

# 基于成像通信的高精度可见光室内定位方法

管 扬<sup>1</sup> 孙德栋<sup>2</sup> 殷树刚<sup>2</sup> 辛 军<sup>3</sup> 魏 凌<sup>1</sup> 张洪明<sup>1,4</sup> 宋 健<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084

<sup>2</sup>国网信息通信产业集团有限公司, 北京 100031

<sup>3</sup>国网河南省电力公司郑州供电公司, 河南 郑州 450000

<sup>4</sup>深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057

**摘要** 提出了一种基于可见光发光二极管(LED)与摄像头成像通信的室内精确定位方法,旨在实现高精度、低成本、应用范围广泛、不易受干扰的室内定位。该方法利用摄像头接收加载在LED光上的身份识别信息(ID)获得LED的绝对位置信息,进一步从摄像头拍摄的图像中获取摄像头与LED的相对位置信息,结合接收端上的姿态传感器(电子罗盘)数据,便可计算得到摄像头的精确位置,实现定位功能。采用该方法进行了高精度室内定位实验测试,测试结果表明,该方法的定位精度可以达到厘米量级,且可以仅通过软件就将接收端布设在目前大多数智能终端上。

**关键词** 光通信; 室内定位系统; 成像通信系统; 精确定位

**中图分类号** TM923.34; TN31

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1206001

## High Precision Visible Light Indoor Positioning Based on Image Communication

Guan Yang<sup>1</sup> Sun Dedong<sup>2</sup> Yin Shugang<sup>2</sup> Xin Jun<sup>3</sup> Wei Ling<sup>1</sup>  
Zhang Hongming<sup>1,4</sup> Song Jian<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup>State Grid Information & Communication Company Limited, Beijing 100031, China

<sup>3</sup>Zhengzhou Power Supply of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou, Henan 450000, China

<sup>4</sup>Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen, Guangdong 518057, China

**Abstract** A high-precision indoor positioning method based on LED and image communication is proposed, which can achieve high-precision and small-disturbance indoor positioning with low cost and wide applications. The camera is used to receive the identity information added on the LED light for the absolute position of the LED. And then, the absolute position of the camera can be calculated combined with data of the attitude sensor on the receiver. Results of the test experiment based on the method show that the positioning accuracy can be achieved within centimeter scale, and the receiver can be placed on most intelligent terminals just by software.

**Key words** optical communications; indoor positioning system; image communication system; high precision positioning

**OCIS codes** 060.4510; 230.3670; 060.2605; 040.1490

## 1 引 言

在当今社会,定位技术已成为不可或缺的技术之一,以全球定位系统(GPS)为主,几乎所有的移动设备都具备定位的功能。随着移动互联网的快速发展,室内定位技术的需求量越来越大,其不仅适用于大型购物

收稿日期: 2016-07-01; 收到修改稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGHAZZ00FCJS1500238)

作者简介: 管 扬(1992—),男,硕士研究生,主要从事可见光室内定位方面的研究。E-mail: yang221199@sina.com

导师简介: 张洪明(1975—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事可见光通信,大气、水下无线光通信技术等方面的研究。E-mail: zhhm@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

中心、停车场、博物馆等公共场所,也可被用于大型隧道和矿洞等封闭区域的位置确定和导航。由于 GPS 定位在室内的精度不能满足人们的需求<sup>[1]</sup>,因此寻找一种高精度低成本的室内定位技术成为当务之急。许多公司和研究单位的研究人员都对室内定位技术进行了研究并提出了多种方案,其中包括基于 GPS 进行定位并用无线网络(Wi-Fi)进行辅助校准<sup>[2]</sup>、基于蓝牙进行室内短距离定位<sup>[3]</sup>,这些技术使用方便但精度上仍然无法满足需要;通过超宽带技术进行精确定位的方案<sup>[4]</sup>,精度较高但其布设成本较大;还有利用大地磁场来进行定位的技术方案<sup>[5]</sup>,比较容易受到外界磁场或电场的干扰。国内也有许多研究单位提出了不同的解决方案,如上海交通大学的研究团队提出的通过测量 Wi-Fi 强度变化进行定位的方案<sup>[6]</sup>,吉林大学的团队提出的利用超声波实现室内三维定位的方案<sup>[7]</sup>,哈尔滨工程大学提出的利用射频识别进行室内定位的方案<sup>[8]</sup>等,但目前还没有被广泛认可和采用的技术。

近年来,随着 LED 节能照明光源的广泛应用,基于 LED 照明的可见光通信技术(VLC)已越来越受到世界各国研究人员的关注,包括将可见光通信技术应用于室内精确定位的方案<sup>[9]</sup>。相比于传统室内定位方法,可见光定位不但具有方便、稳定、不受电磁干扰等 VLC 技术的优势,在定位精度上也具有相当的优势。目前的 VLC 室内定位技术主要包括接收信号强度指示(RSSI)、三角测量法、达到角(AOA)与 Ad Hoc 网络混合等定位方法<sup>[10-13]</sup>,但以上大多技术都使用光电二极管(PD)为接收设备,这些在使用时都需要在手机等智能终端上添加额外器件。

本文提出了一种基于摄像头成像通信的室内精确定位方法,并进行了实验测试。实验中利用接收端的摄像头和姿态传感器,对 LED 灯上的调制信息进行解调,获取 LED 的身份识别(ID)信息,并通过摄像头捕捉 LED 的位置图像,结合姿态传感器捕获辅助数据,计算得到接收端的精确位置。本方法使用摄像头代替可见光通信一般采用的光电探测器(PD)作为光接收设备,使该技术能够不需额外硬件,仅通过软件控制已有的传感器就可以直接应用于普通手机等智能终端,该方法可以达到厘米量级定位精度,有广泛的应用前景。该方法也可应用于矿井、电缆隧道等地下区域中人员的精确定位。

## 2 精确定位原理

灯的 ID 信息是一个由 0 和 1 组成的码串,代表 LED 的身份信息,用以区分不同 LED 灯,并查询其在世界坐标系的位置。将灯的 ID 信息调制 in LED 上,使 LED 发出的可见光中载有其 ID 信号,就可从摄像头拍摄的 LED 图片中得到其中信息,并将其发送给手机、平板电脑等智能终端,经过智能终端对图像信息的解调,即可得到 LED 的 ID 信息以及对应的 LED 在世界坐标系中的坐标信息。同时,解调 ID 时,也可根据 LED 在摄像头拍摄图像上的成像位置,以及姿态传感器提供的姿态信息,获得 LED 与摄像头的相对位置信息。结合通过 LED 的 ID 查询所得的 LED 在世界坐标系中的位置和摄像头与 LED 的相对位置,就可以得到摄像头的精确位置。以下分别介绍利用摄像头获取 LED 信息的成像通信,以及获取 LED 和摄像头的相对位置,进而获得摄像头绝对位置的方法。

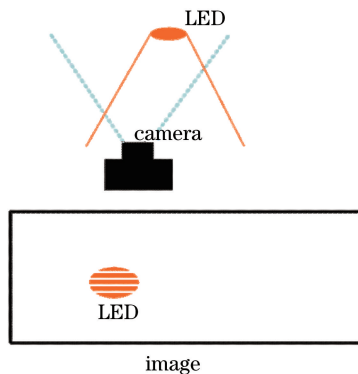


图 1 成像通信定位情景演示图

Fig. 1 Scenario demonstration diagram of image-communication positioning

### 2.1 成像通信

可见光通信的发射端通过 LED 光的闪烁来发送信息,将 LED 的 ID 信息加载到 LED 灯上对其发出的光进行调制,LED 灯以亮暗闪烁的方式重复发送 ID 信息<sup>[14]</sup>。

在接收端,摄像头记录一段时间内 LED 的亮暗,用于解调。由于摄像头帧率一般仅为每秒几十帧,不能直接响应光的快速明暗闪烁来实现接收。为了使摄像头能够接收远高于其帧率的光信号,可以利用摄像头进行逐行扫描。

摄像头拍摄一张图片,若从上到下逐行扫描,称为逐行扫描模式。每一行的亮度取决于在各自的曝光时间中接收到的光功率总和。适当地调整 LED 的闪烁频率以与摄像头的曝光时间相匹配,就可以拍摄得到足够清晰的亮暗相间的条纹图片<sup>[15]</sup>,如图 2 所示。图中,每一条亮暗条纹都代表所对应时间段内的 LED 亮暗变化。亮条纹处对应传输的“1”码字,暗条纹处对应传输的“0”码字。对图片从上向下依次提取亮暗条纹,就可以将其中包含的“1”和“0”码字序列提取出来,从而得到 LED 所发送的信息。

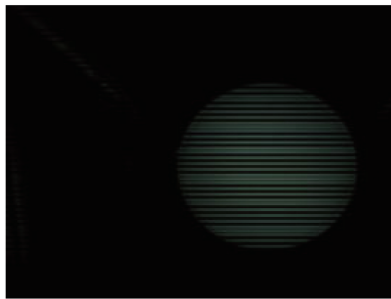


图 2 摄像头拍摄到的 LED 明暗条纹

Fig. 2 Light and shade stripes captured by camera

### 2.2 精确定位

LED 在摄像头成像面上成像,以成像面的中心为原点设立坐标系称为摄像头参照系,用  $u, v, w$  表示摄像头参照系的坐标轴。因为透镜焦距很短,可认为成像面位于透镜下方焦点处,设透镜的焦距为  $f_c$ 。LED 与其成像位置在摄像头参照系中具有几何比例关系,如图 3 所示。根据几何比例关系,可以得到 LED 与摄像头的相对位置关系。

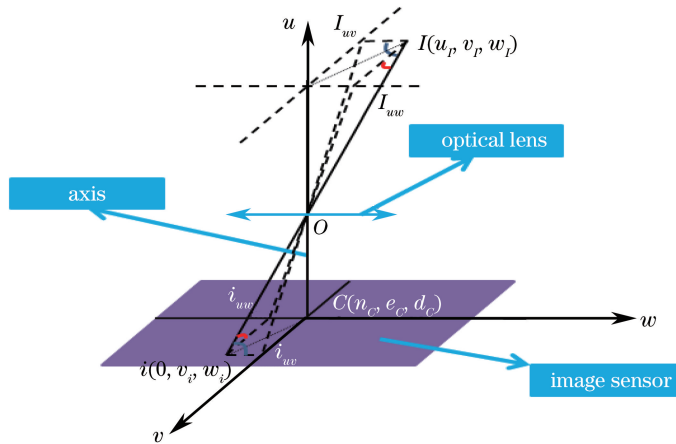


图 3 摄像头坐标系中成像位置关系

Fig. 3 Imaging position in coordinate system of camera

已知  $u, v, w$  表示摄像头参照系的坐标轴,以  $n, e, d$  代表世界坐标系的坐标轴,点  $I$  为 LED 的位置,点  $i$  为 LED 在摄像头中所成像的位置, $O$  为透镜的中心, $C$  为图像的中心位置,则  $(u_i, v_i, w_i)$  为 LED 在摄像头坐标系中的坐标,  $(n_c, e_c, d_c)$  为摄像头在世界坐标系中的坐标,  $(0, v_i, w_i)$  为 LED 所成的像在摄像头坐标系中的坐标,其中  $v_i, w_i$  的值可以在图片中通过计算像素得到。摄像头坐标系中,LED 及其像的坐标满足

$$\begin{cases} v_i = \frac{f_c}{u_i - f_c} \\ -v_i = \frac{f_c}{u_i - f_c} \\ w_i = \frac{f_c}{u_i - f_c} \\ -w_i = \frac{f_c}{u_i - f_c} \end{cases}, \quad (1)$$

由此,即可通过 LED 像的位置获得 LED 的位置。

图 4 为参照系之间的坐标转换关系。如图 4 所示,在得到摄像头坐标系中的 LED 坐标后,将其转换到世界坐标系中时,考虑到接收端的接收姿态是不确定的,因此还需要知道姿态传感器提供的摄像头姿态信息(方位角、侧倾角、俯仰角),以形成坐标转换矩阵  $\mathbf{R}_g^b$ 。

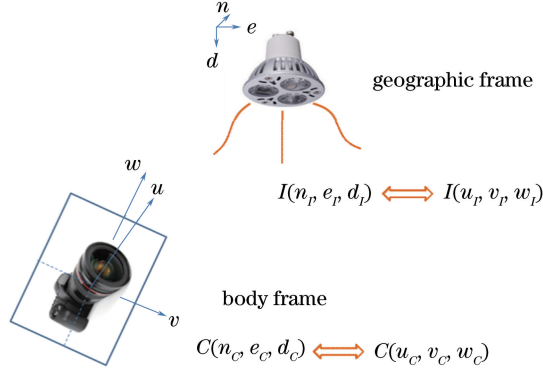


图 4 参照系之间坐标转换关系

Fig. 4 Coordinate transformation relation between different reference systems

假设姿态传感器提供的方位角为  $\psi$ ,侧倾角为  $\varphi$ ,俯仰角为  $\theta$ ,那么可将两个坐标系的旋转分别分解为三个方向上的旋转。其中,方位角维度的旋转形成的矩阵为

$$\mathbf{R}_g^1 = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

俯仰角维度的旋转形成的矩阵为

$$\mathbf{R}_g^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

侧倾角维度的旋转形成的矩阵为

$$\mathbf{R}_g^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

最终的旋转矩阵可表示为  $\mathbf{R}_g^b = \mathbf{R}_g^1 \times \mathbf{R}_g^2 \times \mathbf{R}_g^3$ 。利用该旋转矩阵,可将世界坐标系中的任意向量变换到相对坐标系中,变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} u_I \\ v_I \\ w_I \end{bmatrix} = \mathbf{R}_g^b \begin{bmatrix} n_I - n_C \\ e_I - e_C \\ d_I - d_C \end{bmatrix}. \quad (5)$$

当已知 LED 与摄像头之间的高度差,由(1)式及(5)式即可解出其他所有的参数。

由上所述,摄像头参照系中的 LED 坐标,可以通过坐标系转换矩阵转换得到世界坐标系中的 LED 坐标,即世界坐标系中 LED 与摄像头的相对位置。再结合成像通信中获得的 LED 在世界坐标系中的绝对位置,即可计算得到摄像头在世界坐标系中的精确位置,即所需的摄像头的精确定位。

### 3 实验装置

图 5 为实验中搭建的测试系统示意图,其中光源为商用 LED 照明灯,灯面半径为 14 cm,功率为 6 W。摄像头实时传输帧率为 5~10 frame/s,离线传输帧率为 20 frame/s,摄像头分辨率为 1024 pixel×768 pixel。

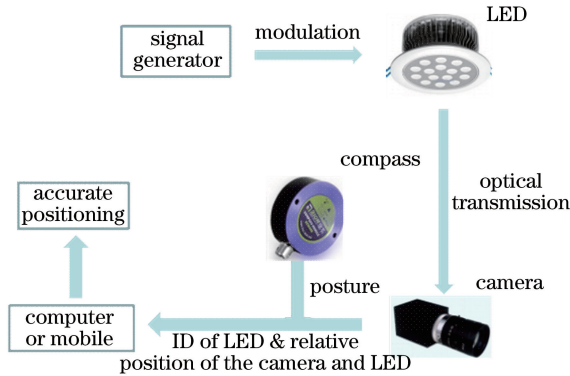


图 5 实验平台示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental test

实验中摄像头固定在 LED 灯下方的光具座上,与 LED 光源的间距约为 1 m,可在导轨上水平滑动。同时用信号发生器生成 ID 信号加载到 LED 上,调制发出的光发送到摄像头,摄像头通过逐行扫描读取信号中包含的 ID。姿态传感器(电子罗盘)可提供摄像头的姿态信息。

摄像头和电子罗盘连接在计算机或手机上,将各自得到的信息传输给智能终端,根据 LED 的 ID 通过数据库查找到 LED 的位置坐标,并根据几何关系得到 LED 相对于摄像头的位置,最后转换参照系,求得摄像头的精确位置。

通过在滑轨上移动由摄像头和姿态传感器组成的终端,并利用上文所述的方法,就可以得到在灯下不同位置的成像通信结果并计算得到定位结果。

### 4 实验结果

实验测试时,摄像头沿着光学导轨滑动(步长为 2.5 cm),通过比较其具体移动的距离与定位数据来测试该系统的精度。摄像头初始位置处于导轨中心,以便于向正、反两个方向滑动,测试中每次滑动 1 个步长,总共向正反方向各滑动 5 个步长。

#### 4.1 定位误差

LED 灯的高度将影响灯下定位精度,因此固定 LED 与摄像头的初始高度差为 90 cm。实验中,让摄像头在灯下每移动 2.5 cm 采集一个点,共采集 10 个测量点,以中心位置点为参考点,得到各点定位误差如图 6 所示。由图 6 可见,各点定位误差均小于 1 cm,平均定位误差为 0.47 cm。

进一步地,当 LED 灯被置于不同高度时(距离摄像头分别为 90,80,70,60,50 cm),测量不同位置定位误差并计算不同高度对应的平均定位误差,测量结果如图 7 所示。由图 7 可见,LED 与摄像头距离越近,定位的精度越高。在 LED 和摄像头距离为 90 cm 以内时,定位误差均小于 1 cm。误差大致是随着 LED 和摄像头的距离增大而线性增长的,其中的跳变点应该是测量时外界环境引入的随机误差。

#### 4.2 成像通信数据率

实验中,还测量了该摄像头用于接收可见光通信的最大传输速率。当 LED 灯被置于不同高度时(距离摄像头分别为 90,80,70,60,50 cm),测得成像通信传输速率如图 8 所示。由图 8 可以看出,LED 距摄像头越远,传输速率就越低,在 LED 位于 90 cm 高度处的成像通信传输速率为 340 bit/s。这是由于成像通信通过图片中的条纹来传递信息,图片中的像越小,其中包含的条纹数就越少,每幅照片能传递的信息也越少。因此可以通过增大灯的面积,提升摄像头的帧率,或提升摄像头的分辨率来提高成像通信的速率。本实验装置的成像通信速率完全可以支持 LED 的 ID 的传输。

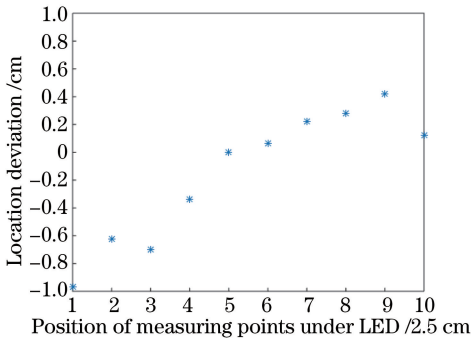


图 6 灯下不同位置的定位误差

Fig. 6 Location deviation of different positions under LED light

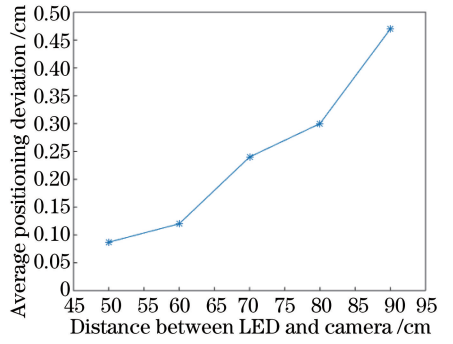


图 7 LED 在不同高度时的定位平均误差

Fig. 7 Average positioning deviation of LED at different heights

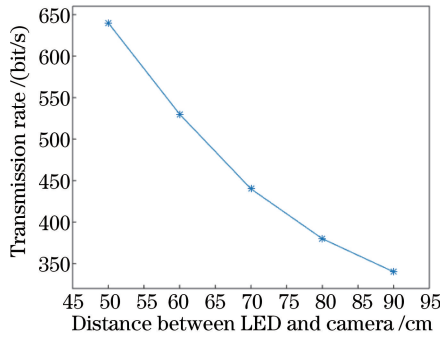


图 8 传输速率随距离变化

Fig. 8 Transmission rate versus distance

### 4.3 姿态变化时系统定位误差分析

根据上文所述,该定位方法利用终端上的电子罗盘测得终端姿态,结合图像信息进行精确定位。由于侧倾角与俯仰角在姿态矩阵中完全对称,所以在此仅测量在终端不同侧倾角情况下所产生的定位误差。

在本实验设计中,LED灯与摄像头垂直距离为 1.6 m,摄像头与电子罗盘构成的终端放置在一个倾角器上,倾角器固定于东西朝向的导轨上,倾角器可以自由地调节终端的侧倾角并读取精确的角度信息。将系统置于 LED 灯下不同位置,在实验中,分别置于 LED 灯正下方(导轨坐标为 0)以及距 LED 灯正下方以西 0.1 m 处(导轨坐标 -0.1),改变终端的侧倾角,测量在侧倾角改变情况下定位位置的变化。为了保证在改变侧倾角过程中,摄像头始终能够拍摄到 LED 图片,侧倾角变化范围限定为  $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ ,测量结果如图 9 所示,由图 9 可以看出在不同位置、不同侧倾角时定位结果的变化。

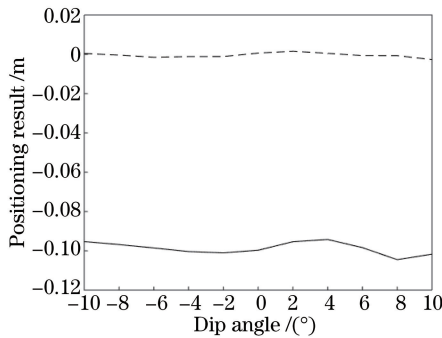


图 9 定位位置随侧倾角的变化

Fig. 9 Positioning result versus dip angle

在图 9 中,虚线表示系统在灯正下方时改变侧倾角导致定位位置的变化,测量得到定位坐标平均值为  $-0.0004$  m,标准差为  $0.0011$  m。实线表示系统在灯正下方以西 0.1 m 处改变侧倾角导致定位位置变

化的曲线,测量得到定位坐标平均值为 $-0.0987$  m,标准差为 $0.0030$  m。

从以上结果可以看出,终端在相同位置改变姿态时,定位位置的变化非常小,即姿态改变引起的误差比较小。系统能够根据图片中 LED 的位置信息,以及从电子罗盘得到的姿态信息,精确计算出当前 LED 的位置。

## 5 结 论

提出了一种基于摄像头成像通信的室内可见光精确定位方法,并对该方法进行了实验测试。实验中,在 LED 与摄像头垂直距离为 $90$  cm 时,成像通信的传输速率为 $340$  bit/s,灯下平均定位误差为 $0.47$  cm。实验表明,定位误差随着摄像头系统距离灯正下方的水平距离变远而变大,同时,定位误差也随着 LED 灯高度的增大而增大。这个误差可能来源于对 LED 与摄像头垂直距离的测量误差或摄像头透镜焦距的测量误差。实验同时表明,LED 和摄像头之间成像通信的传输速率随二者之间距离的增大而减小,原因是 LED 成像通信的数据量正比于 LED 的成像面积。另外,实验中也证实了姿态变化给系统带来的误差非常小,不会影响系统的定位功能。

在本文所述的基于成像通信的高精度室内可见光定位技术中,发送端只需用一个驱动控制 LED 的闪烁,接收端只需要使用摄像头与电子罗盘,可以在目前的大多数智能终端上应用。未来该技术可以在多灯定位方面继续研究与拓展,使其稳定性与精确度进一步提高。

## 参 考 文 献

- Deng Z L, Yu Y P, Yuan X, *et al.* Situation and development tendency of indoor positioning[J]. China Communications, 2013, 10(3): 42-55.
- Kovalev M. Indoor positioning of mobile devices by combined Wi-Fi and GPS signals[C]. 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2014: 332-339.
- Feldmann S, Kyamakya K, Zapater A, *et al.* An indoor bluetooth-based positioning system: concept, implementation and experimental evaluation[C]. International Conference on Wireless Networks. 2003: 109-113.
- Ingram S J, Harmer D, Quinlan M. Ultrawideband indoor positioning systems and their use in emergencies[C]. 2004 Position Location and Navigation Symposium, 2004: 706-715.
- Mautz R. Indoor positioning technologies[D]. Zurich: ETH Zürich, 2012.
- Zhang Minghua, Zhang Shensheng, Cao Jian. Received signal strength based indoor location in wireless LANs [J]. Computer Science, 2007, 34(6): 68-71.  
张明华, 张申生, 曹 健. 无线局域网中基于信号强度的室内定位[J]. 计算机科学, 2007, 34(6): 68-71.
- Yang Yang, Xiao Jinhong, Liu Zhi, *et al.* Indoor three-dimensional positioning system based on ultrasonic[J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2012, 30(3): 267-271.  
杨 阳, 肖金红, 刘 智, 等. 基于超声波的室内三维定位系统[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2012, 30(3): 267-271.
- Yan Baozhong, Jiang Chen, Yin Weiwei. Research on the indoor positioning algorithm based on RFID[J]. Information & Communications, 2010, 27(2): 320-324.  
闫保中, 姜 琛, 尹伟伟. 基于 RFID 技术的室内定位算法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(2): 320-324.
- Liu H, Darabi H, Banerjee P, *et al.* Survey of wireless indoor positioning techniques and systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(6): 1067-1080.
- O'Brien D C, Zeng L, Le-Minh H, *et al.* Visible light communications: challenges and possibilities[C]. 2008 IEEE 19<sup>th</sup> International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008: 1-5.
- Wang Qi. Research on an indoor positioning technology based on RSSI ranging[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(6): 64-66.  
王 琦. 基于 RSSI 测距的室内定位技术[J]. 电子科技, 2012, 25(6): 64-66.
- 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.
- Lou Penghua, Zhang Hongming, Lang Kai, *et al.* A location-based services system using indoor visible light sources[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2012, 23(12): 2298-2302.

娄鹏华, 张洪明, 郎 凯, 等. 基于室内可见光照明的位置服务系统[J]. 光电子·激光, 2012, 23(12): 2298-2302.

- 14 Moon M, Choi S. Indoor position estimation using image sensor based on VLC[C]. 2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2014: 11-14.
- 15 Rajagopal N, Lazik P, Rowe A. Visual light landmarks for mobile devices[C]. Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 2014: 249-260.