

基于指纹的室内可见光定位方法

赵楚韩^{1**}, 张洪明^{1,2*}, 宋健^{1,2}

¹清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;

²深圳清华大学研究院广东省数字电视系统重点实验室, 广东 深圳 518057

摘要 为了实现低成本、低复杂度以及高精度的室内定位系统,提出了基于指纹的室内可见光定位方法。该方法利用可见光发光二极管作为信号源,根据接收到的可见光信号强度信息,结合三角定位算法和指纹定位算法,实现室内高精度定位。定位过程主要分为两步:第一步,通过三角定位算法确定移动目标粗略的位置范围;第二步,以该位置范围作为限制条件,使用指纹定位算法实现更精确定位。实验结果表明,该方法与传统的基于可见光信号强度的定位方法相比,平均定位精度提高了 64.71%;同时,与传统的基于指纹的定位方法相比,可以在更低复杂度的情况下,实现更精确定位。

关键词 光通信;室内定位系统;接收信号强度指纹;三角定位算法

中图分类号 TM923.34; TN31

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0806002

Fingerprint Based Visible Light Indoor Localization Method

Zhao Chuhan^{1**}, Zhang Hongming^{1,2*}, Song Jian^{1,2}

¹National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Key Laboratory of Digital Signal and Image Processing of Guangdong Province, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract In order to achieve low-cost, low-complexity and high-precision indoor localization system, we propose a fingerprint based visible light indoor localization method. In the method, the light emitting diode (LED) is employed as the transmitter. Based on the received signal strengths (RSS) of visible light, the triangulation method and fingerprint based hybrid positioning algorithm are combined to achieve indoor high precision localization. The proposed method can be divided into two phases. First, the triangulation method is used to obtain the coarse range of the mobile terminal (MT). Then, the fingerprint based method which is constrained by the coarse range is used to get a fine estimate of the MT. Experimental results show that the averaged positioning error of the proposed method is improved by 64.71% compared with that of the traditional RSS based visible light indoor localization method. Besides, the proposed method can achieve better localization performance at lower computational complexity compared with the traditional fingerprint based method.

Key words optical communications; indoor localization system; received signal strength fingerprint; triangulation method

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 230.3670; 040.5160

1 引 言

随着室内定位相关应用的发展,室内定位技术受到人们越来越广泛的关注。与室内定位相关的应用,如智能物流、智能家居、室内机器人导航和室内无人机监控等,都与定位技术的发展息息相关。除

此之外,室内定位技术可以提高基于位置服务的质量,如自动导航轮椅、盲人引导等。与此同时,更广泛的应用场景对室内定位的精度、成本以及计算复杂度提出了挑战。

全球定位系统(GPS)作为应用最广泛的定位系统,虽然在室外环境可以取得很好的定位效果,但是

收稿日期: 2018-01-16; 修回日期: 2018-03-15; 录用日期: 2018-04-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0403403)

* E-mail: zhhm@tsinghua.edu.cn; ** E-mail: zhaoch15@mails.tsinghua.edu.cn

在室内环境中,由于 GPS 信号会受到障碍物的衰减作用,定位效果差强人意。到目前为止,研究人员提出并研究了多种针对室内场景的定位系统,如基于射频(RF)信号的定位系统^[1]、超宽带定位系统^[2-3]以及基于图像的定位系统^[4]。然而,在射频定位系统中,定位精度容易受到多径效应、电磁辐射等因素的影响;超宽带和基于图像的定位系统虽然能够提供高精度定位,但是存在设备成本、计算复杂度过高等问题。

针对以上定位系统所存在的问题,研究人员提出基于可见光的室内定位系统^[5-14]。这种定位系统不仅定位精度高,而且具有不产生电磁辐射、安装成本低等优点,受到了人们的青睐。当前,基于可见光的室内定位系统按照接收装置的不同可分为基于图像传感器的定位系统和基于光电探测器(PD)的定位系统^[5]。基于图像传感器的定位系统^[6-8]主要是利用成像的几何关系来实现定位功能,但是这种定位方法需要额外的图像处理过程,导致定位复杂度高,对数据的传输速率会有一定的限制;同时,定位精度也会受到传感器的接收视场角(FOV)的限制。基于 PD 的可见光定位系统^[9-15]主要通过测量接收信号强度(RSS)、到达时间差(TDOA)^[12]以及到达角度(AOA)^[13]等信息,估算出接收端与信号发射端的相对距离,再结合三角定位算法计算接收端的位置坐标。其中,基于 RSS 的可见光定位系统具有获取信号方法简单、成本较低等优点,应用最为普遍。但是这种定位系统容易受到墙壁、地面等反射光的影响,定位精度受限。有研究人员提出基于 RSS 指纹^[14-15]的定位方法,该方法可以有效提高定位精度,而且稳健性更高,但是每次定位的计算量大,不适用于快速定位的场景。

本文提出基于指纹的可见光室内定位方法,利用 LED 照明装置作为信息发射源,PD 作为信号接收器,测量 RSS 信息,结合三角定位和指纹定位算法,保证在低成本、低复杂度的条件下,实现室内高精度定位。

2 定位原理

2.1 定位系统

如图 1 所示为室内定位系统示意图,4 盏 LED 作为信号源,被安装在距离地面 h 处的天花板上,其位置坐标已知并分别标记为 $\mathbf{r}_{\text{LED}_i} = [x_i, y_i, h]^T$, ($i=1,2,3,4$)。移动端(MT)被水平朝上放置于地面上的任意位置 $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ 处,其中 z 为 MT 距

离地面的垂直距离,PD 作为信号接收器被安装在 MT 上。

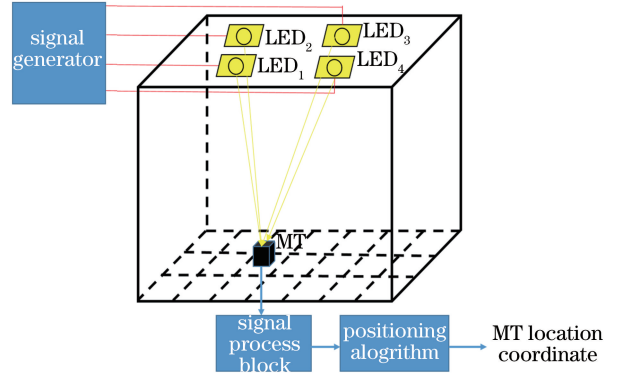


图 1 室内定位系统示意图

Fig. 1 Indoor positioning system overview

在只考虑直射链路(LOS)的情况下^[16],PD 的接收光功率 $P_{r,i}$ 与 LED_i ($i=1,2,3,4$) 的发射光功率 $P_t^{(i)}$ 的关系可以表示为

$$P_{r,i} = H_{\text{LOS}}(0) \cdot P_t^{(i)}, \quad (1)$$

式中: $H_{\text{LOS}}(0)$ 是 LOS 的直流增益。由于 LED 的辐射服从朗伯分布^[17], $H_{\text{LOS}}(0)$ 可表示为

$$H_{\text{LOS}}(0) = \frac{(m+1)A}{2\pi d_i^2} \cos^m \phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, \quad (2)$$

$$0 \leq \psi \leq \psi_c,$$

式中: A 为 PD 的接收面积; d_i 为 PD 与 LED_i 的相对距离; m 为辐射瓣的模式数,其值由发射器半功率角 $\Phi_{1/2}$ 决定; ϕ 为辐射角; ψ 为接收角; $T_s(\psi)$ 为接收器的光学滤波器增益; $g(\psi)$ 为光学聚光器增益,与光接收器的接收视角 ψ_c 和反射系数 n_c 有关。

考虑到不同 LED 发出的光在自由空间传播过程中会产生叠加效应,为了获取到不同 LED 发出的信号,采用时分复用技术,将每盏 LED 灯发出的信号在时域上错开,并为每盏 LED 灯分配不同的身份标签(LED-ID),通过信号发生器调制 LED 灯发出的光。PD 接收到信号光后,经过信号处理模块,可以提取出 4 盏 LED 灯发出的信号光功率,由接收光功率所组成的向量可以表示为

$$\mathbf{P} = [P_{r,1}, P_{r,2}, P_{r,3}, P_{r,4}]^T, \quad (3)$$

最后将 \mathbf{P} 输入定位算法模块中,可以输出 MT 的位置坐标。

基于指纹的可见光定位方法主要可以分为两个阶段:指纹库建立阶段和定位阶段。在指纹库建立阶段,在定位区域内选取一些参考点,测量并记录在每个参考点处接收的光功率向量 \mathbf{P} 作为位置指纹,建立指纹数据库。定位阶段主要分为两步:第一步,

测量 MT 在任意位置处接收光功率向量,然后通过接收光功率相应计算公式估算 MT 与每盏 LED 灯的相对距离,最后根据三角定位原理及其最大定位误差确定 MT 大致位置范围;第二步,将该位置范围作为限制条件,再在指纹库中搜索与 \mathbf{P} 匹配的指纹,根据匹配指纹所对应的位置坐标可以计算得到 MT 的位置坐标。

2.2 指纹库建立阶段

为了建立指纹库,把定位区域均匀划分为 $N = n \times n$ 个网格,在每个网格内选取参考点,并测量 PD 在每个参考点处接收到的光功率向量。图 2 为接收器在第 i 个参考点处接收到的一个周期的信号,可以明显看出,不同 LED 灯发出的信号在时域上错开,所以经过解调程序后可以获得 PD 接收到的从不同 LED 发出的光功率 $P_{r,i}$,由这 4 个不同的接收可见光功率值组成的向量就是第 i 个参考点的指纹:

$$\mathbf{R}_i = [P_{r,1}^{(i)}, P_{r,2}^{(i)}, P_{r,3}^{(i)}, P_{r,4}^{(i)}]^T, \quad (4)$$

式中: $P_{r,j}^{(i)}$ 为在 PD 第 i 个参考点处接收到的由 LED _{j} 发出的可见光功率,将接收光功率向量指纹 \mathbf{R}_i 和第 i 个参考点的位置坐标 $\mathbf{l}_i = (x_i, y_i)$ 存入指纹库形成一条指纹数据。在每个参考处按照以上指纹采集过程,采集 N 次即可建立指纹库 $\mathbf{R} = [[\mathbf{R}_1, \mathbf{l}_1]^T, [\mathbf{R}_2, \mathbf{l}_2]^T, \dots, [\mathbf{R}_N, \mathbf{l}_N]^T]^T$ 。

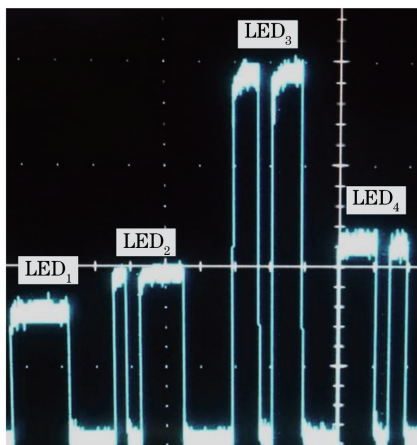


图 2 接收到的信号
Fig. 2 Received signal

2.3 定位阶段

基于可见光指纹的定位方法,其基本原理是认为接收到的可见光信号与地理位置具有强相关性,将物理空间映射到信号空间上,把不易测量的地理位置坐标转化为容易测量的可见光信号指纹^[18]。为了定位目标位置,传统的基于指纹的定位方法是将线上定位时测量到的接收光功率向量与指纹库中

的指纹进行对比,通过“指纹匹配”查找相似指纹,相似度越高则认为定位目标的位置与指纹对应的位置越近,根据相似指纹所对应的位置估算出定位目标的位置。这种定位方法与传统的基于接收信号强度的方法相比,可以实现更高的定位精度。然而,这种方法在每次定位时,都需要将线上定位时实际接收到的可见光信号强度与指纹中的所有指纹一一对比,进行全局搜索查找最优解。可想而知,如果指纹库中数据量极大,会使得定位复杂度极高,定位时间长,不适用于快速定位场景。为了减少定位复杂度,提出了两步定位法,该定位方法先通过传统的三角定位方法确定 MT 的粗略位置范围,缩小指纹的搜索空间,再使用指纹定位算法搜索最优解。算法的具体步骤如下:

1) 根据接收光功率指纹向量 \mathbf{P} , 计算 MT 与每盏 LED 灯的相对距离,再通过三角定位算法确定 MT 的粗略位置范围;

2) 将第一步得到的位置范围作为限定条件,通过“指纹匹配”算法查找指纹库中与 \mathbf{P} 相似的指纹,最后根据相似指纹所对应的位置坐标计算出 MT 的位置坐标。

2.3.1 位置范围

为了不失一般性,假设接收器和发射源的法线方向都垂直于天花板,已知接收器与发射源的垂直距离 H ,可以得到

$$\cos \phi = \cos \psi = \frac{H}{d}. \quad (5)$$

测量出线上定位时 PD 接收到的光功率向量 \mathbf{P} , 再通过(2)式可以计算出 MT 和第 i 盏 LED 的相对距离 d_i :

$$d_i = \sqrt{\frac{(m+1)AT_s(\psi)g(\psi)P_r^{(i)}H^2}{2\pi P_{r,i}}}. \quad (6)$$

已知 LED 的位置坐标,可以推出以下方程:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + H^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + H^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + H^2 = d_3^2 \\ (x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + H^2 = d_4^2 \end{cases}, \quad (7)$$

经简化可以得到:

$$\mathbf{A}\mathbf{r} = \mathbf{B}, \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_2 - x & y_2 - y \\ x_3 - x & y_3 - y \\ x_4 - x & y_4 - y \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) + (x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) + (x_3^2 + y_3^2) - (x_1^2 + y_1^2) \\ (d_1^2 - d_4^2) + (x_4^2 + y_4^2) - (x_1^2 + y_1^2) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过最小似然估计法^[19],求解(8)式可以得到 PD 的位置坐标的估计值为

$$\tilde{\mathbf{r}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (11)$$

实际定位过程中,由于接收到的可见光信号会受到环境噪声、多径效应等因素的影响,由(11)式计算得到的 PD 的位置会与实际位置存在误差。如果已知三角定位算法产生的最大定位误差为 ϵ_{tri} ,可以得到 PD 的真实位置坐标 \mathbf{r} 与估计位置 $\tilde{\mathbf{r}}$ 的关系式:

$$\|\mathbf{r} - \tilde{\mathbf{r}}\| \leq \epsilon_{tri}. \quad (12)$$

所以,可以确定出 PD 可能的位置范围 \mathbf{S} 是圆(圆点为 $\tilde{\mathbf{r}}$,半径 $r = \epsilon_{tri}$)与定位区域的相交区域,如图 3 所示。

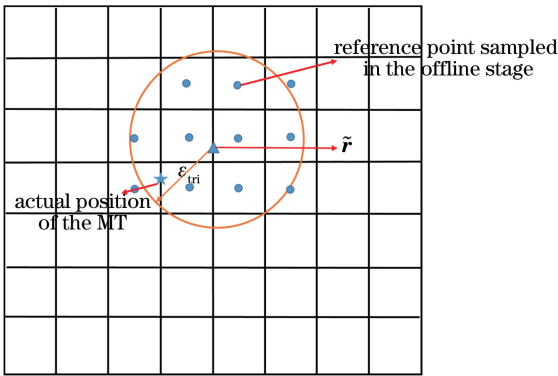


图 3 位置范围示意图

Fig. 3 Location range overview

2.3.2 指纹匹配

为了进一步提高定位精度,将 2.3.1 节计算得到的 MT 的位置范围 \mathbf{S} 作为限定条件,在指纹库中查找在该范围内的指纹并记为 $\mathbf{R}_s = [\mathbf{R}_{s_1}, \mathbf{R}_{s_2}, \dots, \mathbf{R}_{s_g}]$, g 为满足条件的指纹个数。然后再将这些指纹与线上定位时在未知位置处实际接收的光功率指纹向量 \mathbf{P} 对比,计算匹配程度,匹配程度的衡量标准是计算 \mathbf{P} 与 \mathbf{R}_s 内的指纹的欧式距离,距离越小,匹配程度越高。 \mathbf{P} 与指纹 \mathbf{R}_{s_i} 的欧式距离 L_2 表达式为

$$L_2(\mathbf{P}, \mathbf{R}_{s_i}) = \|\mathbf{P} - \mathbf{R}_{s_i}\|_2, \quad (13)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示二范数算子。

按照匹配程度的大小进行排序,选择匹配程度最高的前 K 个指纹 \mathbf{R}_K ,这 K 个指纹所对应的位置坐标 $\mathbf{l}_{s_i}, i = 1, 2, \dots, K$ 的平均值即为 MT 的位置坐标:

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{l}_{s_i}. \quad (14)$$

2.4 性能分析

2.4.1 定位精度

传统的基于可见光信号强度的定位方法,通过信号传播模型计算 MT 与发射器的相对距离,再根据距离方程计算出 MT 的位置坐标。定位精度易受到墙壁、地面反射等非直射链路光的影响。本研究提出的基于指纹的可见光定位方法,只是将三角定位算法计算出的位置坐标作为初步定位,在此基础上,再利用指纹定位算法获得更高的定位精度。与传统的指纹定位方法相比,由于可以保证有效解在初步定位所计算的位置范围内,所以在这个范围之内再应用指纹定位算法去计算目标所在的位置,并不会影响指纹定位的精度,而且可以保证定位不会出现过大的偏差。

2.4.2 计算复杂度

由上述分析可知,本研究提出的定位方法的计算量主要来自于“指纹匹配”阶段,假设将 \mathbf{P} 与一条指纹对比计算匹配程度的计算复杂度记为 C ,那么总的计算复杂度为 gC 。而传统的基于指纹的定位方法,需要将 \mathbf{P} 与指纹中所有指纹一一匹配计算匹配程度,总的计算复杂度为 NC ,可以看出,计算复杂度会随着指纹库的指纹数量线性增长。而本研究所提出的定位方法,计算复杂度主要取决于 g ,其中 g 的大小与三角定位的误差有关。在一般情况下 $g \ll N$,所以随着 N 的增大,定位计算量降低得越明显。

3 实验装置和结果

为了验证定位方法的有效性,本研究设计了相关的实验,如图 4 所示。4 盏固定在高度为 90 cm 处垂直放置的 LED,灯的位置坐标分别为 (2.5, 5) cm, (2.5, 25) cm, (30, 25) cm, (30, 5) cm, 信号发生器生成不同的 LED-ID 信号加载到相应的 LED 上,使 LED 周期性发送光信号;在接收端,PD 作为信号接收器,被水平放置于定位区域内的任意位置,其有效接收面积为 (3.5 × 3.6) mm², 高度为 1.91 cm,负责将接收光信号转化为电信号,并通过放大器后由示波器采集,再经过解调模块得到在该位置上接收的光功率向量,最后再根据上述定位算法,计算出 PD 的位置。

实验中定位区域的面积为 (30 × 30) cm², 为了方便采集数据,将定位区域均匀划分成 12 × 12 个带

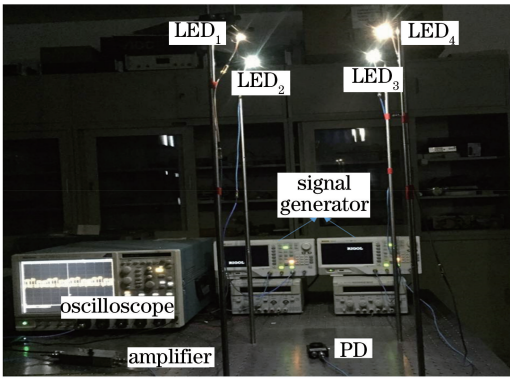


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

编号小格,每个小格的面积为 $(2.5 \times 2.5) \text{ cm}^2$ 。在离线阶段,在每个小格内选取一个参考点,测量每个参考点的指纹以建立指纹库。为了验证所提出的定位方法的有效性,在定位区域内均匀选取了 156 个与参考点坐标不相同的测试点来计算定位误差。

为了获得 PD 的位置坐标,根据第 2 节所述定位算法,第一步利用三角定位算法粗略确定 PD 的位置范围,再应用“指纹匹配”算法进行更精确定位。为了确定 PD 可能的位置分布范围,首先应该估计出三角定位法的定位误差。通过测量每个测试点的定位误差,画出了三角定位法的定位误差分布,如图 5 所示。由图可知三角定位法的最大的定位误差为 4.58 cm,平均定位误差为 2.55 cm,所以经过三角定位法预测出 PD 的位置坐标 \tilde{r} 后,可以确定 PD 的位置分布范围在以 \tilde{r} 为圆点,半径 $r = 4.58 \text{ cm}$ 的圆与定位区域的相交区域内,这里考虑到在离线阶段参考点的采集密度,为了避免出现位置范围内无法找到指纹库中的指纹的情况,将 r 设为 5.2 cm。

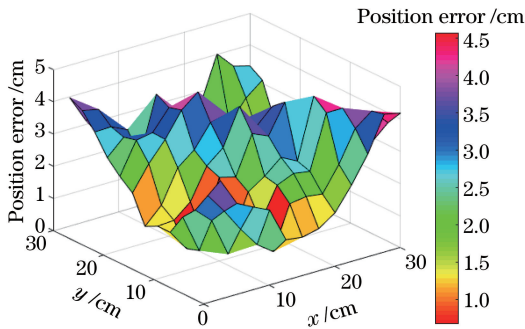


图 5 三角定位法定位误差分布

Fig. 5 Positioning error distribution of the triangulation method

第二步,以位置范围 S 为限制条件,通过“指纹匹配”算法最终计算出 PD 更为精确的位置坐标 \hat{r} 。

考虑到在“指纹匹配”算法中 K 的取值对定位精度的影响,为了确定最优的 K 值,本研究分别比较了 $K=1,2,3,4$ 时的定位误差累计分布(CDF),如图 6 所示,平均定位误差分别为 1.35, 0.90, 1.22, 1.40 cm,最大定位误差分别为 2.70, 2.89, 4.13, 4.23 cm,且定位误差小于 1 cm 的概率分别为 51.28%, 72.44%, 55.77%, 55.77%。综合考虑, $K=2$ 时定位效果最好,与传统的三角定位方法相比,最大定位误差减少了 36.9%,平均定位精度提高了 63.41%。

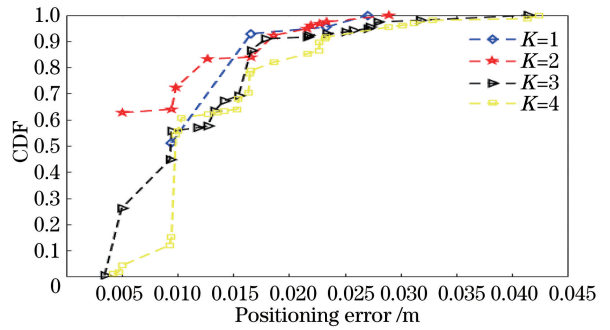


图 6 不同 K 值的定位误差累计分布

Fig. 6 CDF of positioning error for different values of K

为了证明本研究所提出的定位方法可以有效提升定位精度,实验对比了本研究所提出的定位方法、传统的三角定位方法和传统的基于指纹的方法的定位误差累计分布,如图 7 所示。从图可以看出,本研究提出的定位方法的定位效果明显优于其他两种方法。经过计算得到,这三种方法的定位误差小于 1 cm 的概率分别为 72.44%, 57.77%, 69.23%;最大定位误差分别为 2.89, 4.58, 6.68 cm;平均定位误差分别为 0.90, 2.55, 0.96 cm。与传统的基于指纹的定位法相比,平均定位精度提高 6.25%,最大定位误差减少 56.74%;与传统的基于接收可见光信号强度的方法相比,平均定位精度提高 64.71%,最大定位误差减少 36.9%。因此,提出的定位方法与其他两

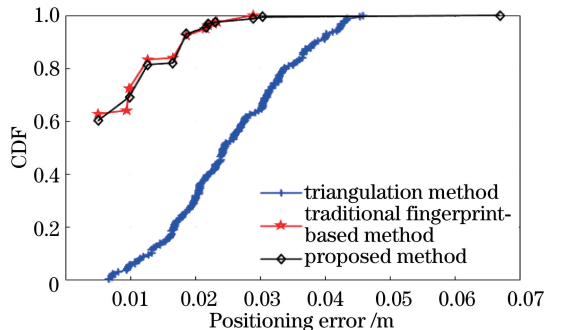


图 7 不同定位算法对比

Fig. 7 Comparison of different localization methods

种基于可见光接收强度的定位方法相比,定位精度都有明显提升。

最后,为了证明在真实的实验中,所提定位方法,与传统的基于指纹的定位方法相比,可以有效减少定位计算量的结论,计算了在每个测试点进行定位时指纹匹配所需的次数,如图 8 所示。可以明显看出:与传统的指纹定位法相比,所提定位方法在进行“指纹匹配”时最少只需匹配 1 次,最多只需匹配 15 次,而传统的指纹定位算法每次定位都需要匹配 144 次,平均匹配次数平均减少了 92.94%。而且随着指纹库中数据的增大,匹配次数下降量会更加明显。所以,所提定位算法在定位计算量和定位精度两方面上都比传统的基于指纹定位方法更具优势。

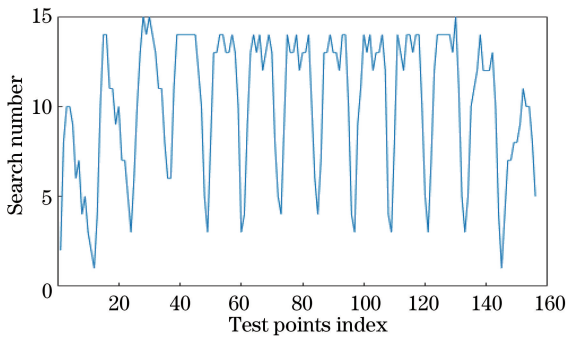


图 8 搜索次数分布

Fig. 8 Search number distribution

4 结 论

提出基于指纹的室内可见光定位方法,可以使用现有的 LED 照明装置实现定位功能。为了解决基于可见光强度的室内定位方法存在的定位精度低或者定位复杂度高问题,提出两步定位法,将接收到的可见光功率向量作为位置指纹,先使用三角定位算法确定粗略的位置范围,再结合指纹定位算法获得更精确的位置坐标。经实验证明,该方法可以在较低计算复杂度的前提下,实现高精度定位;在 30 cm×30 cm×90 cm 的定位范围内,该方法的最大定位误差为 2.89 cm,平均定位误差为 0.90 cm。与传统的基于接收可见光信号强度的方法相比,平均定位精度提高 64.71%,最大定位误差减少了 36.9%,定位精度有显著提升。与传统的基于指纹定位法相比,平均定位精度提高 6.25%,最大定位误差减少 56.74%,可以在更低复杂度的前提下,实现更精确定位。

参 考 文 献

[1] Hossain A M, Van H N, Jin Y, *et al.* Indoor

localization using multiple wireless technologies[C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, October 08-11, 2007, Pisa, Italy. New York: IEEE, 2007: 1-8.

[2] Gezici S, Tian Z, Giannakis G B, *et al.* Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.

[3] Xiao Z, Wang Y C, Tian B, *et al.* Development and prospect of ultra-wideband localization research and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141.

肖竹,王勇超,田斌,等.超宽带定位研究与应用:回顾和展望[J].电子学报,2011,39(1):133-141.

[4] Hile H, Borriello G. Positioning and orientation in indoor environments using camera phones[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(4): 32-39.

[5] Zhang X F, Wang M, Wang J. Research status and development of indoor positioning based on visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100001.

张晓锋,王敏,王瑾.基于可见光通信室内定位的研究现状与发展[J].激光与光电子学进展,2017,54(10):100001.

[6] Yoshino M, Haruyama S, Nakagawa M. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor [C] // Radio and Wireless Symposium, January 22-24, 2008, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2008: 439-442.

[7] 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): 161-170.

[8] Guan Y, Sun D D, Yin S G, *et al.* High precision visible light indoor positioning based on image communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 120601.

管扬,孙德栋,殷树刚,等.基于成像通信的高精度可见光室内定位方法[J].中国激光,2016,43(12):120601.

[9] Steendam H, Wang T Q, Armstrong J. Theoretical lower bound for indoor visible light positioning using received signal strength measurements and an aperture-based receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(2): 309-319.

[10] Xu W, Wang J, Shen H, *et al.* Indoor positioning for multiphotodiode device using visible-light communications[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-11.

[11] 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.
- [12] 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.
- [13] Wei L, Zhang H M, Yu B Y, *et al.* Cubic-receiver-based indoor optical wireless location system [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-7.
- [14] Nadeem U, Hassan N U, Pasha M A, *et al.* Indoor positioning system designs using visible LED lights: performance comparison of TDM and FDM protocols [J]. Electronics Letters, 2015, 51(1): 72-74.
- [15] Vongkulbhisal J, Chantaramolee B, Zhao Y, *et al.* A fingerprinting-based indoor localization system using intensity modulation of light emitting diodes [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(5): 1218-1227.
- [16] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [17] 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.
- [18] Li D, Zhang B X. Techniques for fingerprint based indoor localization [J]. ZTE Technology Journal, 2015, 21(6): 31-34.
李冬, 张宝贤. 基于指纹的室内定位技术 [J]. 中兴通讯技术, 2015, 21(6): 31-34.
- [19] Gu W J, 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.