

一种测距辅助的室内可见光指纹定位方法

陈道钱, 吴晓平*, 华宇婷

浙江农林大学信息工程学院, 浙江 临安 311300

摘要 提出了一种测距辅助的可见光指纹定位(RAFL)方法,基于测距方法,根据多组光源初步确定定位目标的位置范围,采用双线性插值算法构建定位区域指纹,在定位目标范围内进行指纹匹配,最终获得目标的实际位置。研究表明,所提方法具有较强的抗干扰性,能够有效提高定位精度。

关键词 光通信;室内定位;可见光;测距定位;指纹定位

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060603

Indoor Visible Light Fingerprint Localization Scheme with Range-Assistance

Chen Daoqian, Wu Xiaoping*, Hua Yuting

School of Information Engineering, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China

Abstract A range-assisted visible light fingerprint localization (RAFL) method is proposed. Based on the ranging method, the position range of the positioning target is preliminarily determined according to the multiple sets of light sources. Then the bilinear interpolation algorithm is used to construct the localized area fingerprint and the fingerprint matching is carried out within the target range. The actual location of the target is finally obtained. The research results show that the proposed method has a strong anti-interference ability and can effectively improve the positioning accuracy.

Key words optical communications; indoor positioning; visible light; ranging positioning; fingerprint positioning

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 230.3670

1 引言

目前针对室内定位方面的研究大部分是采用无线传感器网络技术,通过测距或非测距实现定位,如采用 wifi、蓝牙、zigbee 等。然而电磁波通信受外界环境干扰严重,在很多场景下并不适用,因此可见光通信定位技术被大量学者研究^[1-4]。其存在以下优点:1) 抗干扰能力强,在复杂场景下受外界环境的影响小,不会出现严重的多径效应;2) 可见光通信设备成本低,且大部分室内场景中都安装了照明灯;3) 可见光信号比电磁波更稳定^[5]。

基于上述分析,利用可见光通信技术进行室内定位是较好的选择,一方面具有较强的抗干扰性,能够满足室内复杂的环境要求,另一方面可利用现成的 LED(Light Emitting Diode)设备,降低设备部署

的成本。利用可见光进行室内定位的研究有很多,如关伟鹏等^[6]利用 CDMA(Code Division Multiple Access)技术实现光信号的调制,从而解决多光源干扰的问题,提高了测距精度,采用三边定位法实现可见光定位,但是该方法单纯采用三边定位法,定位精度有待提高;孙洪伟等^[7]利用手机开发 LED 可见光通信功能,并通过摄像头捕获可见光信号,实现可见光通信和定位,该方法利用摄像头捕获可见光信号,在测距方面并不准确;车平等^[8]针对部署成本问题,研究了一种利用两点光源定位方法,该方法虽然节约了成本,但采用两点光源在定位精度上并没有大的优势;Zhu 等^[9]利用可见光技术结合加速度计、陀螺仪等传感器实现了高精度的定位;Guo 等^[10]建立了定位区域光信号强度指纹,并利用机器学习方法筛选奇异值,从而使定位精度小于 5 cm;Wang

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-10-08; 录用日期: 2018-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(31570629)、浙江省自然科学基金(Y16F020036, LY18F020010)、浙江省公益技术研究工业项目(2015C31004)

* E-mail: wuxiaopingzafu@163.com

等^[11]根据 LED 等照射特性提出一种基于信号强度比和多向 LED 阵列方法,通过引入光线平均角度接收率评估位置覆盖率和天线接收角度,实验结果表明比单结构 LED 具有更高的定位精度; Büyükçorak 等^[12]利用马尔科夫链和蒙特卡罗方法解决光通信信道不稳定问题,使定位算法具有更好的稳健性;李成勇等^[13]提出一种基于超声波测距辅助的可见光定位方法,首先利用超声波技术实现测距,然后结合 TDOA(Time Difference of Arrival)方法进行定位;吴兴邦等^[14]利用 CDMA 编码光信号,并采用蚁群算法搜索最佳定位点,该方法具有较高的定位精度,但蚁群算法搜索过程复杂度较高。虽然在可将光定位方面的研究已取得丰厚成果,但仍存在 2 个难以解决的问题:1) 利用可见光强度测距不准确;2) 定位过程中计算复杂度高。

针对可见光定位存在的问题,本文提出一种测距辅助的室内可见光指纹定位方法,利用可见光信号强度(RSSI)进行三边定位,根据多组光源确定定位范围,采用插值方法快速构建定位区域信号强度指纹,并在定位范围内匹配最终定位点。该方法具有以下 3 个优点:1) 算法复杂度低;2) 指纹定位方法具有较强的抗干扰;3) 通过测距与指纹定位结合,提高了定位精度。

2 相关假设与模型

2.1 相关假设

- 1) 光源位于室内天花板上,所有光源的垂直高度相同,且都为 D 。
- 2) 定位目标在室内的高度是相同的,即所有定位目标在同一个水平面上,如所有定位目标都在地板上,高度为 0,或都在高度为 s 的水平面上。
- 3) 测距定位主要是利用信号衰减原理进行测距,即使光源功率不同,测距环境下信号衰减也是相同的,所以测距与光源功率无关。

2.2 可见光通道模型

可见光信道模型能够准确地描述信号发射端和信号接收端之间的通信模式,目前应用比较广泛的信道模型有 Lambertian 辐射模型^[15]。模型中信号发射和接收的光功率可表示为

$$P_r = P_t \cdot H(0), \quad (1)$$

式中: P_r 为接收光功率; P_t 为发射光功率; $H(0)$ 为信道的直流增益。 $H(0)$ 可表示为

$$H(0) = A(m+1) \cos^m \varphi T_s(\theta) g(\theta) \cos \theta / (2\pi d^2), \quad (2)$$

式中: A 为光电探测器(PD)的接收表面积; m 为辐射瓣的模式数; φ 为发射端辐射角度; θ 为接收端角度; d 为发射端与接收端之间的欧氏距离; $T_s(\theta)$ 为接收端光滤波器增益; $g(\theta)$ 为聚光器增益。

根据(1)式和(2)式可得到发射端与接收端之间直射信道的欧氏距离,即

$$d = \{RP_t(m+1)Ah^{m+1}T_s(\theta)g(\theta) / [4\pi^2(RP_r)^2]\}^{-1/(2m+6)}, \quad (3)$$

式中: R 为 PD 的灵敏度; h 为发射端与接收端的垂直距离。

2.3 室内定位模型

可见光室内定位模型如图 1 所示,室内天花板上有若干个可见光光源,且位置为 (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 、 (x_3, y_3, z_3) 、 (x_4, y_4, z_4) ,地板上定位目标为 $T(x, y, z)$,所有定位目标在同一水平面上。定位目标与光源可进行通信,根据接收到的信号强度 P_r 即可估算出与光源之间的欧氏距离,如图 1 中 d_1 、 d_2 、 d_3 所示。根据三边测距法即可计算出定位目标 T 的坐标位置 (x, y, z) ,即

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = d_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = d_3^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:光源与定位目标欧氏距离 d_i 可根据(3)式计算, i 为 1,2,3;本文光源位置固定,垂直高度 z_i 都为 D ,长宽为 L 和 W ;定位目标都在高度为 s 的水平面上,因此 $z = s, s \in [0, D]$ 。利用(4)式即可对定位目标进行测距定位。

光源与定位目标之间基于信号强度测距会受外界因素的影响,因此测距结果不准确,从而导致定位存在偏差。为进一步提高定位精度,本文在测距定位的基础上结合指纹定位方法,提高定位精度。图 1 中,在地板表面建立定位区域指纹,当测距定位

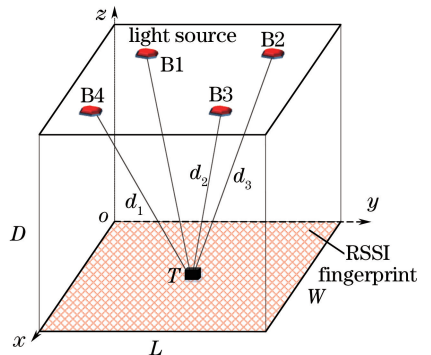


图 1 可见光室内定位模型

Fig. 1 Visible light indoor positioning model

获得定位目标的大致范围后,通过信号强度指纹匹配,得到最终的位置。

3 匹配范围

根据三边定位方法可初步获得目标的位置,一般采用3个光源即可对目标进行定位,然而测距定位受障碍物的干扰,导致测距结果不准确。为解决障碍物干扰问题,本文并非只对目标进行单次定位,而是采用不同光源组合对目标节点进行多次定位,确定一个定位目标匹配范围,再利用指纹定位方法从目标匹配范围内搜索最终的定位结果。

假设定位区域内存在 e 个光源,则每3个光源为一组,对目标 T 进行测距定位,每组光源可得到一个定位结果。本文随机地选择 m 组光源对目标进行 m 次定位,得到 m 个定位结果,然后将这 m 个定位结果连接,得到一个凸多边形,凸多边形的外接圆被定义为目标匹配范围,如图2所示。由于凸多边形包括了定位较准确和定位存在误差的情况,目标的实际位置在凸多边形外接圆内的概率较大。

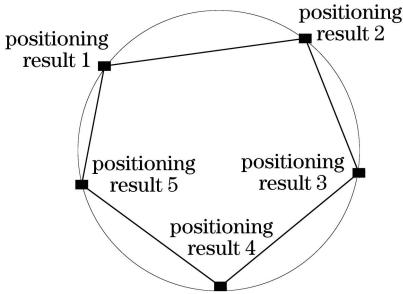


图2 定位目标匹配范围示意图

Fig. 2 Schematic of positioning target matching range

4 指纹定位

指纹定位是一种较可靠的方法,如文献[16-17]分别采用地磁和wifi构建室内指纹,定位目标通过匹配指纹实现室内定位。但传统的指纹定位方法存在以下2个缺点:1)室内指纹构建工作量大,当室内场景发生变化时需要重新构建指纹;2)在定位过程中,定位目标需对整个指纹库进行匹配,计算量大,实时性得不到保障。

针对指纹库构建工作量大的问题,通过采集少量位置的RSSI,基于双线性插值算法构建指纹,极大地降低了指纹库构建工作量。针对指纹匹配计算量大问题,根据测距定位确定指纹匹配范围,在该范围内进行匹配,极大地降低了计算量。

4.1 指纹构建

假设定位区域是一个矩形区域,将定位区域划

分为若干个子区域,每个子区域为一个匹配点,如图3所示。定位区域被划分为 $a \times b$ 个子区域。

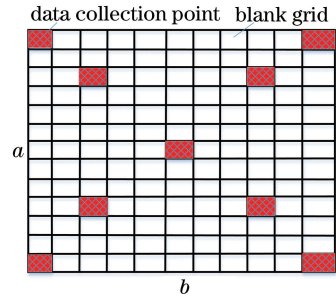


图3 定位平面分割图

Fig. 3 Schematic of plane positioning segmentation

在构建光通信信号强度指纹时,选择定位区域中 q 个子区域作为数据采集点,如图中阴影部分所示,采集这些方格内的RSSI值,该值即为某个光源信号到达数据采集点的信号强度值。每个数据采集点需要采集5个信号强度值,这5个光源分别是天花板上最左上角、右上角、左下角、右下角和中心位置的LED灯。数据采集完成后,每个数据采集点都记录成一个5维的向量,即

$$\mathbf{S}_v = (r_1, r_2, r_3, r_4, r_5), \quad (5)$$

式中: r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 分别为一个数据采集点接收到5个光源的信号强度值。

当定位平面上所有数据采集点都完成数据采集后,采用双线性插值算法对其他空白格子进行数据插值预测。双线性插值方法根据周围最近的4个样本采集点所采集的RSSI值对空白格子进行插值预测,是一种非常成熟的方法,其具有较高的准确性^[18]。具体过程如图4所示。

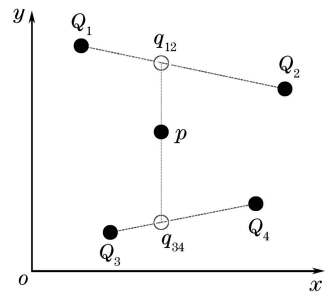


图4 双线性插值图

Fig. 4 Schematic of bilinear interpolation

假设图中 $Q_1 \sim Q_4$ 表示定位平面中的数据采集点, p 表示空白位置,5个位置的坐标已知,其中 $Q_1 \sim Q_4$ 数据采集点已经记录了RSSI,而 p 处的空白位置需要利用插值算法预测RSSI值。首先根据 Q_1, Q_2 两点之间的欧式距离计算出点 q_{12} 的RSSI值,然后根据 Q_3, Q_4 两点计算出 q_{34} 位置的RSSI

值,最后根据 q_{12} 和 q_{34} 之间的距离和 RSSI 值计算出空白位置 p 处的 RSSI 值,完成空白位置的光信号强度的预测。分别针对不同光源插值后,定位区域中所有空白格子都可得到一个 5 维向量,如(5)式所示,因为光信号受外界环境的干扰较小,每个格子对应的 5 维向量比较稳定。

4.2 指纹匹配

建立定位区域指纹后,根据测距定位得到的匹配范围进行指纹匹配定位,如图 5 所示,图中 4 组光源对定位目标进行定位的结果分别为位置 n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 ,根据这 4 个定位结果构建凸多边形的外接圆,最后将包含在外接圆内的格子(包括与外接圆相交的格子)对应的 5 维信号强度指纹与目标节点采集的 5 维信号强度指纹进行相似度匹配。

假设目标节点采集的信号强度向量为 \mathbf{R}_{RSSI} ($r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}$),匹配范围内的格子对应的信号强度向量为 $\mathbf{R}_{\text{RSSI}i}$ ($r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}$),其中 t, i 表示常数,分别表示目标节点采集信号强度向量的次数和匹配范围内格子对应的向量编号。利用向量余弦相似度原理进行匹配,匹配公式为

$$S(t, n) = \sqrt{\sum_{j=1}^5 (r_{ij} - r_{nj})^2}, \quad (6)$$

式中: n 为与凸多边形外接圆包含或相交的方格子编号。当与外接圆包含或相交的所有方格子都进行余弦相似度匹配后,选择相似度最高,即将 $S(t, n)$ 值最小的方格子的中心作为最终的定位结果。如图 5 中 T 所在方格为匹配范围内余弦相似度最高的格子,该格子的中心为最终定位结果。

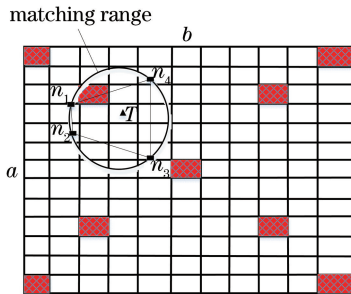


图 5 匹配定位图

Fig. 5 Schematic of matching positioning

当获得定位结果后,为进一步提高入侵目标轨迹准确性,采用卡尔曼滤波算法对定位后获得的轨迹散点图进行滤波,从而进一步提高定位精度。

4.3 目标轨迹

室内定位结果可以为室内导航提供服务,每隔固定时间对定位目标进行一次定位,得到一系列的

定位结果,将定位结果按顺序连接即可得到定位目标的运动轨迹。然而室内定位结果受外界环境干扰后会存在跳动的情况,即定位结果存在噪音。为排除噪音,获得更精确的目标运动轨迹,采用 Kalman 滤波算法对连续的定位结果进行滤波, Kalman 滤波过程主要包括时间更新和观测值更新,整个递归过程包括 5 方面的计算。

1) 状态预测:

$$\mathbf{M}_{xy}(k | k-1) = \mathbf{A} \cdot$$

$$\mathbf{M}_{xy}(k-1 | k-1) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(k), \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}_{xy}(k | k-1)$ 为第 k 个状态值,即上一状态最优结果; $\mathbf{M}_{xy}(k-1 | k-1)$ 为上一状态预测结果; \mathbf{B} 为系统参数,是一个常数, $\mathbf{U}(k)$ 为 0,所以 $\mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(k)$ 等于 0。 $\mathbf{U}(k)$ 为控制量,设置为 0; \mathbf{A} 为状态转移矩阵,由于定位点为 2 行 1 列的矩阵,因此将 \mathbf{A} 设定为 2×2 的矩阵,即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2) 协方差预测:

$$\mathbf{P}(k | k-1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{P}(k-1 | k-1) \cdot \mathbf{A}' + \mathbf{Q}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{P}(k-1 | k-1)$ 为上一状态 $\mathbf{M}_{xy}(k-1 | k-1)$ 对应的协方差; $\mathbf{P}(k | k-1)$ 为 $\mathbf{M}_{xy}(k | k-1)$ 对应的协方差; \mathbf{Q} 为系统过程噪声(假设为高斯白噪声)的协方差矩阵,可模拟得到。

3) 状态更新:

$$\mathbf{M}_{xy}(k | k) = \mathbf{M}_{xy}(k | k-1) + K_g(k) \times [\mathbf{N}_{XY}(k) - \mathbf{H} \times \mathbf{M}_{xy}(k | k-1)], \quad (10)$$

式中: $\mathbf{M}_{xy}(k | k)$ 为第 k 个预测结果; $\mathbf{M}_{xy}(k | k-1)$ 为第 k 个状态值; $K_g(k)$ 为增益; $\mathbf{N}_{XY}(k)$ 为第 k 个实际定位结果,即对该值进行滤波) \mathbf{H} 为观测矩阵,本文将 \mathbf{H} 设置为 2×2 的单位矩阵。(10) 式为状态更新函数。

4) 增益计算:

$$K_g(k) = [\mathbf{P}(k | k-1) \cdot \mathbf{H}'] \cdot [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}(k | k-1) \cdot \mathbf{H}' + \mathbf{R}]^{-1}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{R} 为测量噪音的协方差矩阵,可模拟得到。(11) 式用于计算 Kalman 滤波的增益值。

5) 协方差更新:

$$\mathbf{P}(k | k) = [\mathbf{I} - K_g(k) \cdot \mathbf{H}] \cdot \mathbf{P}(k | k-1), \quad (12)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。

将一系列定位离散点代入(10)式的 $\mathbf{N}_{XY}(k)$ 中,重复迭代上述 5 个过程即可完成对目标运动轨

迹的滤波,滤波后得到的结果为(10)式中的 $M_{xy}(k|k)$, Kalman 滤波算法一方面能够滤除异常值,另一方面具有预测功能,因此采用该方法得到的目标运动轨迹具有较高的准确性。

5 仿真实验

采用 i7 处理器、8G 内存的计算机和 Matlab 平台进行仿真实验,实验中相关参数如表 1 所示。

表 1 实验参数表

Table 1 Experimental parameters

Parameter definition	Value
L / m	100
W / m	100
H / m	5
P_1 / dB	16
A / cm^2	1.0
$T_s(\theta)$	1.0
$g(\theta)$	1.0

5.1 区域划分密度对精度影响

在构建指纹时,定位区域划分的密度与定位精度具有较强的相关性,如果定位区域划分得越细,则根据插值方法建立的指纹精细度越高,理论上定位精度也会越准确。本次实验在定位区域均匀部署 10 个灯,且灯的位置已知,定位目标随机地出现在室内高度为 0 的平面上,匹配范围由 5 组灯源定位结果组成的多边形外接圆确定,实验结果如图 6 所示,横坐标为区域划分精细度(将定位区域划分为 $a \times a$ 个子区域),纵坐标为定位误差。

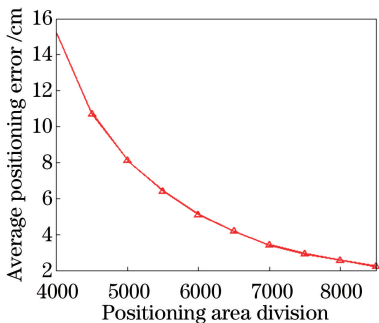


图 6 精细度实验结果

Fig. 6 Experiment results of accuracy degree

实验结果表明,随着定位区域被划分的精细度越来越高,定位的误差逐渐减小,在初始时刻定位误差减少得较快,因为本文以匹配方格子的中心为定位结果,初始时刻方格子的面积较大,所以定位误差较大。随着划分精细度提高,定位误差减小的趋势逐渐缓慢,因为格子的面积越来越小,所以定位误差

减小的趋势变慢。

5.2 光源数量对定位精度影响

光源数量对定位精度有较大影响,理论上光源数量越多,则定位精度则会越高。目标节点接收到的信号来源越多,越能够获得准确的定位结果。为验证光源数量对定位精度的影响,实验对比了 3 边测距定位(TP)方法、文献[5]提出的 GTRS 方法和文献[10]提出的 GD-LS 方法,其中本文研究的 RAFL 方法将定位区域划分的精细度设置为 8500×8500 个子区域,实验结果如图 7 所示,横坐标为光源数量,纵坐标为定位误差。

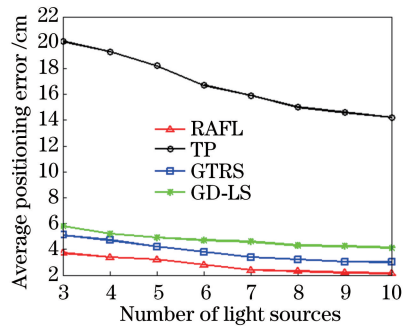


图 7 光源数量实验结果

Fig. 7 Experimental results for different numbers of light sources

实验结果表明:随着光源数量的增加,4 种方法的定位误差都有所降低,因为光源数量增加,定位目标可以选择更加合适的光源进行定位。其中 TP 方法的误差最高,因为三边测距定位测距结果并非完全准确,导致测距误差最大。GTRS 方法和 GD-LS 方法的定位误差略高于 RAFL 方法。为 GTRS 采用三边测距和 AOA 方法相结合,AOA 方法需要准确的测量角度,但光通信的角度测量难度较大,角度测量存在误差;GD-LS 方法融合多分类器实现定位,但多分类器的误差累加也是不容小觑的;而 RAFL 方法利用三边测距和指纹方法相结合,指纹方法可以排除外界因素的干扰,只需进行指纹匹配即可获得较高的准确性,所以 RAFL 能够获得较高的定位精度。

5.3 算法复杂度分析

定位算法一般运行在手机等资源有限的可移动设备中,因此定位算法的复杂度不宜太高。算法复杂度可通过算法运行时间体现出来。对比了 TP、GTRS 方法和 GD-LS 方法的平均单次定位时间,实验中将定位区域划分为 8500×8500 个子区域,每种算法都定位 1000 次,最后求出单次定位所需时间,实验结果如图 8 所示。

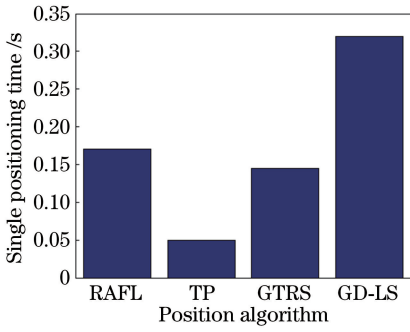


图8 算法运行时间图

Fig. 8 Running time map of algorithm

实验结果表明:单次定位耗时最短的是 TP 方法,其次是 GTRS 方法,接着是本文提出的 RAFL 方法,最后是 GD-LS 方法。TP 方法仅需要接收 3 个光源的信号即可定位,单次定位的平均耗时最短,而 GTRS 方法不仅需要测距定位,还需要进行角度的测量,因此单次定位的平均耗时高于

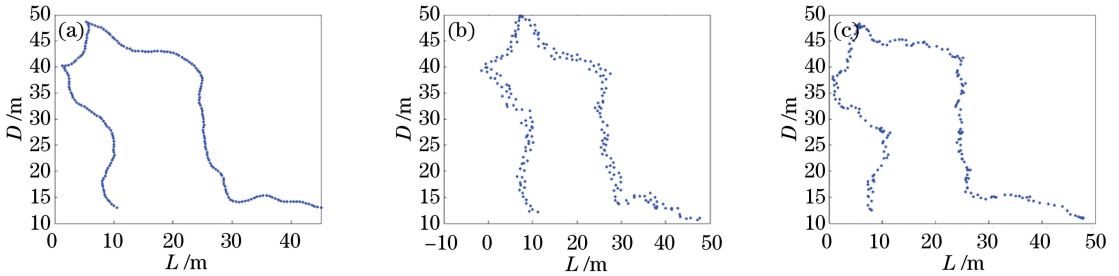


图9 定位目标运动轨迹图。(a)实际路径;(b)定位散点图;(c) Kalman 滤波后结果图

Fig. 9 Motion trajectory diagram of positioning target. (a) Actual trajectory; (b) scattered point location; (c) Kalman filtering result

为验证 RAFL 方法的连续定位精度,分别将定位目标的运动轨迹设置为随机轨迹、圆形轨迹和正方形轨迹。其中随机轨迹如图 9 所示,轨迹无规则形状,长度为 100 m。圆形轨迹的半径为 5 m,圆心位于定位区域中心。正方形边长为 7 m,正方形中心位于定位区域中心。实验结果如表 2 所示。

表2 连续定位实验结果

Table 2 Experimental results of continuous positioning

Trajectory shape	Average positioning error /cm
Random track	4.8
Circular track	3.4
Square track	3.7

实验结果表明在 3 种不同类型的运动轨迹下,平均定位误差为 3.97 cm。其中随机轨迹的误差最大,这是因为 Kalman 算法对轨迹进行滤波时,随机轨迹误差比规则(圆形和正方形)轨迹误差更大;而正方形轨迹的误差略大于圆形轨迹,这是因为正方

形轨迹在 4 个顶点位置的误差稍大。TP 定位方法。RALF 和 GD-LS 都涉及到指纹定位, RALF 会根据多次定位结果确定指纹匹配范围,在指纹匹配阶段耗时较短,而 GD-LS 方法需要利用融合的多分类器匹配全局定位区域,因此耗时远高于 RALF 方法。最终实验结果表明,在保证定位精度的前提下, RALF 方法的复杂度远低于 GD-LS 方法。

5.4 连续定位实验

定位可以为后续导航或者目标轨迹检测提供服务,定位目标在定位区域内移动,利用 RAFL 方法对目标进行连续定位,实验结果如图 9 所示,横坐标为定位区域长度 L ,纵坐标为定位区域高度 D ,图 9(a) 为定位目标实际移动轨迹,图 9(b) 为 RAFL 方法对目标的定位散点图,图 9(c) 为利用卡尔曼滤波算法对散点图进行滤波得到的定位轨迹。实验中定位区域单位为米,且划分的精细度为 4000×4000 个子区域,共 5 个光源,实验结果表明本文研究的 RAFL 方法具有较高的稳定性,定位结果跳动幅度较小。

形轨迹在 4 个顶点位置的误差稍大。

6 结 论

为解决可见光测距定位不准确问题,提出了一种测距辅助的室内可见光指纹定位方法,该方法根据多组光源进行测距定位,初步确定定位目标的范围。利用可见光的信号强度建立定位指纹库,与匹配范围内的子区域进行指纹匹配,获得定位目标的实际位置。为减少指纹建立过程中的工作量,采用双线性插值算法构建定位区域指纹,且实验结果表明该方法不管在指纹构建方面还是在定位精度方面都具有优质的性能。

参 考 文 献

- [1] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.

- 迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [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] Jin F, Li X, Zhang R, *et al.* Resource allocation under delay-guarantee constraints for visible-light communication[J]. IEEE Access, 2016, 4: 7301-7312.
- [4] Shen H, Deng Y Q, Xu W, *et al.* Secrecy-oriented transmitter optimization for visible light communication systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-14.
- [5] Dong W J, Wang X D, Wu N. A hybrid RSS/AOA algorithm for indoor visible light positioning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050603.
董文杰, 王旭东, 吴楠. 基于 RSS/AOA 混合的室内可见光定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050603.
- [6] 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.
- [7] Sun H W, Wang X D, Wu N. A scheme of indoor visible light beacon positioning based on smartphone [J]. Study on Optical Communications, 2017(1): 72-75.
孙洪伟, 王旭东, 吴楠. 一种基于智能手机的可见光室内信标定位方法[J]. 光通信研究, 2017(1): 72-75.
- [8] Che P, Feng L F. Research on two-point light source positioning technology based on indoor visible light [J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 257-262.
车平, 冯莉芳. 基于室内可见光的两点光源定位技术研究[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 257-262.
- [9] Zhu S, Zhang X. Enabling high-precision visible light localization in today's buildings [C] // International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, June 19 - 23, 2017, Niagara Falls, New York, USA. New York: ACM, 2017: 96-108.
- [10] Guo X S, Shao S H, Ansari N, *et al.* Indoor localization using visible light via fusion of multiple classifiers[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-16.
- [11] Wang L X, Guo C L, Luo P F, *et al.* Indoor visible light localization algorithm based on received signal strength ratio with multi-directional LED array[C] // IEEE International Conference on Communications Workshops, May 21-25, 2017, Paris, France. New York: IEEE, 2017: 138-143.
- [12] Büyükcorak S, Kurt G K. A Bayesian perspective on RSS based localization for visible light communication with heterogeneous networks extension [J]. IEEE Access, 2017, 5: 17487-17500.
- [13] Li C Y, Wang Z F. Visible light indoor positioning system based on ultrasonic aided ranging[J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(1): 53-55.
李成勇, 王泽芳. 基于超声波辅助测距的可见光室内定位系统[J]. 光通信技术, 2018, 42(1): 53-55.
- [14] Wu X B, Wen S S, Hua J. 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.
- [15] Lu H B, Liang Z Q. A channel model of a visible light indoor positioning system and its simulation[J]. Optical Instruments, 2017, 39(2): 64-69.
卢洪斌, 梁祚铨. 可见光室内定位系统的信道模型及其仿真分析[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 64-69.
- [16] Li S, Cai Ch, Wang Y, *et al.* Mobile phone indoor positioning system based on geomagnetic fingerprinting and PDR fusion [J]. Journal of Transduction Technology, 2018, 8(1): 21-27.
李思民, 蔡成林, 王亚娜, 等. 基于地磁指纹和 PDR 融合的手机室内定位系统[J]. 传感技术学报, 2018, 8(1): 21-27.
- [17] Bi J X, Wang Y J, Cao H J, *et al.* A method of WiFi indoor positioning based on omnidirectional fingerprint database [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(2): 25-29.
毕京学, 汪云甲, 曹鸿基, 等. 一种基于全向指纹库的 WiFi 室内定位方法[J]. 测绘通报, 2018(2): 25-29.
- [18] Lü R, Wang J W, Shao X. Study on gauss curve fitting location algorithm based on bilinear interpolation[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(3): 83-85.
吕瑞, 王军伟, 邵响. 基于双线性插值的高斯曲面拟合定位算法研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(3): 83-85.