

基于 LED 光源的室内高精度成像定位新方法

侯文佐¹ 王大鸣¹ 杨 阳²

¹解放军信息工程大学信息工程学院, 河南 郑州 450002

²中国人民解放军第一五三中心医院, 河南 郑州 450002

摘要 提出了一种依托智能移动终端实现可见光室内定位的方法,该方法通过终端成像组件获取发光二极管光源标签和图像信息,根据光源间的成像位置关系和图像焦距,利用几何光学成像原理计算终端位置坐标。通过可见光成像定位系统模型和几何光学成像原理建立非线性系统模型,使用改进无损卡尔曼滤波算法完成最终的位置解算,理论仿真和实验系统均验证了所提方法的可行性。数据显示该方法能够实现分米级的高精度室内定位。

关键词 光通信; 可见光; 精确定位; 成像; 无损卡尔曼滤波

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060606

New Method of Indoor High Accuracy Imaging Positioning Based on LED Light Source

Hou Wenzuo¹ Wang Daming¹ Yang Yang²

¹School of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China

²PLA 153rd Central Hospital, Zhengzhou, Henan 450002, China

Abstract A kind of visible indoor location method based on intelligent mobile terminal is put forward. The method can get the light emitting diode light source label and image information through the terminal imaging component. According to the imaging position relationships between light sources and the focal length, geometric optical imaging principle is used to calculate the terminal position coordinates. The nonlinear system is set up by visible light imaging positioning system model and geometric optics imaging principle. The calculation of final position is completed using unscented Kalman filter algorithm. The theoretical simulation and experimental system verify the feasibility of the proposed method. The data shows that the proposed method can realize decimeter-level precision indoor positioning.

Key words optical communications; visible light; accurate positioning; imaging; unscented Kalman filter

OCIS codes 060.4510; 120.6650; 010.7295; 100.3008

1 引言

在信息化的时代,作为与人类生产生活密切相关的基础信息,室内位置信息的获取成为现代生活中日益迫切的需求。面对这一现状,研究人员开发了很多室内定位技术,例如蓝牙、WiFi等^[1]。苹果公司在2013年提出了基于蓝牙4.0的iBeacons蓝牙室内定位技术,通过蓝牙设备感应布设于室内场所的蓝牙基站发出的Beacon信号,定位范围可以从几毫米到50 m。蓝牙基站布设简单,功耗低,但定位精度完全依赖于基站的布设密度,使用场所受到限制。WiFi室内定位技术通过检测无线接入点(AP)发射功率信号强度,利用测距原理实现室内定位,定位精度可达1~10 m。基于无线通信布设的WiFi热点已初具规模,只需要更新热点的物理地址和真实地理地址的映射数据库即可满足定位的基本需求,但是需要对现有热点进行整体规划。

收稿日期: 2016-01-24; **收到修改稿日期:** 2016-02-27; **网络出版日期:** 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61401513)

作者简介: 侯文佐(1984—),男,硕士研究生,主要从事可见光定位方面的研究。E-mail: wwawanwang@163.com

导师简介: 王大鸣(1971—),男,博士,教授,主要从事无线通信方面的研究。E-mail: 769696411@qq.com

WiFi 易受其他信号的影响,从而影响定位精度,并且对楼层判断的准确性不足。这些技术能满足人们对室内定位的基本需求,但是并不能兼顾定位精度和场景适用性。因此需要一种易于实现、定位精度高、能够广泛应用的室内定位技术。

近年来,可见光通信^[2]成为热门研究领域,将可见光通信应用到室内定位具有其他室内定位方式无法比拟的优势:1) 发光二极管(LED)的泛用性。室内光源作为建筑的基础设施不可或缺,随着 LED 灯的大面积推广,智慧照明城市是未来发展的必然趋势。加载了光通信定位功能的 LED 灯具能够提供泛在的室内定位导航服务,其布置的简易性和对场所的普适性都远远优于其他定位技术;2) 高精度定位。基于成像的 LED 定位技术,理论上可以实现毫米级定位,定位精度比现有定位技术提升了两个数量级;3) 兼顾照明,绿色环保、安全,适用于地下以及电磁敏感的区域。

由于可见光通信应用到室内定位的明显优势,国内外学者开展了众多基于可见光的室内定位研究^[3]。文献[4-5]中提出了一种利用 LED 阵列与双图像传感器实现定位功能的定位系统,该系统先获取图像传感器采集到的图像信息以及 LED 阵列发送的自身坐标信息,再利用几何关系计算出待测目标的位置坐标,精度可达 10 cm;但该定位方法对系统硬件要求较高,无法大范围推广。文献[6-7]提出了一种采用光探测器(PD)接收 LED 的标签信息实现定位功能的系统,通过接收端 PD 放大、滤波、解调等获取 LED 的身份(ID)信息(标签),实现定位;但该定位方法的精度取决于 LED 灯的照明半径以及相邻 LED 灯间的距离^[8],应用范围受到限制。

本文设计了一种依托智能移动终端实现可见光室内定位的新方法,通过理论仿真和实验系统验证了所提方法的可行性,并在讨论中提出了进一步提高定位精度的思路。

2 可见光成像定位方法

2.1 系统模型

论文设计了一种基于智能移动终端的室内定位方法,系统示意图如图 1 所示。

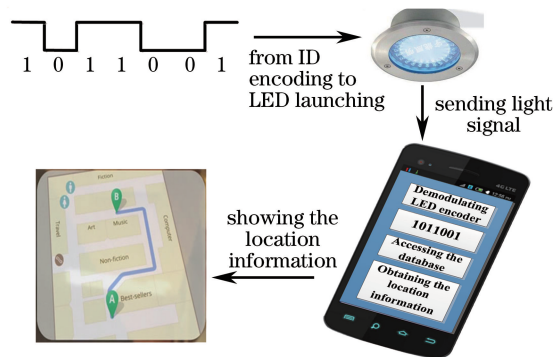


图 1 可见光成像定位系统示意图

Fig. 1 Sketch map of visible light imaging positioning system

从图 1 可以看出,要实现室内定位,需要将传输 LED 光源的 ID 信息(代表 LED 的位置信息)编译成一段调制信号,用脉宽调制的方法附加到 LED 灯具的驱动电流上,利用光源作为发射载体,通过移动终端的成像组件进行接收,并解析还原出发射的 ID 号码^[9],利用所获取的 ID 号码对应地图数据库中唯一确定的 LED 位置坐标,并通过对 LED 灯的几何光学成像计算得出待测点位置^[10],完成定位。

2.2 几何光学成像原理

将成像镜头等效为薄透镜,并令该薄透镜的孔径趋于零,则镜头的成像过程等同于小孔成像,在成像定位时,手机镜头对目标的成像变换过程可以表示为物空间中的物点在像空间中的投影,通常采用摄影测量学中的中心投影模型来表示^[11],如图 2 所示。图 2 中,物点 A、B、C、D 投射到平面 P 上,对应的投影点为 a、b、c、d,并会聚于投影中心 S, SaA、SbB、ScC、SdD 等为投影射线。

引入摄影测量中世界坐标系、像空间坐标系、物点、像点、坐标转换等概念,建立成像坐标转换模型^[11-12],如图 3 所示。设 LED 光源为物点,LED 光源所处空间为物空间(X_w, Y_w, Z_w, O_w),物点的空间位置所处的

坐标系为世界坐标系。LED 经镜头成像后在相纸上的位置点为像点,像点的空间位置所在坐标系为像空间坐标系,坐标原点取其投影中心 S ,坐标的正 Z 轴取摄影方向。通过点 S 作平行于像平面上 x 和 y 轴的轴线即为像空间坐标系的 X 和 Y 轴。在这个坐标系中每个像点的 Z 坐标都等于摄影焦距 f 。

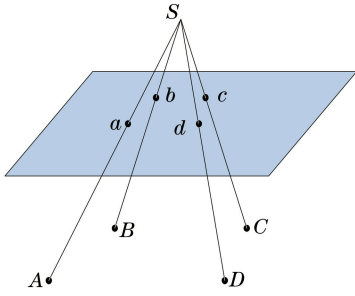


图 2 中心投影模型

Fig. 2 Central projection model

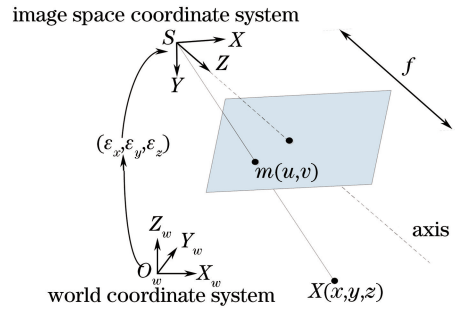


图 3 成像坐标转换模型

Fig. 3 Imaging coordinate transformation model

设像空间坐标系的投影中心 S 在物空间坐标系中的坐标为 (x_s, y_s, z_s) ,即相机位置坐标,物空间坐标系变换到与像空间坐标系姿态一致时绕三个坐标轴转过的角度分别用 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ 来表示。物点在物空间坐标系中的坐标为 (x, y, z) ,像面上的理想像点在像坐标系中为 (X, Y) ,单点成像的数学模型如下所示

$$\begin{cases} X = -f \frac{a_1(x - x_s) + b_1(y - y_s) + c_1(z - z_1)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_1)} \\ Y = -f \frac{a_2(x - x_s) + b_2(y - y_s) + c_2(z - z_1)}{a_3(x - x_s) + b_3(y - y_s) + c_3(z - z_1)} \end{cases}, \quad (1)$$

坐标旋转矩阵如下

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_x \cos \epsilon_z - \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z - \cos \epsilon_x \sin \epsilon_z - \sin \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z - \sin \epsilon_x \cos \epsilon_y & & \\ \cos \epsilon_x \sin \epsilon_z & \cos \epsilon_y \cos \epsilon_z & -\sin \epsilon_y \\ \sin \epsilon_x \cos \epsilon_z + \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \sin \epsilon_z - \sin \epsilon_x \sin \epsilon_z + \cos \epsilon_x \sin \epsilon_y \cos \epsilon_z \cos \epsilon_x \cos \epsilon_y & & \end{bmatrix}. \quad (2)$$

2.3 终端位置解算

首先移动终端通过接收 LED 光源的编码信息匹配地图数据库中光源的世界坐标信息 (x_j, y_j, z_j) , $j=1, \dots, N$, N 为灯的数量。终端对 LED 成像后,获得 LED 光源对应的像坐标为 (X_j, Y_j) , $j=1, \dots, N$ 。成像镜头的焦距 f 可通过获取图像计算获得。将已知参数 $X_j, Y_j, x_j, y_j, z_j, f$ 代入(1)式估算目标的位置信息 (x_s, y_s, z_s) 和姿态信息 $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$,单点成像的数学模型(1)式具有明显的非线性特征,采用无损卡尔曼滤波(UKF)算法^[13-15]完成目标坐标和姿态信息的估算。建立非线性系统

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + w(k) \\ z(k) = x(k) + v(k) \end{cases}, \quad (3)$$

式中系统状态噪声 $w(k)$ 为实际位置与计算位置之间的相对偏差,观测噪声 $v(k)$ 为成像镜头畸变或者像点坐标识别有误造成的误差。假设系统状态噪声和观测噪声是高斯噪声 $w(k)$ 的协方差矩阵为 \mathbf{Q} ,噪声 $v(k)$ 的协方差矩阵 \mathbf{R} 为白噪声,且互不相关,系统状态噪声 $w(k)$ 的协方差矩阵为 \mathbf{Q} ,观测数据噪声 $v(k)$ 的协方差矩阵为 \mathbf{R} ,UKF 算法执行步骤如下:

1) 初始化状态均值和方差为

$$\begin{cases} \bar{x}_0 = E(x_0) \\ \mathbf{P}_0 = E[(x_0 - \bar{x})(x_0 - \bar{x})^T] \end{cases}. \quad (4)$$

2) 观测参数有 6 项,即 $(x_s, y_s, z_s, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$, $n=6$,计算 σ 点 χ_k ,依据状态 $x_{k-1|k-1}$ 和 $P_{k-1|k-1}$ 生成 $2n+1$ 个 σ 点 χ_k

$$\begin{cases} \chi_{k-1} = \bar{x} \\ \chi_{k-1} = \bar{x} + [\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}]_i, & i = 1, \dots, n \\ \chi_{k-1} = \bar{x} - [\sqrt{(n+\lambda)P_{k-1}}]_i, & i = n+1, \dots, 2n \end{cases}. \quad (5)$$

3) 时间更新,对各个 σ 点进行无损变换,取 $\alpha=0.1, \beta=2, \kappa=0, \sigma$ 点的权值为

$$\begin{cases} \lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n \\ W_1^m = \lambda / (n + \lambda) \\ W_1^c = \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^m = W_i^c = 1 / [2(n + \lambda)] \quad i = 1, \dots, 2n \end{cases}, \quad (6)$$

$$\chi_{k|k-1} = \chi_{k-1|k-1}. \quad (7)$$

4) 加权得到状态的下一步预测值

$$x_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \chi_{k|k-1}^i, \quad (8)$$

加权得到状态方差的下一步预测值

$$P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{k|k-1}^i - x_{k|k-1}) (\chi_{k|k-1}^i - x_{k|k-1})^T + Q. \quad (9)$$

5) 由于系统观测值 $z(k)$ 无法通过实际设备观测得到,因此对 UKF 算法进行改进,设观测向量 $z(k)$ 为 (X_j, Y_j) ,利用像点 (X_j, Y_j) 与位置 $(x_s, y_s, z_s, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ 的约束关系完成 UKF 解算,将状态值 $\chi_{k|k-1}^i$ 代入(1)式获取对应的观测值 $\xi_{k|k-1}^i$,加权得到观测的下一步预测值

$$z_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \xi_{k|k-1}^i. \quad (10)$$

6) 测量更新,系统输出的方差为

$$\begin{aligned} P_{y_k, y_k} &= S + R, \\ S &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\xi_{k|k-1}^i - z_{k|k-1}) (\xi_{k|k-1}^i - z_{k|k-1})^T, \end{aligned} \quad (11)$$

由于观测向量 $z(k)$ 的改变,将观测噪声协方差矩阵 R 的行列数与 S 匹配,计算协方差:

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{k|k-1}^i - x_{k|k-1}) (\xi_{k|k-1}^i - z_{k|k-1})^T. \quad (12)$$

7) 滤波更新:

$$\begin{cases} K_k = P_{x_k z_k} P_{z_k z_k}^{-1} \\ x_{k|k} = x_{k|k-1} + K_k (z_k - z_{k|k-1}) \\ P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k P_{z_k z_k} K_k^T \end{cases} \quad (13)$$

2.4 仿真及结果分析

依据系统已知条件,假设系统状态噪声 $w(k)$ 的协方差矩阵为

$$Q_k = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.01\gamma \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$\gamma=10$ (γ 值增大,计算速度变快,精度减小)。

由于观测值 $z(k)$ 的改变,观测噪声 $v(k)$ 的协方差矩阵设为

$$R = \gamma_1 \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{10 \times 10}, \quad (15)$$

$\gamma_1=0.01$ (γ_1 值增大,计算速度变慢,精度增大)。 γ 和 γ_1 的值可以根据对定位精度和解算时间的要求进行相应调整,设观测调整次数为 $k=5000$ 。设滤波器初始随机位置 $x_0 = [170 \ 200 \ 2800 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,方差

$$P_{x_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \circ \quad (16)$$

根据实际拍摄的两张图片(A和B),获取其测量参数,如表1所示。

表1 图片A和B的位置数据

Table 1 Location data of picture A and picture B

World position (x_j, y_j, z_j) /mm	Pixel coordinate picture A (X_j, Y_j) /mm	Pixel coordinate picture B (X_j, Y_j) /mm	Focal length f /mm
(0,0,0)	(-3.1760, -2.1917)	(-1.2736, -2.2479)	9.3
(418.396, 0, 0)	(1.4000, -2.2229)	(3.2550, -2.2760)	9.3
(0, 240.295, 0)	(-3.1539, 0.4308)	(-1.2451, 0.3809)	9.3
(418.396, 240.295, 0)	(1.4632, 0.3497)	(3.3119, 0.3122)	9.3
(209.198, 120.1475, 0)	(0.8438, -0.9179)	(1.0492, -0.9616)	9.3

通过UKF算法进行估算,图片A和B的MATLAB软件仿真结果分别如图4和图5所示。

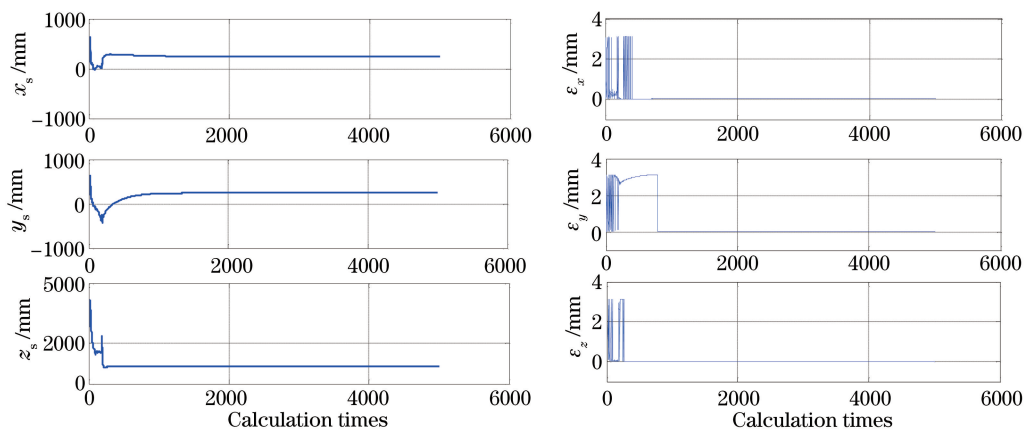


图4 图片A的目标位置坐标和姿态信息

Fig. 4 Target position coordinates and attitude information of picture A

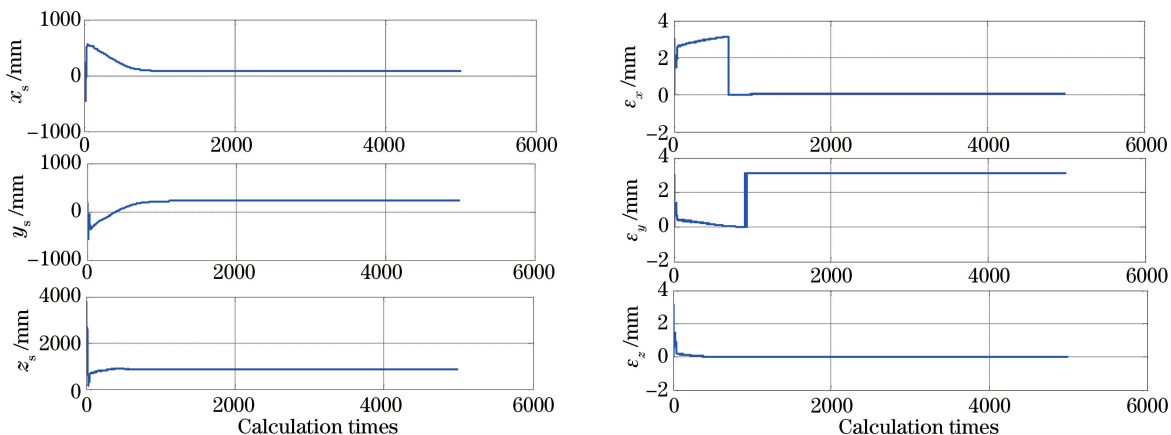


图5 图片B的目标位置坐标和姿态信息

Fig. 5 Target position coordinates and attitude information of picture B

由图 4 和图 5 可知,通过 UKF 算法可以得到目标唯一的位置信息和姿态信息,具体参数如表 2 所示。

表 2 仿真结果数据

Table 2 Simulation result data

Target position	x_s/mm	y_s/mm	z_s/mm	ϵ_x/mm	ϵ_y/mm	ϵ_z/mm
Picture A	245.8136	242.7200	847.7788	0.0473	0.0417	0.0203
Picture B	78.7554	224.7207	845.1718	0.0388	3.1224	0.0145

计算图片 A 的目标位置和图片 B 的目标位置的相对距离为

$$L = \sqrt{|x_{sA} - x_{sB}|^2 + |y_{sA} - y_{sB}|^2 + |z_{sA} - z_{sB}|^2} = 173.7453 \text{ mm}. \quad (17)$$

通过激光测距仪测得图片 A 的目标位置和图片 B 的目标位置的相对距离为 172 mm。仿真结果表明可见光成像定位系统可以通过获取的 LED 位置坐标信息和图像计算出目标的位置坐标和姿态信息。

3 实验设计与结果

由系统模型和成像坐标转换模型设计如图 6 所示的验证系统,在天花板上布设 5 个 LED 光源 A、B、C、D、E,手机与激光测距仪固定于导轨上,手机随滑块进行水平移动,导轨长度为 2 m。激光测距仪(瑞士 Leica DISTO™D2)的测距精度为 $\pm 1 \text{ mm}$,最大测量距离为 60 m。以激光测距仪作为原点,可测量手机的相对移动距离。手机采用 NOKIA1020,其相机分辨率为 500 万像素,拍摄照片像素为 501 万像素,照片大小为 2592 pixel \times 1936 pixel,焦距 f 为 6.95 mm。



图 6 可见光成像定位验证系统

Fig. 6 Visible light imaging positioning verification system

由手机在导轨的不同位置进行拍照,获得的实验数据如表 3 所示。

表 3 可见光成像定位验证系统

Table 3 Visible light imaging positioning verification system

Anchor	A	B	C	D	E
Physical coordinate /m	(-0.3959, 2.8098, 1.5519)	(0.5102, 2.8092, 1.5524)	(-0.6952, 4.0090, 1.5506)	(0.8077, 4.0275, 1.5519)	(0.0605, 3.4358, 1.5504)
Pixel coordinates picture 1	1354,112	2082,117	1173,497	1990,511	1634,355
Pixel coordinates picture 2	1334,116	2060,120	1160,498	1976,513	1618,357
Pixel coordinates picture 3	1273,116	1998,121	1117,498	1934,513	1568,358
Pixel coordinates picture 4	1229,117	1953,122	1088,500	1903,514	1533,359
Pixel coordinates picture 5	1197,117	1920,122	1066,500	1881,514	1507,359
Pixel coordinates picture 6	1166,115	1889,119	1045,498	1860,511	1483,356.5
Pixel coordinates picture 7	1135.5,116	1857,121	1025,498	1839,512	1458,357
Pixel coordinates picture 8	1103,116	1824,122	1003,498.5	1816,513	1432,358
Pixel coordinates picture 9	1084,116	1804,121	989,499	1803,513	1416,358
Pixel coordinates picture 10	1064,116	1784,122	976,499	1790,513	1400,358
Pixel coordinates picture 11	1035,115	1754,122	957,498	1770,513	1377,357

续表 3

Anchor	A	B	C	D	E
Pixel coordinates picture 12	1011,115	1730,122	940.5,497	1754,511	1358,356
Pixel coordinates picture 13	968,114	1687,121	911,497	1724,512	1323,356
Pixel coordinates picture 14	934.5,116	1653,124	888.5,499	1701,514	1296,358
Pixel coordinates picture 15	892,114	1609,123	860,497	1672,512	1262,357
Pixel coordinates picture 16	852,110	1570,119	833,495	1646,510	1231,354
Pixel coordinates picture 17	802,110	1519,120	799,494	1611,509	1190,354
Pixel coordinates picture 18	768,111	1484,120	776,495	1588,509	1162,354
Pixel coordinates picture 19	718,109	1435,120	741.5,493	1554,508	1122.5,353
Pixel coordinates picture 20	682,109	1399,120	717,493	1529,508	1093,353

将表 3 的数据代入坐标转换模型,计算得到相机的位置参数,将其与激光测距仪实测数据进行对比,结果如图 7 所示。

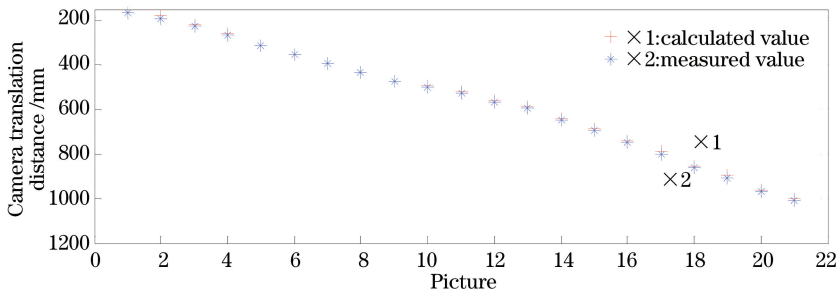


图 7 相机位置的计算数据与实测数据对比

Fig. 7 Comparison of calculated data and measured data of camera position

实验数据表明,20 组实测照片经过计算后获取的相对位置数据与激光测距仪实测数据间的误差在 1 dm 以内,精度和准确度满足设计需求。比较数据结果发现,计算出的手机相对位置与实测值比较始终偏向同一方向(图 7),说明相机位置解算算法仍需改进,手机位置的准确度仍有进一步提升的空间。

4 讨 论

以上实验验证了可见光成像定位方法能够实现分米级室内位置定位,但通过实测数据分析发现,在定位精度方面该方法仍有进一步提高的空间。

4.1 相机参数矫正

该验证系统是建立在像点在像坐标系下的坐标为已知的前提下,但在实际应用中,受成像镜头的加工、装配等因素引起的误差以及图像采集过程中不可避免引入的测量误差与计算误差的影响,成像平面的像点中心会偏离理想状态下的投影几何中心,因此相机镜头参数的矫正和成像中心点的误差修正能够进一步提高位置解算的精度。

4.2 姿态角估计不准

该验证系统中,手机固定于导轨之上,用于解算手机位置的姿态角信息相对固定,基本可以忽略姿态角的变化。但在实际应用中,手机姿态处于时刻变化的状态,因此,姿态角估计和误差的修正能够进一步提升定位系统的稳定性和定位精度。

5 结 论

提出了一种利用泛在 LED 光源成像实现高精度室内定位的方法。该方法通过成像终端对已知位置的 LED 光源进行成像,获取图像上的光源坐标和像点坐标,根据光源与像点间的位置关系计算出成像终端位置坐标和姿态信息。理论仿真和实验系统均验证了所提方法的可行性,数据显示该方法能够实现分米级的高精度定位,可以满足室内定位的需求。

参 考 文 献

- 1 Ruan Ling, Zhang Ling, Xu Yue, *et al.*. Indoor positioning: Classification, methods and applications[J]. Geomatics World, 2015, 22(2): 8-16.
阮 陵, 张 翎, 许 越, 等. 室内定位: 分类、方法与应用综述[J]. 地理信息世界, 2015, 22(2): 8-16.
- 2 Song Xiaoqing, Zhao Zixu, Chen Kewei, *et al.*. Visible light communication: potential applications and challenges[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080004.
宋小庆, 赵梓旭, 陈克伟, 等. 可见光通信应用前景与发展挑战[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080004.
- 3 Xu Yinfan, Huang Xingxing, Li Rongling, *et al.*. Research on indoor positioning algorithm based on LED visible light communication[J]. China Light & Lighting, 2014, 4: 11-15.
许银帆, 黄星星, 李荣玲, 等. 基于LED可见光通信的室内定位技术研究[J]. 中国照明电器, 2014, 4: 11-15.
- 4 Marrero-Ponce Y, Khan M, Ather A, *et al.*. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor [J]. IEEE Radio and Wireless, 2008, 107(6): 439-442.
- 5 Rahman M S, Haque M M, Kim K D. Indoor positioning by LED visible light communication and image sensors[J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2003, 4882(2): 420-431.
- 6 Nah J H Y, Parthiban R, Jaward M H. Visible light communications localization using TDOA-based coherent heterodyne detection[C]. IEEE International Conference on Photonics, 2013: 247-249.
- 7 Chen T, Liu L, Tu B, *et al.*. High-spatial-diversity imaging receiver using fisheye lens for indoor MIMO VLCs[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(22): 2260-2263.
- 8 Shen Rui, Zhang Jian, Wang Ding. Indoor location method and the Cramer-Rao Bound estimation based on visible light communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 090604.
沈 芮, 张 剑, 王 鼎. 基于可见光通信的室内定位算法及相应参数估计克拉美罗界[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 090604.
- 9 Gao Junying, Wang Dechang, Yao Jianguo. MIMO visible light wireless communication system employed camera-based receiver[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0106004.
高俊英, 王德昌, 姚建国. 基于摄像头的MIMO可见光无线通信系统[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106004.
- 10 Ganti D, Zhang W, Kavehrad M. VLC-based indoor positioning system with tracking capability using kalman and particle filters[C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2014: 476-477.
- 11 Zhou Jing. Research of the key technologies of the visual measurement network system of single camera[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
周 婧. 单摄像机视觉测量网络系统关键技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- 12 Han Ping. The study of modeling and simulation method of imaging positioning for optical measurement system of moving target[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
韩 萍. 动目标光学测量系统成像定位建模与仿真方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- 13 Xiong K, Zhang H Y, Chan C W. Performance evaluation of UKF-based nonlinear filtering[J]. Automatica, 2006, 42(2): 261-270.
- 14 Wan Li, Liu Yanchun, Pi Yiming. Comparing of target-tracking performances of EKF, UKF and PF[J]. Radar Science and Technology, 2007, 1: 13-16.
万 莉, 刘焰春, 皮亦鸣. EKF、UKF、PF目标跟踪性能的比较[J]. 雷达科学与技术, 2007, 1: 13-16.
- 15 Pan Quan, Yang Feng, Ye Liang, *et al.*. Survey of a kind of nonlinear filters-UKF[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 481-489.
潘 泉, 杨 峰, 叶 亮, 等. 一类非线性滤波器-UKF综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 481-489.