

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2018.02.009

遮挡情况下基于压缩感知的可见光室内定位

聂 帅,邵建华,柯 炜,张秀楠,张春艳

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 针对室内复杂环境对可见光定位精度的影响,提出了一种新颖的基于压缩感知的室内可见光定位算法.该方法将目标位置定义为离散空间上的稀疏向量,将接收端接收到的光功率测量矩阵表示为压缩感知理论中测量矩阵、稀疏矩阵与稀疏向量的乘积形式,并且运用稀疏信号重构算法恢复目标位置.可以有效地解决噪声、反射光以及遮挡等环境干扰对定位精确度的影响.与基于接收信号强度的三边定位方法相比,能够有效地降低在房间角落的定位误差.仿真结果表明,该方法具有很高的定位精度,能有效地对抗室内复杂环境干扰.

[关键词] 可见光,室内定位,压缩感知,反射,遮挡

[中图分类号]TN929.1 [文献标志码]A [文章编号]1001-4616(2018)02-0047-07

Visible Light Indoor Positioning Based on Compressive Sensing Under Occlusion

Nie Shuai, Shao Jianhua, Ke Wei, Zhang Xiunan, Zhang Chunyan

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: A novel visible light indoor positioning algorithm is proposed by exploiting the compressive sensing theory, aiming at the influence on the positioning accuracy of visible light under complex circumstance indoors. In this method, the target position was defined as a sparse vector in discrete space, and the optical power measurement matrix received by the receiver is expressed as the product of the measurement matrix, the sparse matrix and the sparse vector in the compressed sensing theory, and the sparse signal reconstruction algorithm is used to recover target location. Thus the positioning accuracy was effectively improved by the impact of noise, reflection and occlusion and other environmental interference. It can be concluded from simulation that the method was highly accurate in positioning and functioned well in the interference of complex circumstances indoors.

Key words: visible light, indoor positioning, compressive sensing, reflection, occlusion

近年来,室内定位技术得到了广泛的研究,到目前为止已经探索出很多种定位技术,如 Wifi、ZigBee、超声波、红外线、蓝牙等定位技术^[1].由于基于射频技术的室内定位系统存在诸多的缺点,该类定位系统已经无法满足人们对室内定位服务的需求^[2].随着 LED 绿色照明时代的到来,可见光通信技术得到了迅速发展. LED 可见光通信技术与传统射频通信技术相比具有显著的优势.除了定位的主要功能之外,可见光室内定位系统还承担着照明功能.未来 LED 照明系统将会被应用到各种室内场景中,只需要一点额外的成本,就能够建立室内定位系统.因此可见光定位技术正在获得越来越多的关注和研究^[3-4].

针对噪声、反射光、遮挡等环境干扰对室内可见光定位的影响,本文提出了一种基于压缩感知的可见光室内定位算法.该方法将目标位置定义为离散空间上的稀疏向量,应用压缩感知理论中的稀疏信号重构算法^[5-7],在移动终端恢复目标的位置.使用 LED 灯来代替传感器节点,实现照明的同时满足定位需求,通信的成本将大大降低.定位过程中不需要同步接收信号,设备简单,且数据计算复杂度不高.所以将压缩感知理论应用到室内可见光定位十分可行.

在室内定位服务中,最关键的就是对定位精度的要求,针对这一要求,研究定位过程中噪声、墙面反射光以及信号遮挡等环境干扰对定位精度的影响,将可见光定位中基于接收信号强度(RSS)的定位问题转

收稿日期:2018-02-27.

基金项目:教育部博士点基金(2013102SBJ0265).

通讯联系人:邵建华,教授,研究方向:无线电和可见光通信. E-mail:shaojianhua@njnu.edu.cn

换为压缩感知稀疏信号恢复问题,给出明确的系统模型和工作方式,能够有效降低来自噪声以及墙面反射光等干扰,显著提高定位精度. 仿真结果显示本文提出的方法具有较好的定位效果.

1 可见光定位系统模型

1.1 系统模型

本文采用的定位系统模型如图 1 所示^[8],由发射机、光无线信道和接收器(PD)组成. 该模型是一个 5 m×5 m×3 m 的空间. LED 灯被合理地放置在天花板上,负责照明的同时实现定位功能. 定位系统采用 LED-ID 技术^[9-10],使接收器能够辨别来自不同 LED 的信号强度.

1.2 理想信道模型

发射端 LED 可看作是一个理想的朗伯光源^[11],每个 LED 作为发射源发出带有识别功能的光信号,接收器(PD)接收来自 LED 发出的光信号,定位系统的信道模型如图 2 所示.

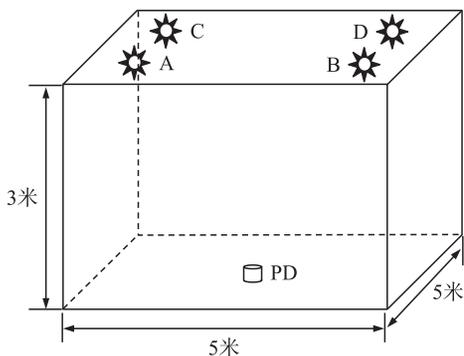


图 1 系统模型
Fig. 1 System model

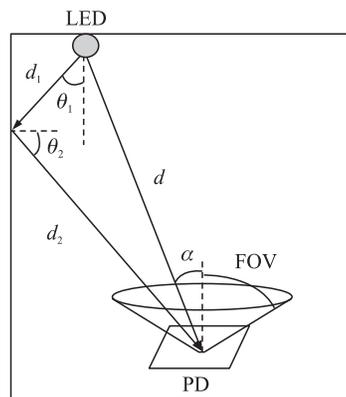


图 2 信道模型
Fig. 2 Channel model

发射端 LED 可看作是一个理想的朗伯光源^[11],每个 LED 作为发射源发出带有识别功能的光信号,接收器(PD)接收来自 LED 发出的光信号,定位系统的信道模型如图 2 所示.

接收器接收来自直射链路和反射链路的光功率之和为:

$$P_r = P_l H_d(0) + \int P_r H_{ref}(0), \tag{1}$$

式中, $H_d(0)$ 和 $H_{ref}(0)$ 分别为直射链路和反射链路信道增益, P_l 为 LED 灯的发射功率. 直射链路信道增益函数 $H_d(0)$ 如下所示:

$$H_d(0) = \frac{(m+1)A_R}{2\pi d^2} \cos^m \beta \cos \alpha \text{rect}\left(\frac{\alpha}{\alpha_{FOV}}\right), \tag{2}$$

式中, m 为朗伯系数, A_R 为接收器的接收面积, α_{FOV} 为接收器视场角, β 是辐射角, α 是接收角, d 是 LED 与接收器之间的直线距离, 矩形函数定义如下:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & \text{for } |x| \leq 1, \\ 0, & \text{for } |x| > 1. \end{cases} \tag{3}$$

在可见光漫射链路中,所有墙面反射点也近似看作朗伯辐射体. 反射链路的信道增益函数为:

$$H_{ref}(0) = \frac{(m+1)A_R T_s}{2(\pi d_1 d_2)^2} \rho A_w \cos^m \beta \cos \alpha \cos \theta_1 \cos \theta_2 \text{rect}\left(\frac{\alpha}{\alpha_{FOV}}\right), \tag{4}$$

式中, d_1 为 LED 与墙面反射点间的直线距离, d_2 为墙面反射点与接收器之间的直线距离, ρ 为墙面的反射系数, A_w 为墙面反射面的单元面积, θ_1 为 LED 的辐射角度, θ_2 为墙面上反射点的辐射角度.

1.3 噪声模型

本文中的噪声主要由热噪声和散粒噪声两个部分组成,表 1 为具体的参数值^[12].

$$\text{热噪声的功率为: } \sigma_{th}^2 = \frac{8\pi k T_e}{G} \eta A_R I_2 \beta^2 + \frac{16\pi^2 k T_e \Gamma}{g_m} \eta^2 A_R^2 I_3 \beta^3. \tag{5}$$

散粒噪声的功率为:

$$\sigma_{\text{shot}}^2 = 2qRP_{\text{BS}}A_{\text{R}}\lambda\beta + 2qRP_{\text{d}}\beta + 2qI_{\text{DC}}\beta. \quad (6)$$

表 1 几个典型参数数值

Table 1 Several parameter values

符号	意义	数值	符号	意义	数值
q	电子电荷	1.6×10^{19} C	Γ	信道噪声因子	1.5
r	光电转换率	0.53 A/W	η	光电探测器的固定电容	112 pF/cm ²
β	等效噪声带宽	400 MHz	A	探测器有效面积	1 dm ²
k	玻尔兹曼常数	1.38×10^{-23}	P_{BS}	背景光谱辐照度	5.8×10^{-6} W/cm ²
I_{DC}	暗电流	5 pA	λ	光学滤波器带宽	400 nm
T_e	绝对温度	300 K	g_m	跨导	300 m/s
G	开环增益	10			

2 基于压缩感知的定位算法

2.1 算法描述

由压缩感知理论可知,如果信号是稀疏的或者是可压缩的,那么可以用较少的测量值通过一定的重构算法恢复该稀疏信号或该信号唯一的稀疏表示. 在本文中,压缩感知理论提供了一个新颖的框架来恢复接收端的位置,可以用较少的 RSS 测量值通过重构算法获取目标位置. 接收器位于一个房间中,整个房间被划分为 $N(N=20 \times 20)$ 个离散网格,接收器从位于天花板上的 $M(M \ll N)$ 个 LED 灯获取 RSS 测量值.

2.2 位置信息向量 \mathbf{s}

定义接收器位置信息向量 $\mathbf{s} = \{s_k, k=1, 2, \dots, N\}^T$, 如果第 k 个网格中存在接收器时, $s_k = 1$, 否则 $s_k = 0$. 假设接收器位置为所在网格的中心坐标, 由于接收器只有一个, 所以向量中只有一个非零元素.

2.3 稀疏矩阵 Ψ

定义 Ψ 为一个 $N \times N$ 的稀疏矩阵, 其中 Ψ_{ij} 表示位于 $j(1 \leq j \leq N)$ 网格的接收器接收到位于 $i(1 \leq i \leq N)$ 网格竖直上方 LED 灯的光功率(考虑反射光存在时, Ψ_{ij} 包括接收到的一次反射光功率).

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & \dots & \Psi_{1N} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} & \dots & \Psi_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \Psi_{N1} & \Psi_{N2} & \dots & \Psi_{NN} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

2.4 测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$

当 M 个 LED 灯随机稀疏地部署在 N 个网格竖直上方, 接收器接收来自少量网格上方 LED 灯发出的光信号. 当第 i 个 LED 灯位于第 j 个网格竖直上方时, $\Phi_{ij} = 1$, 否则 $\Phi_{ij} = 0$. 由定义可知, 测量矩阵每一行只有一个元素为 1, 其余均为 0. LED 灯部署完成之后, 其位置也是确定的, 即对于定位系统而言, 其测量矩阵也是确定的.

2.5 测量值矩阵 \mathbf{y}

设 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}^T$ 为测量值矩阵, 其中 y_n 为接收器接收到第 $n(1 \leq n \leq M)$ 个 LED 灯的光功率.

2.6 感知矩阵 \mathbf{A}

根据压缩感知理论, 可知测量值矩阵 \mathbf{y} 满足以下等式:

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{X} = \Phi \Psi \mathbf{s} = \mathbf{A} \mathbf{s}. \quad (8)$$

式(8)定义了测量值矩阵与接收器位置信息向量之间的关系, 其中 \mathbf{A} 为感知矩阵.

考虑到噪声存在时, 测量值矩阵 $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}^T$ 应表示为:

$$\mathbf{y} = \Phi \Psi \mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (9)$$

2.7 遮挡情况下参数的预处理

相比射频信号, 可见光的波长较短, 信号强度在被遮挡的情况下衰减十分严重. 考虑到实际定位中存在遮挡的问题, 这种情况下恢复的目标位置存在很大误差, 甚至可能无法恢复. 为了减小由于遮挡引起的

定位误差,进行预处理程序.将房间上方 M 个 LED 灯按照 $1, 2, \dots, M$ 编好序号,为测量值矩阵 \mathbf{y} 设置合理的阈值 λ . 当 $y_i < \lambda$ 时,表示接收端接收来自第 i 个灯的信号被遮挡住. 由于第 i 个 LED 灯位于第 j 个网格上方,此时设置测量矩阵 Φ 中 $\Phi_{ij} = 0$, 测量值矩阵 \mathbf{y} 中 $y_i = 0$, 然后再代入运算.

2.8 感知矩阵的正交化处理

当矩阵 $\mathbf{A} = \Phi\Psi$ 满足受限等距性条件(Restricted Isometry Property, RIP)时,即对于任意的稀疏信号 \mathbf{s} 和常数 $\delta \in (0, 1)$, 当感知矩阵满足式(10), 利用压缩感知理论能够在极大程度上高精度地恢复出原始稀疏信号:

$$1 - \delta \leq \frac{\|\mathbf{A}\mathbf{s}\|_2}{\|\mathbf{s}\|_2} \leq 1 + \delta. \tag{10}$$

由于稀疏矩阵 Ψ 与测量矩阵 Φ 在空间域是相关的,即 $\mathbf{A} = \Phi\Psi$ 不满足受限等距性条件. 为了使 $\mathbf{A} = \Phi\Psi$ 获得 RIP 条件同样的效果,选择对测量值矩阵 \mathbf{y} 进行正交化处理. 感知矩阵 $\mathbf{A} = \Phi\Psi$, \mathbf{T} 是 \mathbf{A} 的正交基,即 $\mathbf{T} = \text{orth}(\mathbf{A}^T)^T$, \mathbf{A}^+ 为 \mathbf{A} 的广义逆. 则有:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}\mathbf{A}^+\mathbf{y} = \mathbf{T}\mathbf{A}^+\mathbf{A}\mathbf{s} = \mathbf{T}\mathbf{s}. \tag{11}$$

有噪声的情况下:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}\mathbf{A}^+\mathbf{y} = \mathbf{T}\mathbf{A}^+\mathbf{A}\mathbf{s} + \mathbf{T}\mathbf{A}^+\mathbf{n} = \mathbf{T}\mathbf{s} + \mathbf{n}. \tag{12}$$

\mathbf{T} 为正交矩阵,在接收端进行上述处理,然后运用压缩感知理论中的稀疏向量重构算法,通过 \mathbf{Y} 能够很好地重构出稀疏向量 \mathbf{s} .

2.9 定位重构算法

基于以上分析,室内可见光定位可以很好地通过压缩感知理论中的稀疏向量重构算法解决. 本文采用了 l_1 -minimization 方法来恢复目标位置信息:

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathbb{R}^N} \|\mathbf{s}\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{Y} - \mathbf{T}\mathbf{s}\|_2 \leq \epsilon. \tag{13}$$

3 仿真结果与分析

3.1 定位系统的仿真

本文采用 MATLAB 软件进行仿真实验,将整个房间划分为 $400(20 \times 20)$ 个网格, $M(1 \leq M \leq N)$ 个 LED 灯随机稀疏地部署在网格竖直上方,每个网格竖直上方最多只有一个 LED 灯,假设目标的实际坐标位于网格的中心. 图 3 为位于房间中心的单个 LED 灯光照强度分布图.

3.2 反射及噪声对定位的影响

考虑干扰中一次反射及噪声对于定位精度的影响. 为了简化模型,本文中仅考虑四周墙面的反射,且墙面以常用的反射系数和镜面反射指数作为仿真模型,不考虑天花板和地面的反射. 所以定位时假设墙面的反射系数在 $0.6 \sim 0.7$ 范围内随机波动. 图 4 给出了位于房间中心的 LED 灯经过四周墙面反射后的反射光强度分布图.

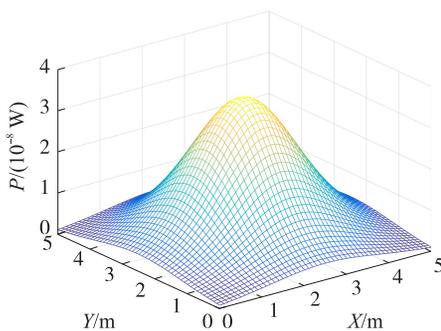


图 3 直射光在空间内的强度分布图

Fig. 3 Intensity distribution of direct light

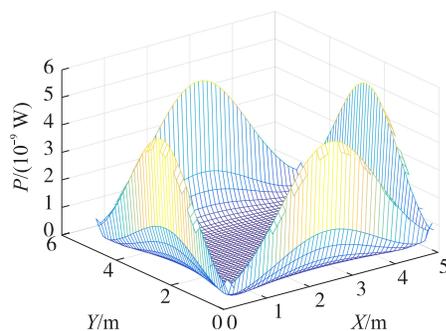


图 4 一次反射光在空间内的强度分布图

Fig. 4 Intensity distribution of reflected light

由图 4 所示,一次反射光与直射光的强度基本上处在一个量级上,如果采取常用的三边定位法肯定会对定位精度造成较大的影响. 下面我们文中提出的压缩感知定位算法对反射光及噪声对于定位精度的

影响进行仿真.

定位精度通常定义为定位误差的平均值,在这里,定位误差是指目标点的实际位置与估算位置之间的欧几里德距离(Euclidean distance),其值越小,表示定位系统可提供的精度越高.若移动终端实际所在网格中心的坐标为 (x_0, y_0) ,估算位置所在网格中心坐标为 (x_1, y_1) ,则该点的定位误差为:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}. \quad (14)$$

定义衡量定位系统环境噪声大小的最大接收信噪比公式:

$$\text{SNR} = 10 \lg(P_s / P_n). \quad (15)$$

设 P_s 为接收端(PD)位于LED灯垂直下方时接收端接收到的最大信号功率, P_n 为噪声强度,SNR为整个定位系统的最大接收信噪比.

图5给出了仿真实间内随机布置6个LED灯,环境噪声SNR=30 dB时,对定位精度造成的影响,平均误差为0.097 m.并且图6给出了把反射光和噪声作为一个干扰整体时,其对于定位精度造成的影响,平均误差为0.119 8 m.为减小单次实验具有的偶然性,整个房间内每个网格重复实验100次,观察其整体平均定位误差.

图7给出了相同噪声与反射光干扰情况下,利用最小二乘法进行三边定位的误差图.

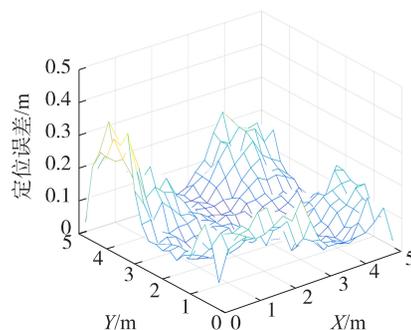


图5 噪声对定位精度的影响

Fig. 5 Positioning error caused by noise

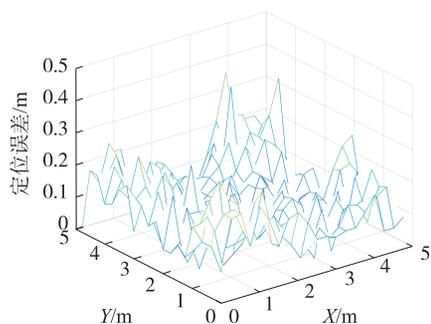


图6 噪声与反射对定位精度的影响

Fig. 6 Positioning error caused by noise and reflection

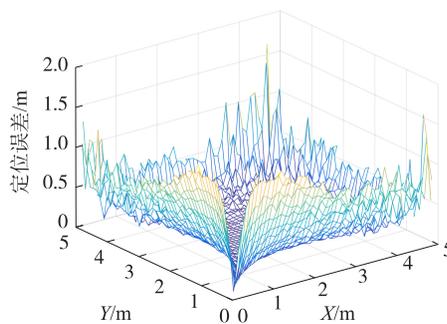


图7 利用三边定位方法的定位误差图

Fig. 7 Positioning error based on trilateration positioning method

由图5和图6能够得出反射光强度相比噪声对定位精度影响要小很多.由图7可得三边定位方法在靠近墙边位置的定位误差相对较大,且最大误差接近2 m.这是因为靠近墙边位置的一次反射光与直射光的强度基本上处在一个量级上,如果采取基于测距的三边定位方法肯定会对定位精度造成较大的影响.所以相比传统的三边定位方法,本文提出的压缩感知算法能够有效地降低在房间角落的定位误差.

3.3 LED灯数量对定位影响

使用本文所提出的压缩感知定位算法,对LED灯个数 M 从4到14变化时进行仿真分析,图8为不同信噪比情况下,噪声对定位误差造成的影响.图9为把反射光和噪声作为一个干扰整体对定位误差造成的影响,此时定位系统环境噪声SNR=30 dB.

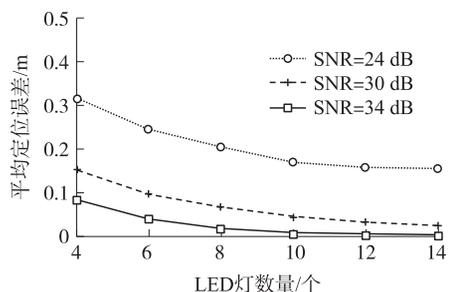


图8 噪声对定位影响的误差图

Fig. 8 Positioning error caused by noise

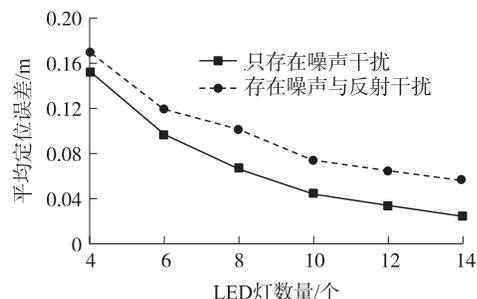


图9 噪声与反射对定位影响的误差图

Fig. 9 Positioning error caused by noise and reflection

由图 8 可以看出噪声对定位误差的影响是非常大的,这是因为本文定义的环境噪声信噪比仅测量定位系统中的最大接收信噪比,而接收器在房间不同位置的接收功率有很大的差异. 由图 9 可得,反射光相比噪声对定位精度的影响要小很多,且定位误差随着 LED 灯个数的增加而不断减少,这是因为压缩感知理论中测量值信息越多,获取到的信息越多,对于稀疏向量的恢复越准确,定位误差越小.

3.4 遮挡情况下的定位

在仿真空间内随机布置 10 个 LED 灯,SNR=30 dB,考虑反射光的存在. 为测量值矩阵 y 设置合理的阈值 λ ,此时设置 λ 为 1×10^{-10} ,小于房间内任意点接收到来自单个 LED 灯的光功率. 图 10 表示位于房间中的 1 个 LED 灯被遮挡时的定位误差,其平均误差为 0.24 m. 相比无遮挡情况,恢复的位置存在很大误差. 为了减小因遮挡导致的误差,选择对参数进行预处理. 上述情况经过预处理程序后的定位误差如图 11 所示,平均定位误差为 0.05 m.

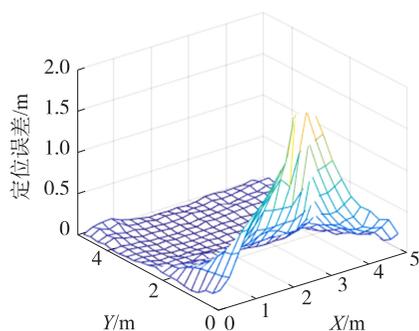


图 10 单个 LED 灯被遮挡时的定位误差

Fig. 10 Positioning error with one LED blocked

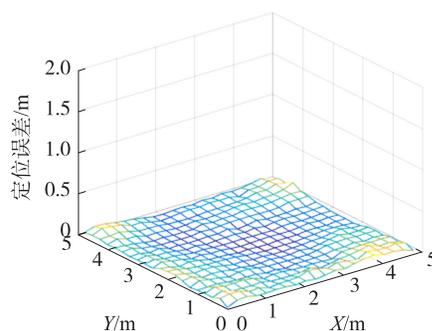


图 11 经过预处理后的定位误差

Fig. 11 Positioning error after pre-processing

由上对比可得,经过预处理程序后定位误差有了明显的缩小. 所以存在遮挡情况时,接收端根据接收到每个 LED 信号功率的大小,判断遮挡情况,然后进行自选择定位. 事实证明该想法是完全可行且有效的.

4 结论

本文提出了一种新颖的基于压缩感知的可见光室内定位算法,简要介绍了可见光室内定位系统. 在朗伯辐射模型的基础上,对墙面的光反射过程进行了简化,对不同情况下的噪声以及反射光对定位精度的影响进行了分析. 对 LED 灯被遮挡的情况进行了研究,并提出改进方法,能够有效地减少遮挡情况对定位精度的影响. 与基于接收信号强度的三边定位方法相比,能够有效地降低在房间角落的定位误差,且定位误差随着 LED 灯个数的增加而不断减少. 该方法不需要同步接收信号,对 LED 灯的布局没有任何要求,且数据计算复杂度不高. 仿真结果表明,该方法具有很好的定位性能.

[参考文献]

- [1] RAHMAN M S, HAQUE M M, KIM K D. Indoor positioning by LED visible light communication and image sensors[J]. International journal of electrical and computer engineering, 2011, 1(2): 420-431.
- [2] WANG E, WANG M, MENG Z, et al. A Study of WiFi-Aided magnetic matching indoor positioning algorithm[J]. Journal of computer and communications, 2017, 5(3): 91-101.
- [3] GUAN W, WU Y, WEN S, et al. A novel three-dimensional indoor positioning algorithm design based on visible light communication[J]. Optics communications, 2017, 392: 282-293.
- [4] GU W, AMINIKASHANI M, DENG P, et al. Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems[J]. Journal of lightwave technology, 2016, 34(10): 2578-2587.
- [5] FORNASIER, M, RAUHUT, H. Compressive sensing[J]. Handbook of mathematical methods in imaging, 2010, 56(4): 4-5.
- [6] YANG J, THOMPSON J, HUANG X, et al. Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2013, 51(7): 4214-4225.
- [7] KREUCHER C, BRENNAN M. A compressive sensing approach to multistatic radar change imaging[J]. IEEE Transactions

- on geoscience and remote sensing,2013,52(2):1107-1112.
- [8] 沈芮,张剑. 基于可见光通信的室内定位方法[J]. 信息工程大学学报,2014,15(1):41-45.
- [9] CHEN Y A,CHANG Y T,SENG Y C,et al. A framework for simultaneous message broadcasting using CDMA-based visible light communications[J]. IEEE sensors journal,2015,15(12):6819-6827.
- [10] GUAN W,WU Y,WEN 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(10):106-105.
- [11] JUNG S Y,HANN S,PARK C S. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps[J]. IEEE transactions on consumer electronics,2012,57(4):1592-1597.
- [12] ZHANG X,DUAN J,FU Y,et al. Theoretical accuracy analysis of indoor visible light communication positioning system based on received signal strength indicator[J]. Journal of lightwave technology,2014,32(21):4180-4186.

[责任编辑:顾晓天]