

TOA/RSS 混合信息室内可见光定位方法

曹阳, 党宇超*, 彭小峰, 李岳

重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054

摘要 为提高室内定位精度, 提出一种基于混合到达时间/接收信号强度(TOA/RSS)信息的定位方法。针对室内可见光定位中存在的多径效应造成的定位非线性误差, 引入前置无迹卡尔曼滤波的粒子滤波算法, 将 TOA 信息与 RSS 信息相融合, 达到修正非线性误差的目的。然后综合考虑接收端惯性传感参数, 对接收端进行运动分析, 提升估算坐标的精度。在长宽均为 5 m、高度为 3 m 的室内进行定位仿真, 在 12 W 发光二极管(LED)发射功率下, 所提方法获得了平均定位误差为 2.02 cm 的定位精度。仿真结果证明, 所提定位方法的定位性能总体优于指纹定位方法和三边定位的 RSS 定位方法, 具有较强的鲁棒性和较低定位延迟。

关键词 光通信; 可见光定位; 非线性误差; 到达时间; 信号接收强度; 信息融合; 惯性传感

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0106005

1 引言

近年来, 可见光通信技术发展迅速^[1-2]。因具有成本低、安全性高、无电磁干扰等优点, 基于可见光通信的室内定位技术相较于传统无线局域网(WLAN)、超宽带(UWB)更具优势^[3-4]。定位方法是实现定位的关键所在, 因此基于到达时间差(TDOA)、到达时间(TOA)、到达角度(AOA)、接收信号强度(RSS)等经典的室内无线定位算法^[5-8]得以改进与应用。然而相较于已发展成熟的 WLAN、UWB 等无线通信技术, 可见光通信无论在 TOA 定位还是 RSS 定位中均没有较为成熟的应用方案^[9-10], 在室内可见光定位中, 这也使得单一的定位信息并不能很好地满足对目标进行定位跟踪的性能要求。

Lain 等^[11]在多对发光二极管(LED)发射机下使用图像传感器(IS)成像定位技术, 其定位误差约为 3 cm, 但基于 IS 的成像型定位方法成本较高。Konings 等^[12]提出一种基于室内现有照明设备的可见光定位技术, 该技术将定位目标移动产生的环境光变化信息作为定位测量信息, 在多种典型室内环境中进行测试, 分别实现 0.68, 1.20, 0.84 m 的定位误差,

定位误差较大。Simon 等^[13]利用 LED 信标确定目标位置, 使用基于几何与共识的技术进行定位, 克服了零散异常值引起不准确测量的问题。该技术在模拟测试中的定位精度处于低分米范围, 定位误差仍然较大。Alam 等^[14]开发并测试基于校准传播模型的新型可见光定位系统, 该系统使用接收信号功率作为定位测量信息。实验结果表明, 该定位方法的离线校准所需的工作量减少, 并实现 90% 的误差在 5.2 cm 上下浮动, 但对接收功率测量的精准度有严格要求。Keskin 等^[15]针对可见光定位(VLP)系统提出了一种基于 TOA/RSS 混合的距离估计方法, 并对该种距离估计方法与 TOA 距离估计和 RSS 距离估计的克拉美罗界进行了比较和分析。文献[16]研究了非视距环境下的 VLP 系统, 并假定多径时延为伽马分布, 分析了伽马分布的形状参数和比例参数对定位系统性能的影响, 仿真结果表明, 理论定位精度为厘米级。文献[17]研究了基于 TOA 的 VLP 系统, 通过推导强度调制加窗正弦信号的克拉美罗界, 计算了估计精度的理论极限。研究表明, 在发射器和接收器完全同步的情况下, 该系统可在理论上实现厘米级的定位误差。文献[18]提出一种基于 TDOA 和 TOA 的三维无

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-08-10; 录用日期: 2020-08-24

基金项目: 重庆市教委科学技术项目(KJQN201901125)、重庆市科委社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA40019)、重庆市基础与前沿研究计划(cstc2019jcy-msxmX0233)

*E-mail: 342873133@qq.com

源定位方法,该方法弥补了传统 TDOA 算法定位模糊的缺点,仿真结果表明,定位精度较经典 TDOA 定位算法有一定提升。文献[19]提出一种基于 RSS/AOA 信息混合的定位算法,该算法采用广义信任域子问题算法求解出待定位坐标,其仿真获得 8.7 cm 的平均定位误差。文献[20]提出一种基于多 LED 的可见光室内定位方法,该方法构造协作定位目标估计函数,通过最小二乘法获取估算坐标,其平均定位误差为 7.4 cm。文献[21]提出一种基于联合 TDOA 和 AOA 的混合定位方法,在理想反射环境和高斯噪声模型下,该算法实现室内平均定位误差为 1.4 cm。文献[21]中的混合定位方法的性能明显优于文献[20]中的单一 TDOA 定位算法。在上述研究中,Lain 等^[11-14]提出的方法受限于定位信息的单一,导致设备成本高、精度低。而在上述基于混合定位信息的定位方法研究中,几位作者最终的仿真结果也表明,相较于单一定位信息的定位方法,混合信息定位方法的定位精度的确有明显提升,且更贴近实际^[18-19,21],但并未综合考虑室内可见光定位中存在的多种误差来源,且大部分研究中的定位精度仍有提升空间。

本文提出一种利用 TOA/RSS 信息融合的定位方法。在室内可见光复杂链路环境下,综合考虑多径效应时延误差、信号功率测量误差、传感器测量误差、坐标估算中出现的随机误差,使用前置无迹卡尔曼滤波的粒子滤波算法对收发双端间距的测量误差进行消除,并使用最小二乘法对坐标位置进行求解,最后结合接收端的惯性传感数据对结果进行运动分析,进而提升定位坐标的估算精度。仿真结果表明,所提方法有效地解决了收发端间距测量中存在的非线性误差,在较低定位延迟的前提下,提高了室内定位精度和定位系统的鲁棒性。

2 定位原理

2.1 可见光通信系统模型

图 1 为室内定位系统示意图,4 盏 LED 作为信源被安装在室内天花板上,分别被标记为 $T_{x_i} = (x_i, y_i, z_i) (T_{x_i} \in \mathbf{R}^3, i=1, 2, 3, 4)$ 。信宿随定位目标在室内任意位置移动,标记为 $P = (x, y, z)$,其中 z 是接收机顶端距离室内地面的高度。

室内可见光通信是准静态信道^[22]。室内可见光通信的脉冲响应由发射机和接收机之间的直接视距(LOS)链路 $h_{\text{LOS}}(t)$ 和发射机到室内反射面、再从室内墙壁反射面到接收机之间的多阶漫反射链路 $h_{\text{NLOS}}(t)$ 组成^[22]:

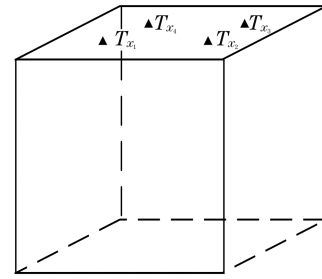


图 1 室内定位系统示意图

Fig. 1 Schematic of indoor positioning system

$$h(t) = h_{\text{LOS}}(t) + h_{\text{NLOS}}(t). \quad (1)$$

LOS 链路的脉冲响应表示为

$$h_{\text{LOS}}(t) = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m \phi \times T_s(\psi) \cos \psi \times \delta\left(t - \frac{d}{c}\right), \quad (2)$$

式中: d 为发射端和接收端的直线间距; A_r 为光电探测器的有效面积; m 为朗伯指数; ϕ 为辐射角度; $T_s(\psi)$ 为光滤波器增益; ψ 为入射角; t 为当前执行的时刻; c 为光速; δ 为单位冲激函数符号。NLOS 漫反射链路的第 k 次反射脉冲响应表示为

$$h_{\text{NLOS}}^k(t) = \frac{m+1}{2\pi} \sum_{j=1}^K \rho_j \cos^m \phi_j \times \frac{\cos \psi}{d_{s_j}^2} \text{rect}\left(\frac{2\psi}{\pi}\right) h_{\text{NLOS}}^{<k-1>} \delta_A, \quad (3)$$

式中: j 为微元化后的若干墙壁反射面编号; K 为多阶次反射中发生的总反射次数; δ_A 为微元化后的每一个墙壁反射面的有效面积; d_{s_j} 为发射端到编号为 j 的反射面的直线间距。其中,经过一次反射的漫反射链路脉冲响应可表示为

$$h_{\text{NLOS}}^1 = \frac{m+1}{2\pi} \sum_{j=1}^{\epsilon} \frac{\rho_j \delta_A A_r \cos^m \phi_{s_j} \cos \psi_{s_j} \cos \psi_{R_j}}{d_{s_j}^2 d_{R_j}^2} \delta\left(t - \frac{d_{s_j} + d_{R_j}}{c}\right), \quad (4)$$

式中: ϵ 为微元化后墙壁反射面的总数; ρ_j 为编号为 j 的墙壁反射面的反射因子; d_{R_j} 为接收器和编号为 j 的墙壁反射面的直线间距。其余阶次的漫反射链路脉冲响应可根据一次反射的漫反射链路脉冲响应进行推导。根据 Kahn 等^[23]的研究,本文仅考虑最高四次反射。

基于 TOA/RSS 混合信息的定位方法主要分为三个阶段,即信源信宿距离测量阶段、坐标估算阶段及运动分析阶段。在收发机间距测量阶段,使用前置无迹卡尔曼滤波的粒子滤波算法提升收发端间距估算的准确度。使用最小二乘法计算坐标,结合接收机

的惯性传感数据,进一步提升坐标估算的精度。

2.2 距离测量阶段

在 TOA 测距过程中,信源发射信号,信号经信宿接收后,计算时间戳获取信号传输时间 $\tau_{i,R}$,结合光速 c ,得出收发端间距,表达式为

$$d_i = c \times \tau_{i,R}, \quad (5)$$

式中: i 为发射端的编号。信号传输时间 $\tau_{i,R}$ 由两部分组成:

$$\tau_{i,R} = \tau_{i,R-LOS} + \tau_{i,R-NLOS}, \quad (6)$$

式中: $\tau_{i,R-LOS}$ 为在 LOS 链路下的信号传输时间; $\tau_{i,R-NLOS}$ 为 NLOS 链路引起的附加时延误差^[24-25]。采用文献[26]中提出的改进 NLOS 指数分布模型,该模型能更好地反映 NLOS 误差特性。

基于 RSS 的室内可见光测距方法是一种通过测量接收端功率获取信源信宿直接间距的方法。根据室内可见光信道模型,在长宽为 5 m、高为 3 m 的室内环境中,多次测算室内各点的接收信号功率分布,对多次测算的结果进行加权平均,并与室内各信源与信宿的直接间距建立一一对应关系,最终使用序列表映射关系曲线拟合出光通信接收信号强度经验公式^[27],表达式为

$$d_{dis} = (2.173 \times P_{rec})^{-0.2743} + n, \quad (7)$$

式中: d_{dis} 为信源与信宿的直接间距; P_{rec} 为信宿端接收的信号功率; n 为信号功率测量随机误差,服从

均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。在观测过程中,随机噪声来源于信号功率测量时产生的随机误差 n 。综合上述,距离测量阶段的状态方程和观测方程分别描述为

$$d_i = c \times (\tau_{i,R-LOS} + \tau_{i,R-NLOS}), \quad (8)$$

$$d_{dis} = (2.173 \times P_{rec})^{-0.2743} + n, \quad n \sim N(0, \sigma^2). \quad (9)$$

室内可见光通信系统存在典型的无线通信多径时延效应,这也是室内可见光定位一直存在非线性误差的主要原因。常规的非线性最优估计滤波有扩展卡尔曼滤波(EKF)、无迹卡尔曼滤波(UKF)、粒子滤波等。EKF 一旦出现线性化假设不成立的情况,就会导致滤波器性能下降和估计结果的发散,并且 EKF 和 UKF 均受高斯噪声模型限制。而粒子滤波不受噪声模型与系统模型的限制,且估计精度优于 EKF 和 UKF。但在粒子重采样过程中,为避免粒子退化导致估算结果精度降低的现象,采用无迹卡尔曼滤波计算粒子的均值和方差,指导粒子采样过程。

信宿端移动频率远远低于 TOA 和 RSS 的测距频率,在信宿端移动过程中,定位算法将 RSS 作为观测量 \mathbf{Z} ,将 TOA 作为状态量 \mathbf{X} ,使用观测量的概率密度分布近似系统后验概率密度,从而实现权重的更新,并对状态量完成权重筛选,最终实现测距结果的更新。

具体算法流程如图 2 所示。

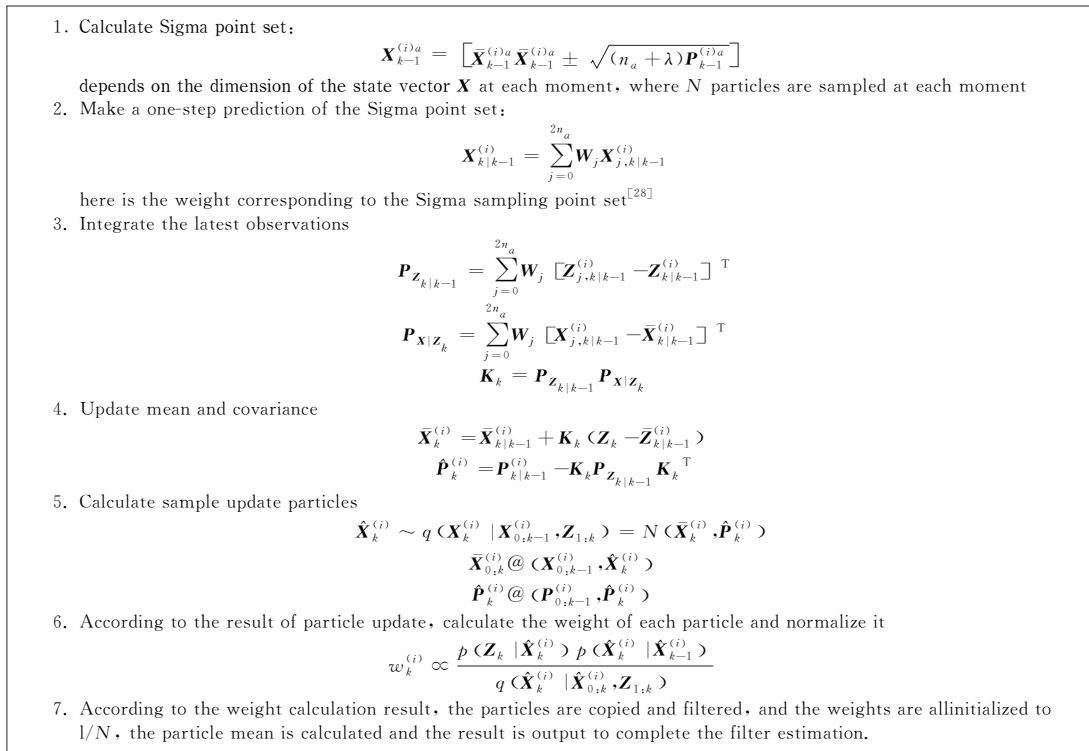


图 2 前置 UKF 的粒子滤波算法流程

Fig. 2 Flowchart of pre-UKF particle filter algorithm

2.3 坐标估算阶段

获取信源和信宿直线间距后,常采用三边定位、双曲线定位等算法对坐标进行估算,这里选用最小二乘法^[27]。假设信宿高度固定,源与宿之间的高程差固定,故高度数据在计算过程中某种程度上是可以忽略的。

在仿真中,信源和信宿的高度均为固定数值,则可在真实间距的计算过程中省略对二者高度差的求解过程,只需对信源与信宿在二维平面投影的相对间距进行求解,并对固定高度差进行统一的计算处理,节省计算资源。求解相对间距的表达式为

$$d_{\text{dis},i} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (10)$$

式中:\$(x_i, y_i)\$为编号为 \$i\$ 的发射机的 \$XOY\$ 平面坐标。定义矩阵 \$\mathbf{H}\$、\$\mathbf{Y}\$ 和 \$\mathbf{X}\$,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) \\ 2(x_4 - x_2) & 2(y_4 - y_2) \\ 2(x_4 - x_3) & 2(y_4 - y_3) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} d_{\text{dis},1}^2 - d_{\text{dis},4}^2 - x_1^2 - y_1^2 + x_4^2 + y_4^2 \\ d_{\text{dis},2}^2 - d_{\text{dis},4}^2 - x_2^2 - y_2^2 + x_4^2 + y_4^2 \\ d_{\text{dis},3}^2 - d_{\text{dis},4}^2 - x_3^2 - y_3^2 + x_4^2 + y_4^2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

确认矩阵 \$\mathbf{H}\$ 和 \$\mathbf{Y}\$ 后,即可得出接收机坐标:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y}. \quad (14)$$

2.4 运动分析阶段

为进一步提升定位精度,添加信宿端惯性传感数据作为坐标估算的约束。

首先进行说明:定位目标的移动过程对定位测量过程来说是极低频过程,可将定位目标的运动视为间歇性运动,且在每一次定位测量时,可定义定位目标的运动为从静止状态开始的无初速度的匀加速过程。

在运动分析过程中出现的参数与上述文中参数并不相同,在公式后会给出其具体物理意义。故可将每一个测量时刻下的信宿端的运动表示为

$$x_t = x_{t-1} + \frac{1}{2} a_x \Delta t^2, \quad (15)$$

$$y_t = y_{t-1} + \frac{1}{2} a_y \Delta t^2, \quad (16)$$

式中: \$\Delta t\$ 为时间间隔, \$x_t\$ 和 \$y_t\$ 表示 \$t\$ 时刻信宿端坐标; \$a_x\$ 和 \$a_y\$ 表示 \$x\$ 和 \$y\$ 的轴向加速度。将信宿端

的惯性传感数据与坐标估算结果相互融合,提升定位精度。根据上述说明,可得出信宿在任意时刻沿 \$x\$、\$y\$ 轴向的加速度向量均为 \$(0, 0)\$。对陀螺仪传感输出的 \$x\$、\$y\$ 轴加速度数据与上述说明得出的加速度向量作差,即可得出位移测量过程的噪声矩阵 \$\mathbf{Q}\$

为 \$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}\$; 对于观测噪声,可根据传感特性设定其具体数值,此处采用型号为 MPU6050 的惯性传感作为参考,将其数值设为 0.1,表示为 \$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}\$。

具体过程如下:对信宿在当前时刻 \$t\$ 的坐标数值进行观测,

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_{t-1} + \mathbf{Q}. \quad (18)$$

式中: \$\mathbf{P}_t\$ 为 \$t\$ 时刻的协方差矩阵。负责更新信任权重和协方差的公式分别为

$$\mathbf{G}_t = \mathbf{P}_t \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix}^T \cdot \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_t \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix}^T + \mathbf{R} \right)^{-1}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_t' \\ y_t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \end{bmatrix} + \mathbf{G}_t \left(\begin{bmatrix} x_{\text{TOA/RSS}} \\ y_{\text{TOA/RSS}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix} \right), \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_t' = \left(\mathbf{I} - \mathbf{G}_t \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} a_y \Delta t^2 \end{bmatrix} \right) \mathbf{P}_t, \quad (21)$$

式中: \$\mathbf{G}_t\$ 为 \$t\$ 时刻的卡尔曼增益矩阵。(20)式用来获取运动分析的结果。(21)式的意义在于,根据权重来分配运动分析观测值和最小二乘估算值的信任占比,从而实现定位精度的提升。

3 仿真结果及分析

为验证所提定位方法的有效性和鲁棒性,设计了相关仿真,在长宽均为 5 m、高为 3 m 的模拟室内

环境中,设定 4 个 LED 信源三轴坐标分别为 $Tx_1 = (1, 1, 3)$, $Tx_2 = (1, 4, 3)$, $Tx_3 = (4, 1, 3)$, $Tx_4 = (4, 4, 3)$ 。其余仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Half power point half angle $\varphi_{\frac{1}{2}} / (^\circ)$	50
Lambert index m	1.5684
LED transmit power/W	12
Optical filter gain $T_s(\psi)$	1
Refractive index	1.5
Receiving field of view/ $^\circ$	70
Indoor space size/m	$5 \times 5 \times 3$
Vertical distance between light source and receiving plane/m	2.15
Wall reflectance factor ρ_j	0.3

在仿真中,依次将接收机放置在均匀选取的 625 个定位测试点处,然后执行定位方法获取估算坐标数值。定义定位误差为 $E_{err} = \sqrt{(x_{true} - x_{test})^2 + (y_{true} - y_{test})^2}$,其中 (x_{true}, y_{true}) 为定位测试点的真实坐标, (x_{test}, y_{test}) 为定位方法的估算结果。

图 3 为室内定位误差分布情况,呈中心凹陷、边缘上升的特征,但总体定位误差波动范围为 1.6~3.2 cm,仅有小范围起伏,证明所提定位方法有效且定位效果良好。

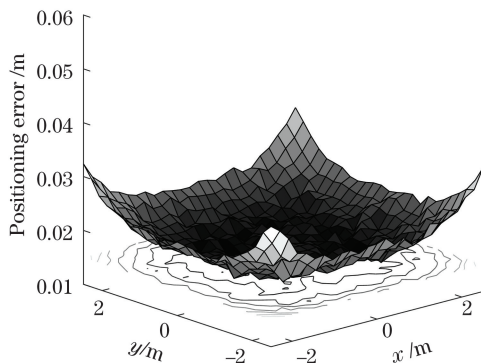


图 3 LED 发射功率为 12 W 的室内定位误差

Fig. 3 Indoor positioning error under emission power of LED at 12 W

为证明所提定位方法在定位精度方面确实强于其他定位方法,在仿真中,对所提方法、基于三边定位的 RSS 定位方法^[29]、传统指纹定位方法^[30]进行对比,并保持仿真参数一致。图 4 为 3 种定位方法

的概率累积分布。经计算,所提定位方法的定位误差小于 3 cm 的概率为 98.1%,平均定位误差为 2.02 cm,最大定位误差为 3.39 cm;传统指纹定位方法的定位误差小于 3 cm 的概率为 40.8%,平均定位误差为 3.11 cm,最大定位误差为 6.12 cm;基于三边定位的 RSS 定位方法的定位误差小于 3 cm 的概率为 1.6%,平均定位误差为 5.61 cm,最大定位误差为 9.67 cm。与传统指纹定位方法相比,所提定位方法的最大定位误差减小了 44.61%,平均定位误差减小了 35.04%。与基于三边定位的 RSS 定位方法相比,所提定位方法的最大定位误差减小了 64.94%,平均定位误差减小了 63.99%。因此可证明,所提定位方法的定位精度总体优于另外两种定位方法。

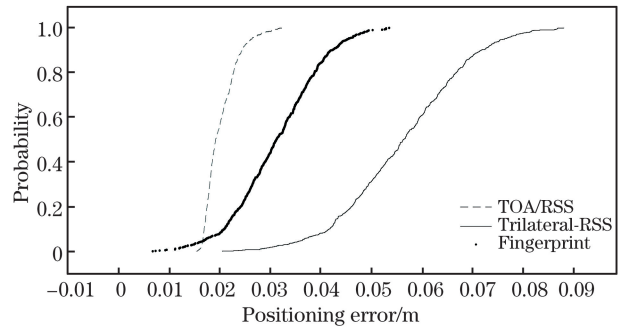


图 4 三种定位方法的定位误差累积概率分布

Fig. 4 Cumulative probability distribution of positioning errors of three positioning methods

对所提定位方法的鲁棒性进行评估,在仿真中,分别将 LED 发射功率设定为 12, 6, 3 W,从而模拟接收信噪比整体降低的情形,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着 LED 发射功率的降低,概率分布累积曲线整体向右偏移,定位误差逐渐升高,且波动幅度有小幅上升,这是因为随着 LED 发射功率减弱,测距中非线性误差上升。在 12 W 发射功率下,定位误差小于 3 cm 的概率为 98.1%,平均定位误差为 2.02 cm,最大定位误差为 3.39 cm;在 6 W 发射功率下,定位误差小于 3 cm 的概率为 91.2%,平均定位误差为 2.52 cm,最大定位误差为 3.77 cm;在 3 W 发射功率下,定位误差小于 3 cm 的概率为 42.4%,平均定位误差为 3.18 cm,最大定位误差为 5.08 cm。当发射功率减弱到 6 W 时,平均定位误差提升了 24.7%,最大定位误差提升了 11.2%。当发射功率减弱到 3 W 时,平均定位误差提升了 57.4%,最大定位误差提升了 49.8%。可看出,6 W 发射功率下定位精度并未明显减弱,但在 3 W 发射

功率下,定位性能略微减弱,且可从图 5 得知,少量的定位测试点出现较大定位误差,这是由于发射功率降低后,室内光照强度整体降低,而且室内边缘位置本就是光照强度较弱的地方,这使 3 W 发射功率下定位误差的极差达 2.77 cm。传统指纹定位方法的最大定位误差和平均定位误差分别是 6.12 cm 和 3.11 cm,基于三边定位的 RSS 定位方法的最大定位误差和平均定位误差分别是 9.67 cm 和 5.61 cm。所提定位方法在 3 W 发射功率下的定位性能与传统指纹定位方法在 12 W 发射功率下的定位性能相比,并无较大差距,且所提定位方法还优于 12 W 发射功率下的基于三边定位的 RSS 定位方法。结果证明,所提定位方法具有较为良好的鲁棒性。

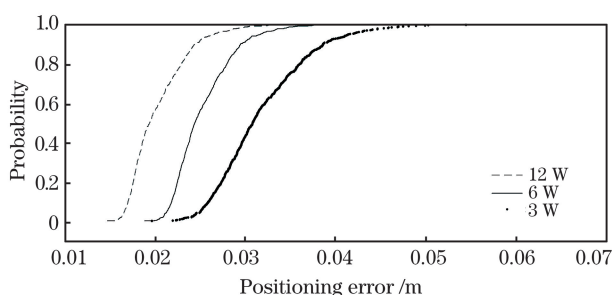


图 5 三种发射功率下定位误差累积概率分布

Fig. 5 Cumulative probability distribution of positioning errors under three types of transmission power

最后,为证明所提定位方法定位精度的提升并未牺牲过量时间资源,分别对 3 种定位方法进行 30 次定位过程的耗时记录,如图 6 所示。从图 6 可看出:耗时最短的是基于三边定位的 RSS 定位方法,而所提定位方法与指纹定位方法的耗时均在 1 s 左右波动。但明显,指纹定位方法因指纹采集信息的差异,定位耗时起伏较大;而所提定位方法的最低耗时虽然与指纹定位方法相差无几,但并未有很大起伏,整体耗时呈现出平稳的特性,且相较于基于三边

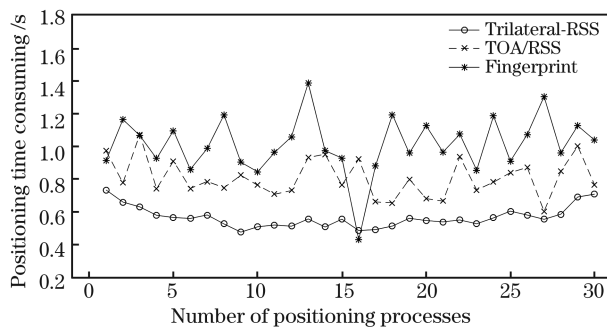


图 6 三种定位方法的定位耗时

Fig. 6 Positioning time-consuming of three positioning methods

定位的 RSS 定位方法,定位耗时并未超出太多。结果证明,所提定位方法仅仅牺牲少量时间资源即可实现更良好的定位效果。

4 结 论

针对室内可见光定位中存在的非线性误差,提出一种基于混合 TOA/RSS 信息的室内可见光定位方法。采用前置无迹卡尔曼滤波的粒子滤波算法提升距离测量精度,使用最小二乘法估算坐标数值,再结合接收端惯性传感数据对接收端进行运动分析,提升坐标估计精度。仿真结果表明,在室内空间中,所提定位方法有效地减小了定位误差,对室内可见光定位非线性测量误差的消除确实有效。同时还分析了不同方法在不同发射功率下的定位精度变化情况和定位耗时情况,结果证明,所提定位方法可在保证鲁棒性和低延迟的情况下具有节能与高效特点。

参 考 文 献

- [1] Chen Q R, Zhang T. Light source layout optimization and performance analysis of indoor visible light communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0406003.
陈泉润, 张涛. 室内可见光通信系统的光源布局优化及性能分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0406003.
- [2] Jin Y C, Chen X B, Mao X R, et al. Influence of modulation degree on performances of visible light communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0506001.
靳永超, 陈雄斌, 毛旭瑞, 等. 调制度对可见光通信系统性能的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0506001.
- [3] Panta K, Armstrong J. Indoor localisation using white LEDs [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(4): 228-230.
- [4] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, et al. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(7): 637-640.
- [5] 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.
- [6] Yassin A, Nasser Y, Awad M, et al. Recent advances in indoor localization: a survey on theoretical approaches and applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(2): 1327-1346.

- [7] Vatansever Z, Brandt-Pearce M. Visible light positioning with diffusing lamps using an extended Kalman filter [C] // 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 19-22, 2017, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [8] Wang P F, Guan W P, Wen S S, et al. High precision indoor visible three-dimensional positioning system based on immune algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1006007.
王鹏飞, 关伟鹏, 文尚胜, 等. 基于免疫算法的高精度室内可见光三维定位系统[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1006007.
- [9] Chen X C, Chu S, Li F, et al. Hybrid TOA and IMU indoor localization system by various algorithms[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(8): 2281-2294.
- [10] Li F M, Zhang T, Liu K, et al. An indoor positioning method based on range measuring and location fingerprinting [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(2): 339-350.
李方敏, 张韬, 刘凯, 等. 基于距离测量和位置指纹的室内定位方法研究[J]. 计算机学报, 2019, 42(2): 339-350.
- [11] Lain J K, Chen L C, Lin S C. Indoor localization using K-pairwise light emitting diode image-sensor-based visible light positioning [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 7909009.
- [12] Konings D, Faulkner N, Alam F, et al. FieldLight: device-free indoor human localization using passive visible light positioning and artificial potential fields [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(2): 1054-1066.
- [13] Simon G, Zachar G, Vakulya G. Lookup: robust and accurate indoor localization using visible light communication [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(9): 2337-2348.
- [14] Alam F, Parr B, Mander S. Visible light positioning based on calibrated propagation model [J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(2): 1-4.
- [15] Keskin M F, Gezici S. Comparative theoretical analysis of distance estimation in visible light positioning systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(3): 854-865.
- [16] 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.
- [17] Wang T Q, Sekercioglu Y A, Neild A, et al. Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(20): 3302-3308.
- [18] Lei W Y, Chen B X, Yang M L, et al. Passive 3D target location method based on TOA and TDOA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5): 816-823.
雷文英, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 基于 TOA 和 TDOA 的三维无源目标定位方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 816-823.
- [19] 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.
- [20] Wang X D, Wu N, Hu Q Q. Indoor visible light positioning based on multiple illuminated areas cooperation [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(4): 388-395.
王旭东, 吴楠, 胡晴晴. 多照明区域协作的室内可见光定位[J]. 光电子·激光, 2017, 28(4): 388-395.
- [21] Wang X D, Dong W J, Wu N. Hybrid TDOA/AOA algorithm based high accuracy indoor visible light positioning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(10): 2371-2377.
王旭东, 董文杰, 吴楠. 基于 TDOA/AOA 混合的高精度室内可见光定位算法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10): 2371-2377.
- [22] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [23] Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [24] Tian X H, Liao G S. An effective TOA-based location method for mitigating the influence of the NLOS propagation [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1429-1432.
田孝华, 廖桂生. 一种有效减小非视距传播影响的 TOA 定位方法[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1429-1432.
- [25] Xie H, Wei N. A simple NLOS error mitigation algorithm based on TDOA mobile location [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(1): 114-118.
谢红, 蔚娜. 基于 TDOA 的一种简化的非视距误差抑制算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(1): 114-118.
- [26] Xu T Y. TOA location algorithm in wireless sensor

- network under NLOS environment [J]. Computer Engineering, 2013, 39(12): 93-96.
- 徐彤阳. NLOS 环境下无线传感器网络 TOA 定位算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 93-96.
- [27] Ye Z W, Ye H Y, Nie X Y, et al. High-accuracy visible light positioning method based on received signal strength indicator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(3): 0306002.
- 叶子蔚, 叶会英, 聂翔宇, 等. 基于接收信号强度检测的高精度可见光定位方法[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0306002.
- [28] Huang X P, Wang Y. Principle and application of Kalman filter: MATLAB simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015: 103-106.
- 黄小平, 王岩. 卡尔曼滤波原理及应用: MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 103-106.
- [29] Wu N, Wang X D, Hu Q Q, et al. Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3): 727-732.
- 吴楠, 王旭东, 胡晴晴, 等. 基于多 LED 的高精度室内可见光定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 727-732.
- [30] Cao Y P, Li X J, Hu Y Y. Visible light fingerprint-based high-accuracy indoor positioning method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 160601.
- 曹燕平, 李晓记, 胡云云. 基于可见光指纹的室内高精度定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 160601.

Indoor Visible Light Localization Method Using TOA/RSS Hybrid Information

Cao Yang, Dang Yuchao*, Peng Xiaofeng, Li Yue

School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract

Objective Compared with wireless local area network(WLAN)/ultra wide band(UWB) and other electromagnetic wave wireless communication technologies, indoor visible light communication technology has the advantages of low cost and an advantageous edge. Research on the indoor localization method based on received signal strength(RSS), time of arrival(TOA), time difference of arrival(TDOA), angle of arrival(AOA), and other classical localization algorithms is the key to realizing localization technology. However, compared with traditional electromagnetic wave wireless communication technology, in the visible light communication environment, the localization methods based on most localization algorithms are not mature, and the improvement in the localization performance is often limited by the singular localization information. In this paper, TOA and RSS data are combined to reduce the effect of nonlinear errors on the localization accuracy in indoor visible light communication environments. Combined with the inertial sensing data at the receiving end, the robustness and low localization delay of the proposed localization method are guaranteed. Additionally, the localization accuracy of the system is further improved.

Methods Four sources are evenly distributed on the ceiling to simulate the indoor environment with a length and a width of 5 m and a height of 3 m. A channel model of indoor visible light communication is established, which has a direct line of the sight link and a multiple order reflection indirect line of the sight link. Then, the distribution of indoor received optical power is obtained, and the empirical formula of signal strength and distance is established using the mapping relationship between the received optical power and linear distance, between the source and receiver. Moreover, the time stamp record is used to measure the signal transmission time at the receiver. The particle filter based on an unscented Kalman filter is used to combine TOA and RSS data to improve the accuracy of distance estimation. Furthermore, the least-square method is used to estimate the localization coordinates. Finally, based on the inertial sensing data of the receiver, the movement trend is analyzed, and high-precision localization results are obtained.

Results and Discussions Based on the channel model, a localization simulation is conducted. A total of 625 test points are selected in the room, and the localization results are obtained by coordinate estimation. The indoor localization error fluctuates from 1.6 to 3.2 cm, and the overall localization error is low lying with a small center and rising edge, exhibiting only a small fluctuation range. First, the simulation parameters are fixed, and the localization performance of the proposed localization method, RSS method based on trilateral localization, and traditional

fingerprint localization method are compared. For the proposed localization method, the probability of the localization error at less than 3 cm is 98.1% and the average and maximum localization errors are 2.02 and 3.39 cm, respectively. For the traditional fingerprint localization method, the probability of the localization error at less than 3 cm is 40.8% and the average and maximum localization errors are 3.11 and 6.12 cm, respectively. For the RSS method based on trilateral localization, the probability of the localization error at less than 3 cm is 1.6% and the average and maximum localization errors are 5.61 and 9.67 cm, respectively. Second, the localization performance of 12-, 6-, and 3-W LEDs is compared. Under 12-W transmitting power, the probability of the localization error at less than 3 cm is 98.1% and the average and maximum localization errors are 2.02 and 3.39 cm, respectively. Under 6-W transmitting power, the probability of the localization error at less than 3 cm is 91.2% and the average and maximum localization errors are 2.52 and 3.77 cm, respectively. Under 3-W transmitting power, the probability of the localization error at less than 3 cm is 42.4% and the average and maximum localization errors are 3.18 and 5.08 cm, respectively. Finally, the localization time of the proposed localization method, RSS method based on trilateral localization, and traditional fingerprint localization method are compared. For this, 30 positioning processes of the three localization methods are selected. The RSS method based on trilateral localization exhibits the shortest localization time, while the localization time of the proposed localization method and fingerprint localization method fluctuates by approximately 1 s.

Conclusions The simulation results are listed below:

1) Under fixed parameters, the maximum localization error of the proposed method is 44.61% less than that of the traditional fingerprint localization method, and the average localization error is reduced by 35.04%. Compared with the RSS method based on trilateral localization, the maximum and average localization errors of the proposed method are reduced by 64.94% and 63.99%, respectively. Therefore, the localization accuracy of the proposed localization algorithm is better than that of the other two localization methods.

2) The localization performance clearly decreases with a decrease in the LED transmitting power. However, no significant difference is observed between the performance of the proposed localization method at 3-W transmission power and that of fingerprint localization method at 12-W transmission power. Moreover, the proposed localization method shows better performance than the RSS method under 12-W transmission power, thus demonstrating the robustness of the proposed localization method.

3) The localization time of the proposed localization method is stable. Although it is nearly the same as that of the traditional fingerprint localization method, the overall trend is stable and it is only slightly longer than that of the RSS method based on trilateral localization. Thus, the proposed localization method can achieve an improved localization effect only by sacrificing a small amount of time resources.

In conclusion, the overall localization effect of the proposed method is good, and the localization error do not fluctuate significantly, thereby ensuring the robustness of the proposed localization method as well as low localization delay and good localization performance.

Key words optical communications; visible light location; nonlinear error; time of arrival; received signal strength; information fusion; inertial sensing

OCIS codes 060.2605; 060.4510