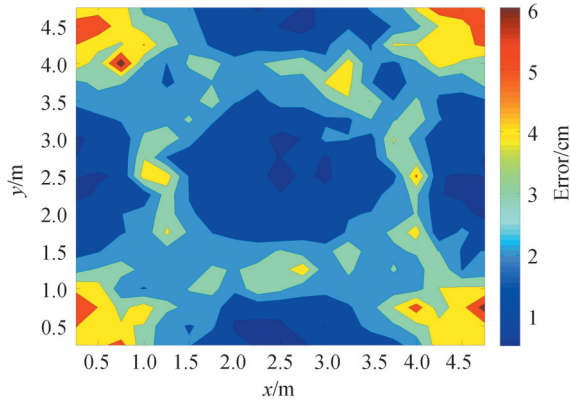


图 10 自适应定位算法平面误差分布
Fig. 10 Plane error distribution of adaptive localization algorithm

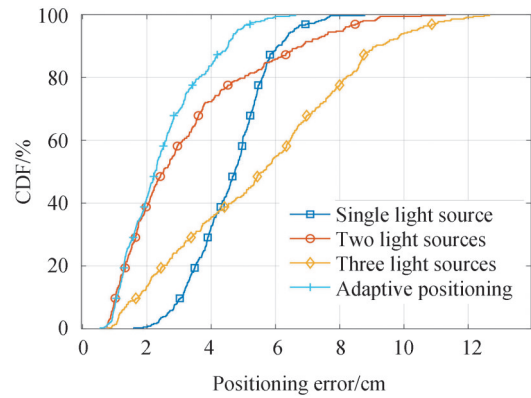


图 11 累积误差分布对比图
Fig. 11 Comparison of cumulative error distribution

表 2 给出了几种算法在不同区域内的定位误差比较,可以看到,不同的算法定位误差在不同区域分布不一致,定位性能差异大。由表中数据可知,在噪声影响下,自适应定位算法在各个区域的定位误差接近于每个区域的最优定位解,结合各个算法的最优定位区域实现定位,改善了整体定位性能。

表 2 不同区域下的定位误差对比

Table 2 Comparison of positioning errors in different regions

Algorithm	D_1 error /cm	D_2 error /cm	D_3 error/cm	D_4 error/cm	D_5 error/cm
Single light source	2.69	4.40	4.84	6.36	4.73
Two light sources	4.62	7.72	6.32	1.42	2.10
Multiple light sources	5.10	3.16	9.34	1.01	5.69
Adaption	2.54	3.11	4.71	1.09	2.18

3.3 实验验证

为了验证该算法在实际场景中的适用性,在实际环境中搭建了 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的定位区域。LED 光源坐标分别为 $(20\text{ cm}, 20\text{ cm}, 200\text{ cm})$, $(20\text{ cm}, 120\text{ cm}, 200\text{ cm})$, $(120\text{ cm}, 120\text{ cm}, 200\text{ cm})$, $(120\text{ cm}, 20\text{ cm}, 200\text{ cm})$ 。四路同步标签码信号通过现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)生成,标签码由标识头和正交码组成,分别为 011101000, 011100100, 011100010, 011100001, 经过放大电路驱动 LED 光源。接收端采用对称结构接收机,通过接收机上的 PD 获取光信号,经过接收电路将信号发送到单片机(Microcontroller Unit, MCU),单片机对接收信号进行解码处理,通过相应的定位算法实现定位。图 12 为定位系统模型,图 13 为实验装置图。

在搭建好的实验平台上采集接收信号。由朗伯辐射公式可知,光源到 PD 的距离与接收信号强度和朗伯辐射模式数有关。但是,在实际应用中,LED 光源的各项参数与产品手册中的数值有一定差异。为了提

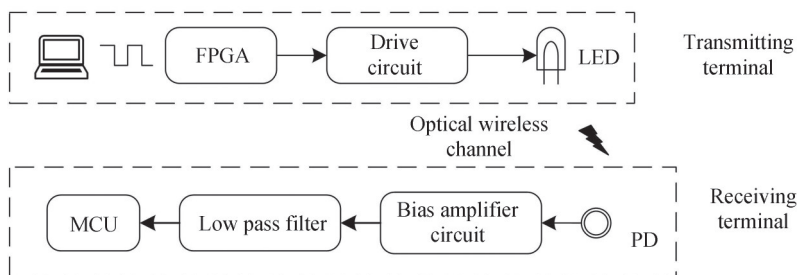


图 12 定位系统模型
Fig. 12 Positioning system model

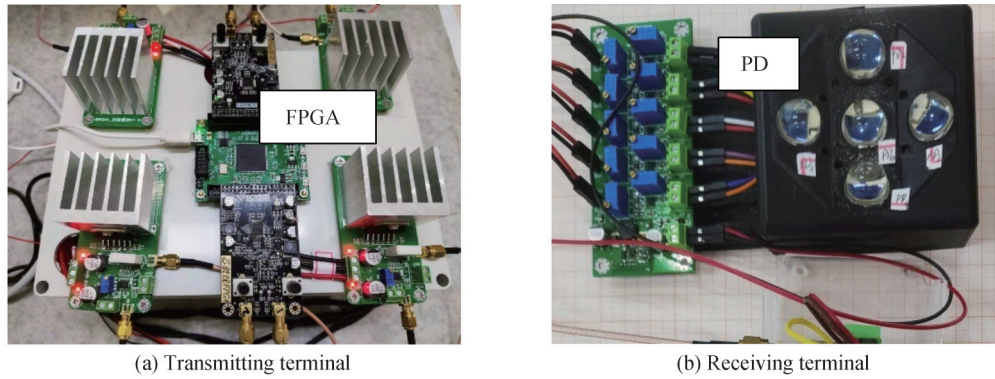


图 13 实验装置
Fig. 13 Experimental device

高定位精度,以残差平方和最小为目标函数拟合出光源与PD之间距离 d 和接收信号强度 P_r 之间的关系。经过拟合, d_1, d_2, d_3, d_4 如式(17)所示。

$$\begin{cases} d_1 = 167.8 \times P_r^{-0.1718} \\ d_2 = 167.6 \times P_r^{-0.1717} \\ d_3 = 168.8 \times P_r^{-0.1674} \\ d_4 = 169 \times P_r^{-0.164} \end{cases} \quad (17)$$

进一步地,使用采集的接收信号数据验证单光源、两光源、多光源及自适应定位算法。图 14 为几种算法在实验环境下的误差分布。由误差分布图可知,由于室内实际环境中的噪声及物体反射的影响,实际系统误差并没有和仿真完全一致,但是整体误差分布与仿真结果相近。对于单光源定位算法,离光源越远的位置定

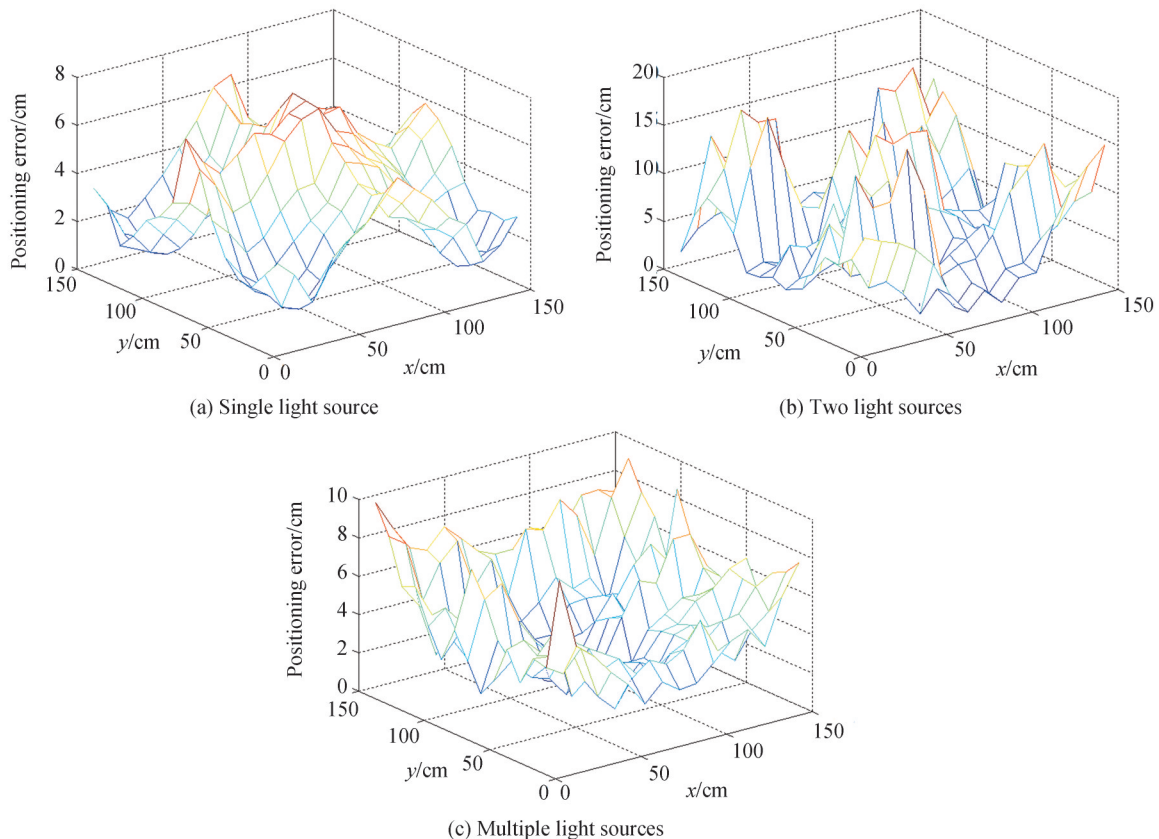


图 14 实验环境下几种算法的定位误差分布
Fig. 14 Location error distribution of several algorithms in experimental environment

位误差越大,对于多光源定位算法,定位区域的中心处定位误差较小,边缘处定位误差较大。实验环境下的单光源定位算法平均定位误差为 3.5 cm,最大定位误差为 7.3 cm;两光源定位算法平均定位误差为 6.2 cm,最大定位误差为 14.9 cm,最大定位误差主要出现在两光源连线附近区域和角落区域,多光源定位算法平均定位误差为 4.1 cm,最大定位误差为 9.8 cm。根据测量结果,确定出定位环境下的最佳环境参量为 $\gamma_1=0.3, \gamma_2=0.02, \gamma_3=0.6, \gamma_4=0.09$ 。环境参量的确定需要预先测量出不同算法在定位区域的定位误差分布,因此,在一定程度上加大了定位算法的复杂度。图 15 为自适应定位算法的定位误差实验结果,自适应定位算法的最小定位误差为 0.5 cm,最大定位误差为 7.7 cm,平均定位误差为 2.6 cm,相比单光源定位改善了 25%,相比两光源定位改善了 59%,相比多光源定位改善了 37%。由图 15(b)可知,该算法 94% 的测试点实现了 5 cm 的定位精度,50% 实现了 2.5 cm 的定位精度。定位区域的 4 个边角处的定位误差分别为:3.2 cm,3.4 cm,3.5 cm,2.8 cm。实验结果表明,无论是在仿真环境或是在实际的实验环境下,该算法均能很好地融合各个算法的最佳定位区域,提高定位精度,相比传统的多光源定位算法,极大改善了边缘处的定位误差。

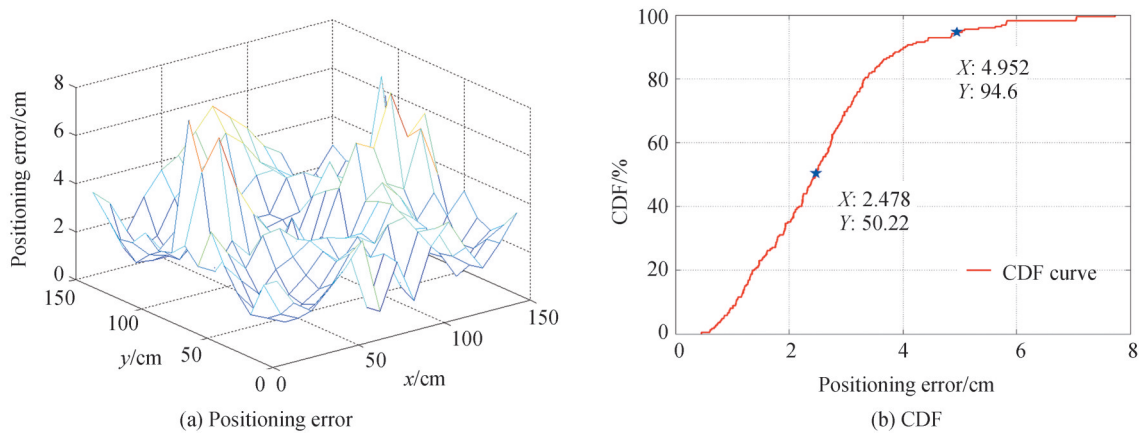


图 15 自适应定位算法实验结果

Fig. 15 Experimental results of adaptive localization algorithm

4 结论

文中提出了一种基于区域划分的自适应可见光定位算法,该算法根据不同定位算法的误差分布不一致的特性,使用区域划分的思想,以朗伯辐射模型及公平性函数为依据设置阈值参数。利用不同信标节点个数的定位算法实现融合定位,结合三种定位算法的最优区域解,改善定位精度。通过理论分析及仿真验证,该算法的平均定位误差约为 2.5 cm,96% 的点定位误差在 5 cm 以下。在实际的室内场景中,搭建了 1.5 m × 1.5 m × 2 m 的实验平台,验证了该算法的定位性能,其中 94% 的点定位误差在 5 cm 以下,相比传统多光源定位算法尤其改善了定位边缘区域的定位误差,有望在实际应用中达到厘米级定位。因此,基于区域划分的自适应可见光定位算法在全覆盖、高精度的定位系统中拥有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 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.
- [2] MAHEEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 3971-3995.
- [3] WU Xingbang, WEN Shangsheng, HUA Jun. High precision 3D positioning system design using visible light communication based on ant colony algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 1206004.
吴兴邦, 文尚胜, 华珺. 基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1206004.
- [4] CHAABNA A, BABOURI A, ZHANG X, et al. Study of RSS-based indoor positioning system for target using visible light communication[J]. Transactions on Electrical Engineering, 2021, 19(1): 1-11.
- [5] XU Rui. Error modeling and performance analysis of TOA-Based indoor visible light positioning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
徐瑞. 基于 TOA 室内可见光定位误差建模及定位性能分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [6] KAZIKLI E, GEZICI S. Hybrid TDOA/RSS based localization for visible light systems[J]. Digital Signal Processing,

- 2018, 86: 19-28.
- [7] HONG C Y, WU Y C, LIU Y, et al. Angle-of-Arrival (AOA) Visible Light Positioning (VLP) system using solar cells with third-order regression and ridge regression algorithms[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(3): 7902605.
- [8] XU W, WANG J, SHEN H, et al. Indoor positioning for multiphotodiode device using visible-light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 8(1): 1-11.
- [9] YU X H, WANG J P, LU H M. Single light-emitting diode-based high-accuracy indoor positioning system using symmetrical optical receiver[J]. Optical Engineering, 2018, 57(10): 106104.
- [10] HAN W, WANG J, LU H, et al. Visible light indoor positioning via an iterative algorithm based on an M5 model tree[J]. Applied Optics, 2020, 59(32): 10194-10200.
- [11] MOUSA F I K, LEMINH H, GHASSEMLOOY Z, et al. Indoor localization system utilizing two visible light emitting diodes[J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 116114.
- [12] MOUSA F, ALMAADEED N, BUSAWON K, et al. Indoor visible light communication localization system utilizing received signal strength indication technique and trilateration method[J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 016107.
- [13] GUAN Weipeng, WU Yuxiang, WEN Shangsheng, et al. Indoor positioning technology of visible light communication based on CDMA modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 73-81.
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): 73-81.
- [14] CHEN J, SUN W J, MA L F, et al. Anti-shadowing design of visible light communication and positioning systems with equivalent virtual lamps[C]. 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2020.
- [15] XIAO Shuaifang, HUANG Kaizhi, ZHONG Zhou, et al. Spatial correlation analysis of MIMO channel in indoor visible light communication[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2117-2123.
肖帅芳, 黄开枝, 钟州, 等. 室内可见光MIMO信道的空间相关性分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2117-2123.
- [16] YANG Chunyong, SONG Chengzhi, LV Yunlong, et al. Optimization of angle diversity for a pyramid receiver in MIMO visible light communications[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2019, 38(3): 432-439.
杨春勇, 宋成志, 吕云龙, 等. 可见光MIMO通信中金字塔型接收机角度分集优化[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2019, 38(3): 432-439.
- [17] CHEN Yong, LI Yichao, LIU Huanlin. Moving target positioning method based on visible light communication in time division multiplexing network.[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006003.
陈勇, 李逸超, 刘焕淋. 基于可见光通信的时分复用组网下移动目标定位方法[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006003.
- [18] LIN B, XUAN T, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-9.
- [19] YANG S H, JUNG E M, HAN S K. Indoor location estimation based on LED visible light communication using multiple optical receivers[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1834-1837.

Adaptive Visible Light Location Algorithm Based on Region Division

FENG Yue¹, FENG Lifang¹, JIN Jianli¹, HUANG Shunyi²

(1 School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2 Beijing Yang Hua Ji Ye Science and Technology Company Limited, Beijing 100038, China)

Abstract: Recently, with the large-scale popularization of Light Emitting Diode (LED), Visible Light Communication (VLC) with LED as the emission light source has developed rapidly. This technology has the advantages of rich spectrum resources, no electromagnetic radiation, high confidentiality and deep coupling with lighting. As one of the important applications of visible light communication, visible light indoor positioning technology has attracted extensive attention of researchers. Among many indoor location methods, the location method based on Received Signal Strength (RSS) is the easiest to implement without additional hardware equipment. It is widely used in the field of indoor location. In the existing literature, the research of visible light positioning technology based on RSS mainly focuses on the multiple light sources model, however, due to the influence of channel attenuation on the received signal, the

positioning accuracy is not high when the target receiver is located in the corner area. To solve this problem, an adaptive visible light location algorithm based on region division is proposed. Based on the analysis of single light source and multiple light sources localization algorithms, a two light sources localization algorithm based on symmetrical structure receiver is designed to make up for the localization error in the edge region. The mirror solution generated in the localization of two light sources is eliminated by using the receiver with this special structure. According to the error distribution characteristics of the above three algorithms in the positioning plane, the fairness function is constructed, and combined with the Lambert model, the positioning region is divided into multiple sub regions. In the positioning stage, the receiver area is roughly judged according to the characteristics of the received signal to achieve rough positioning, and then the positioning algorithm with better performance is adaptively selected to achieve accurate positioning. The simulation results show that at $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$ indoor environment, the average positioning error of the algorithm is about 2.5 cm, which is improved by 46%, 24% and 55% respectively compared with single light source, two light sources and multiple light sources positioning algorithms. Further, at $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 2\text{ m}$ indoor environment, an actual visible light positioning system is built, four synchronous label code signals are generated by Field-Programmable Gate Array (FPGA), and the LED light source is driven by the amplification circuit. The receiver uses Photoelectrical Detector (PD) to obtain the signal, the Microcontroller Unit (MCU) decodes it, and then realizes the positioning through the corresponding positioning algorithm. The experimental results show that 94% of the test points achieve the positioning accuracy of 5 cm. The positioning errors at the four corners of the positioning area are 3.2 cm, 3.4 cm, 3.5 cm and 2.8 cm respectively. Compared with the traditional multiple light sources location algorithm, the location error of edge and corner region is greatly improved. This research provides a new method for visible light positioning system, which can significantly improve the positioning accuracy at the cost of low complexity. It has potential research value in the field of visible light communication and positioning.

Key words: Visible light communication; Indoor positioning; Region division; Positioning performance; High-precision

OCIS Codes: 060.2605; 060.4510; 230.3670