

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.221210001

可见光室内定位技术研究进展*

陈 静¹, 刘 旋^{1,2}, 郑 杰¹

(1. 扬州大学 信息工程学院(人工智能学院), 江苏 扬州 225127;

2. 东南大学 计算机科学与工程学院, 南京 211189)

摘 要:可见光赋能的定位技术具有无电磁辐射、成本低、精度高、安全性高、不易受电磁干扰等优势,故近年来可见光室内定位技术(Visible Light Indoor Positioning, VLIP)受到了学界和业界的广泛关注。为了展示 VLIP 的研究进展和发展全貌,阐述了 VLIP 的系统架构及相关通信技术,对 VLIP 基础定位方法及其相关辅助定位技术进行了详细地梳理、分类和对比分析,针对 VLIP 当前面临的挑战分析了潜在的解决方案,展望了 VLIP 未来研究方向。

关键词:可见光通信(VLC);可见光室内定位(VLIP);定位方法;LED

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)03-0478-10

Research Progress of Visible Light Indoor Positioning

CHEN Jing¹, LIU Xuan^{1,2}, ZHENG Jie¹

(1. College of Information Engineering(College of Artificial Intelligence), Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Positioning based on visible light has such advantages as non-electromagnetic radiation, low cost, high precision, high security, and less susceptibility to electromagnetic interference. As a result, visible light indoor positioning (VLIP) has got a lot of attention from academia and industry in recent years. In order to present the research progress and development of VLIP, the system architecture and related communication technologies of VLIP are first described. The basic positioning methods of VLIP and related auxiliary positioning technologies are sorted, classified and compared. A summary of the current challenges with VLIP is given, along with an analysis of possible solutions. Finally, the future research direction of VLIP has been prospected.

Key words: visible light communication (VLC); visible light indoor positioning (VLIP); positioning method; LED

0 引 言

尽管基于无线局域网、射频识别、ZigBee、蓝牙以及超宽带等的室内定位(Indoor Positioning, IP)技术能够提供米级、分米级、甚至厘米级的定位精度,但容易受到其他信号的干扰,而且射频信号频谱资源短缺,导致精度和系统成本间难以取得平衡,因此各种 IP 技术均未得到大规模应用和推广。可见光通信(Visible Light Communication, VLC),拥有 380~780 nm 的巨大带宽(大约 400 THz)^[1],具备无电磁辐射、传输速率快、安全性高等天然属性,通过发光

源短缺,导致精度和系统成本间难以取得平衡,因此各种 IP 技术均未得到大规模应用和推广。可见光通信(Visible Light Communication, VLC),拥有 380~780 nm 的巨大带宽(大约 400 THz)^[1],具备无电磁辐射、传输速率快、安全性高等天然属性,通过发光

* 收稿日期:2022-12-10;修回日期:2023-02-14

基金项目:江苏省“双创博士”项目(JSSCBS20211035);江苏省博士后基金项目(2021K402C);江苏省大学生创新创业训练计划项目(202211117119Y)

通信作者:刘旋 Email:yusuf@yzu.edu.cn

二极管 (Light Emitting Diode, LED) 等可见光光源发出的高速明暗变化的光信号来传输信息,可以兼顾照明和通信功能,被认为是未来射频技术的重要补充^[2],也是 6G 愿景中的关键候选技术之一^[3]。VLC 技术为定位提供了新的思路,逐渐形成了基于可见光的定位技术 (Visible Light Positioning, VLP)。近年来,针对封闭空间的可见光室内定位技术 (Visible Light Indoor Positioning, VLIP) 受到了学界和业界的广泛关注:一方面不易受电磁信号干扰,且不存在电磁辐射问题,特别适用于医院、机场以及工厂等对电磁信号严格限制的场合;另一方面,可借助室内既有照明设备作为光源,减少投资成本,易于大规模应用部署,节能减排,利于实现国家“双碳”战略目标。

近年来,VLIP 的技术优势和特性引起了国内外的广泛关注。在学术界,许多著名高校和科研机构都对 VLIP 技术展开了理论研究,例如,英国爱丁堡大学的 Harald Hass 团队、法国洛林大学的 Nicolas Krommenacker 团队、德国的海因里希赫兹研究所,国内复旦大学的迟楠团队、清华大学的张洪明团队、北京理工大学的杨爱英团队、暨南大学的方俊彬团队等;在产业界,高通、华为、西门子和飞利浦等世界知名公司也开始探索 VLIP 技术的应用和推广,申请了多项相关专利,并且高通在 2016 年宣布了旗下的高通创锐讯将和 Acuity Brands 展开合作,使用特制的 LED 和高通 Lumicast 技术为零售业者提供室内定位服务^[4]。此外,2020 年国家标准化产业管理委员会发布了信息技术 VLC 系统室内定位传输协议标准^[5],进一步推动了 VLIP 技术的产业化发展。

本文对 VLIP 相关的文献进行综述,以展现 VLIP 技术的最新研究进展,展示 VLIP 领域的发展全貌。

1 VLIP 系统架构及相关通信技术

1.1 VLIP 系统架构

VLIP 系统架构主要由发送端、接收端以及光信道三大部分构成,如图 1 所示。发送端通常由 LED 阵列、编码与调制模块和驱动电路组成,LED 是核心器件;接收端通常由光电探测器、信号解调器、译码器、位置估测单元组成,光电探测器是核心器件;光信道可分为视距 (Line of Sight, LoS) 信道和非视距 (Non-line of Sight, NLoS) 信道两种类型。在 LoS 信道中,发送端与接收端间无遮挡物,噪声干扰影响

较小,而在 NLoS 信道中,发送端和接收端间存在墙壁、天花板等障碍物,光信号传输存在多径效应等问题,受噪声干扰影响大。

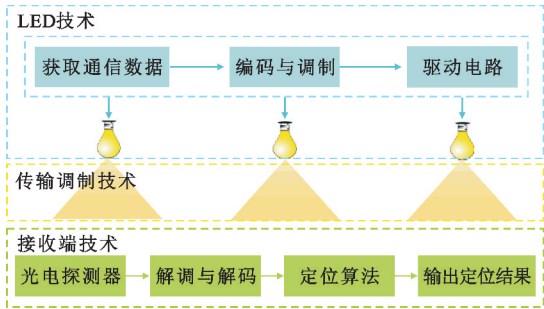


图 1 VLIP 系统架构
Fig. 1 VLIP system architecture

VLIP 系统的基本工作流程为:在发送端一侧,首先获得通信数据 (LED 标识符、位置坐标等信息),并对数据进行编码和调制,然后通过驱动电路将电信号转换为光信号,并由光信道进行传输;而在接收端一侧,首先由探测器捕获信道中的光信号,并将其转换为电信号,然后通过解调与解码得出原始数据,最后利用定位方法精确计算出定位目标的位置信息,定位结果可以辅助导航、遥感、测绘、推荐等应用。

下面将从发送端 LED 技术、传输调制技术和接收器技术等三个方面分别对当前 VLIP 相关通信技术进行归纳总结。

1.2 LED 技术

相较于白炽灯和荧光灯等照明设施,LED 具有节能高效、响应速度快、热辐射小、应用广泛等特点,所以 VLIP 中通常采用 LED 作为发光源。尽管学界提出了多种类型 LED,但具备产业化推广潜能的仅有基于荧光粉的 LED 和多个芯片组合而成的 LED。其中,前者日常使用较广,但是由于调制带宽较低,限制了数据传输速率;而后者通过将不同颜色的 LED 芯片按一定比例混合起来产生白光,成本和复杂度也更高,但具有较高的调制带宽和数据传输速率,以及较短的响应时间。此外,使用该类型 LED 的 VLIP 系统可以利用色移键控 (Color Shift Keying, CSK) 技术来调制数据,以提升数据传输率^[6-7]。在当前 VLIP 系统中,LED 有两种用途:①绝大多数情况下被用作定位信标,定位过程中每个 LED 都被分配唯一标识符和坐标等信息,并通过相应的编码和调制技术将这些信息发送到接收端;②少数情况下

LED 仅用作照明,通过接收端的特殊定位方法设计来计算目标位置^[8-11]。

1.3 传输调制技术

VLIP 通信系统中的调制技术是指在保证 LED 正常照明功能的基础上,以某种合适的方式调制 LED 光信号,即让 LED 能够以适当频率进行切换,以实现数据在光信道中高效传输,同时光强变化不会被人眼所察觉。经调研发现,目前针对 VLIP 调制技术的研究不是很多,但由于大多数 VLC 调制技术可以用于 VLIP 中或者给予借鉴,所以下面将介绍主流的 VLC 调制技术,以便于供定位领域采纳使用,包括通断键控(On-Off Keying,OOK)、脉冲位置调制(Pulse Position Modulation,PPM)、CSK 技术、正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing,OFDM)、非正交多址接入(Non-orthogonal Multiple Access,NOMA)以及混合调制等,并对 VLC 不同调制技术的优缺点进行对比分析,如表 1 所示。

表 1 VLC 不同调制技术的优缺点

Tab. 1 Analysis of the advantages and disadvantages among different modulation techniques in VLC

调制技术	优点	缺点
OOK	简单,易实现	抗噪能力较弱,数据率较低
PPM	抗干扰能力较好	频谱效率低,数据率易受影响
CSK	复杂度低,数据传输率高,不易出现闪烁现象	相邻颜色通道之间存在串扰,影响系统性能
OFDM	抗多径干扰能力好,带宽利用率高	产生的信号不满足非复实数特性,需要改进
NOMA	具有更高的频谱效率和系统公平性	接收端的复杂度较高,存在信道估计误差
混合调制	可以提高 VLC 的传输效率和信道利用率,实现更加灵活的调光控制	复杂度较高,成本较高

1.4 接收器技术

接收器是 VLIP 系统的又一重要组成器件,负责接收从光信道传来的光信号,从而得到 LED 的标识符、位置坐标、光信号强度等定位信息。当前 VLIP 系统常用的接收器主要分为光电二极管(Photodiode,PD)和图像传感器两类。PD 具有对光敏感的特性,可以将接收到的光信号转换为电流,从而获得接收信号强度(Received Signal Strength,

RSS)、信号到达时间(Time of Arrival,TOA)、信号到达时间差(Time Difference of Arrival,TDOA)等信息,并且响应速度较快,灵敏度高,成本较低,所以目前 VLIP 系统多考虑用 PD 探测光信号。常用的 PD 包括雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode,APD)和 PIN 型光电二极管(Positive-Intrinsic-Negative Photodiode,PIN-PD)。

图像传感器本质上由 PD 阵列构成,在 VLIP 系统中负责捕获 LED 光源的图像,并利用卷帘快门效应所形成的明暗交错的条纹来传输数据。基于图像传感器的 VLIP 系统不易受到多径效应的影响,而且可以在空间上分离光源,无须使用多路复用技术。常用的图像传感器包括电荷耦合器件(Charge Couple Device,CCD)图像传感器和互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor,CMOS)图像传感器。此外,由于大部分智能手机都配备高清摄像头,所以基于智能手机的 VLIP 系统将具有巨大发展潜力。

2 VLIP 定位方法及其相关辅助定位技术

定位方法及其辅助定位技术是 VLIP 实现高精度定位的关键核心,近年来国内外提出了一系列 VLIP 定位方法及其相关辅助定位技术。图 2 展示了 VLIP 定位方法的详细分类体系,其中,基础定位方法指的是采用数学方法来实现定位的一类算法,具体包括接近法、三边定位法、指纹定位法、混合定位法等;相关辅助定位技术指的是利用传感器测量的数据来辅助实现高精度定位的一类定位技术,具体包括图像传感器定位、光探测器组合定位、惯性测量单元定位、光传感器定位等。

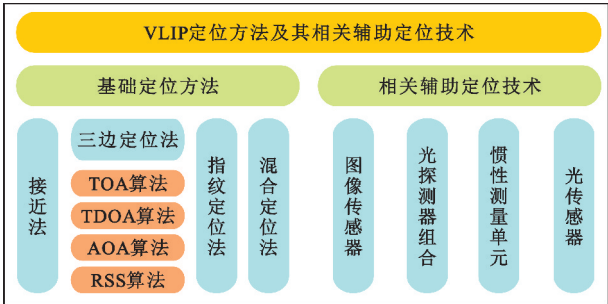


图 2 VLIP 定位方法的详细分类体系

Fig. 2 Detailed classification scheme of VLIP positioning methods

2.1 基础定位方法

在基于射频的定位方法中,常采用接近法、三边

定位、指纹定位、混合定位等基础定位方法,这些方法也逐渐被应用到 VLIP 中。表 2 列出了文献中提出的定位系统的精度/误差、成本、复杂度,可以使

用相同类型算法的定位系统之间进行比较,同时也可以对这 4 种类型的算法在 3 种维度上进行整体比较。

表 2 VLIP 基础定位方法的对比分析
Tab. 2 Comparative analysis of VLIP basic positioning methods

定位技术	文献	主要指标		成本	复杂度
		实验结果	模拟结果		
接近法	[12]	—	精度:高于 2.5 m	中等	中等
	[13]	误差:0.2~1.8 m	—	较低	较低
	[14]	—	—	较低	中等
TOA 方法	[15]	—	误差:低于 0.7 cm(低噪声) 低于 8 cm(高噪声)	中等	中等
	[16]	精度:100~200 mm	—	中等	中等
TDOA 方法	[17]	—	精度:高于 10 cm	较低	中等
	[18]	—	精度:9.2 cm	中等	较低
RSS 方法	[10]	—	厘米级误差	较高	较高
	[19]	—	误差:0.19 m	中等	中等
	[20]	误差:小于 0.21 m(低频信号) 小于 0.44 m(高频信号)	—	中等	中等
AOA 方法	[21]	—	厘米级精度	较低	中等
	[22]	误差:低于 4.5 cm	—	中等	中等
	[23]	—	—	较高	中等
指纹定位法	[8]	误差:7 cm(静止目标) 12 cm(移动目标)	—	较高	较高
	[24]	误差:6 cm 左右(房间空置) 不超过 14.5 cm(房间有人)	—	中等	较高
	[25]	—	误差:16.49 cm(数据集大小为 10 ⁵) 10.53 cm(数据集大小为 10 ⁶)	中等	较高
	[26]	—	误差:0.03 m 左右	中等	较高
	[27]	误差:2.7 cm	—	中等	较高
	[28]	误差:0.133 m	—	中等	中等
	[29]	—	误差:0.11 m 左右	较低	中等
	[30]	—	精度:25 cm(1 个 PD) 5 cm(4 个 PD)	中等	中等
混合定位法	[31]	误差:4 cm 左右	—	中等	较高
	[12]	—	精度:高于 2.5 m	中等	中等
	[32]	—	误差:0.50 cm	中等	较低
	[33]	—	误差:2.02 cm	中等	中等
	[34]	—	误差:1.39 cm	中等	中等

2.2 相关辅助定位技术

为了实现更高精度的室内定位,许多 VLIP 系统已开始借助其他技术来辅助定位,本小节将以传感器类型为分类标准介绍 VLIP 中的相关辅助定位技术。在可见光室内定位过程中,可以利用传感器测得的数据来辅助定位,并提高定位精度。VLIP 系

统中较常用的传感器包括图像传感器、光探测器组合、惯性测量单元和光传感器等,表 3 列出了相关文献中提出的定位技术的精度/误差、成本、复杂度,可以对使用同类型传感器的定位技术之间进行对比评估,同时也可以对使用不同类型的传感器的定位技术之间进行整体比较。

表 3 传感器辅助方法的对比分析
Tab.3 Comparative analysis of sensor-assisted methods

定位技术	文献	主要指标		成本	复杂度
		实验结果	模拟结果		
图像传 感器	[35]	误差:2.26 cm	—	中等	中等
	[36]	—	误差:低于 18 cm	较低	中等
	[37]	精度:3 cm	—	较高	中等
	[38]	精度:7.5 cm	—	中等	较高
	[39]	误差:2.92 cm(天花板高度为 100 cm) 3.54 cm(天花板高度为 150 cm)	—	中等	中等
	[40]	—	—	较低	中等
	[41]	精度:0.4 m	—	较高	较高
光探测器	[42]	—	误差:2.15 cm	中等	较高
	[43]	—	厘米级精度	中等	中等
	[44]	误差:3.20 cm(穷尽法) 14.66 cm(最小二乘法)	—	较低	中等
	[45]	误差:2.63 cm	—	中等	中等
	[46]	误差:4.74 mm(4 个光源) 9.87 mm(2 个光源)	—	中等	较高
	[47]	—	误差:2.15 cm	较低	中等
惯性测量 单元	[31]	误差:4 cm 左右	—	中等	较高
	[48]	误差:5 cm 左右	—	中等	较高
	[49]	精度:2.1 cm	—	中等	较高
	[50]	误差:0.16 m	—	较低	中等
光传感器	[8]	误差:7 cm(静止目标) 12 cm(移动目标)	—	较高	较高
	[20]	误差:小于 0.21 m(低频信号) 小于 0.44 m(高频信号)	—	中等	中等
	[51]	误差:35.5 cm	—	中等	中等
	[52]	精度:25 cm	—	中等	中等

3 VLIP 当前面临的问题与解决方法

尽管 VLIP 技术发展迅速、应用前景广泛,但也面临着许多问题和挑战,主要包括光源闪烁、接收器视野有限、多径效应、环境噪声影响等。下面将结合

相关文献详细介绍 VLIP 面临的问题及其对应的解决方案,并在表 4 中列出相关文献中提出的解决方案的精度/误差、成本和复杂度,从而可以对比评估每个问题的解决方案。

表 4 VLIP 面临问题的解决方案对比分析
Tab.4 Comparative analysis of solutions to problems faced by VLIP

面临的问题	文献	主要指标		成本	复杂度
		实验结果	模拟结果		
LED 光源闪烁	[38]	精度:7.5 cm	—	中等	较高
	[53]	误差:低于 10 cm	—	较高	较高
多径效应	[19]	—	误差:0.19 m	中等	中等
	[24]	误差:6 cm 左右(房间空置) 不超过 14.5 cm(房间有人)	—	中等	较高
	[25]	—	误差:16.49 cm(数据集大小为 10 ⁵) 10.53 cm(数据集大小为 10 ⁶)	中等	较高
	[55]	—	误差:1.74 cm	中等	较高
	[54]	—	误差:0.080 m	中等	中等
	[56]	—	误差:16.59 cm	中等	中等
	[57]	—	误差:2.71 cm	中等	中等
	[30]	—	精度:25 cm(1 个 PD) 5 cm(4 个 PD)	中等	中等

表 4(续)

面临的问题	文献	主要指标		成本	复杂度
		实验结果	模拟结果		
接收器视野有限	[35]	误差:2.26 cm	—	中等	中等
	[36]	—	误差:低于 18 cm	较低	中等
	[46]	误差:4.74 mm(4 个光源)	—	中等	较高
		9.87 mm(2 个光源)			
	[48]	误差:5 cm 左右	—	中等	较高
	[49]	精度:2.1 cm	—	中等	较高
	[53]	误差:低于 10 cm	—	较高	较高
	[58]	误差:低于 5 cm	—	中等	中等
	[59]	误差:4.08 cm	—	中等	中等
	[60]	—	误差:0.6 mm	中等	中等
	[61]	—	误差:低于 3 cm	中等	中等
环境光噪声	[62]	误差:0.2 m 左右	—	中等	中等
	[8]	误差:7 cm(静止的目标)	—	较高	较高
		12 cm(移动的目标)			
	[63]	误差:3.9 mm	—	中等	中等
	[64]	精度:2.95 cm	—	中等	中等
	[65]	误差:3.3 cm(二维平面)	—	较低	中等
		9.6 cm(三维空间)			
	[66]	误差:3.3 cm(开灯、二维平面)	—	中等	中等
		9.6 cm(开灯、三维空间)			
		7.4 cm(关灯、二维平面)			
		20.5 cm(关灯、三维空间)			

3.1 光源闪烁

大多数 VLIP 系统在定位过程中都需要将 LED 的位置信息或者识别码发送给接收端,因此许多系统都会采用 OOK 调制技术来调制信息,并通过控制 LED 的光照强度将信息发送到 VLC 信道中。但是,若 OOK 调制中“On”和“Off”的切换频率太低,就会导致 LED 发生人眼可察的亮度变化,即闪烁问题。对于该问题,当前主要从编码方案和光源改造两个角度提出解决方案:文献[38]中提出的系统使用智能手机的相机作为接收器,提出了一种新的编码方案——交叉 25 码(Interleaved Two of Five,ITF),规定用条纹的宽窄来表示 LED 的“On”和“Off”,因此系统接收端的相机捕获到的图像由明暗交错的宽窄条纹组成,这也表明 LED 是快速地交替“打开”和“关闭”,不会出现长时间“打开”或者“关闭”的现象,有效缓解了闪烁问题;文献[53]中利用偏振光不会被人眼所察觉的特性,提出了一种基于光偏振的 VLIP 系统,在发射端和接收端分别添加一个偏振器,发射端的偏振器将非偏振光转换为偏振光,并通过控制电压的变化来调制偏振光,使得光线经过

接收端的偏振器之后出现明暗变化,并被相机所捕获,完成对 LED 标识符信息的传输。该系统对相机的要求较低,实时定位精度可达 10 cm,且适用于智能手机和穿戴设备。

3.2 多径效应

在可见光定位过程中,室内的墙面、天花板、镜子等物体都会导致光信号出现反射、折射等现象,产生多径效应,从而对定位精度产生影响,一般房间角落处和边缘处的定位精度受到多径效应的影响最大。大多数文献中都将多径反射视为噪声并通过使用特殊的调制技术、算法或者建立模型来减轻多径效应的不良影响,从而将定位误差降低几厘米到几十厘米不等;文献[54]中使用混合 OFDM 技术来抑制多径效应,使得平均定位误差从 0.792 m 降低到 0.118 m;文献[19]中利用基于椭圆的 ACO-OFDM 技术来调制信息,将平均定位误差从 0.30 m 降低到 0.23 m;文献[24]将参考点在视距信道中的接收的信号功率和实际接收到的信号功率的比值作为指纹信号,再结合在线阶段目标设备测量到的光信号功率来排除实际定位过程中非视距信道中的干扰,

和传统的基于 RSS 的指纹定位法相比,定位误差降低了 59%;文献[55]中提出了一种基于极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)和基于密度的噪声应用空间聚类(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN)的混合定位方法来抑制房间墙壁和角落处的多径效应,使得整个房间的定位误差从 11.97 cm 降低到 1.74 cm;文献[56]中针对视距通信中的噪声干扰和非视距通信中的多径反射,提出了一种混合噪声和多径反射的高斯模型,与同类算法相比,最终定位误差降低了 26.42%;文献[57]中提出了一种消除镜面反射的算法,虽然只考虑了单个镜面的情况,但是在一定程度上仍减轻了房间内的镜面物体反射对定位精度造成的影响,模拟结果表明,定位误差从 16.25 cm 减少到 2.71 cm。

有些研究中并不将多径信号视为噪声干扰,而是利用其来实现定位或提高定位精度:文献[25]中通过量化非视距链路中的信息来提升定位目标的位置和方向的测量精度;文献[30]中采用红外光电探测器作为接收器并将其安装在天花板上,在定位过程中利用上行信道脉冲响应的漫射分量进行定位,当室内存在 4 个 LED 光源时,定位精度可达 5 cm。

3.3 接收器视野有限

二维平面中通常需要 3 个 LED 来实现定位,而三维空间则需要更多的 LED 才能实现高精度的定位,但接收器的视野有限,很难同时捕捉到来自 3 个或 4 个 LED 光源的信号,因此就无法获得较高的定位精度甚至无法实现定位。此外,如果接收端和 LED 之间的垂直距离在定位过程中减小,接收器的视野也会受影响。若仅仅通过增加接收器的视野来解决此问题,那么又会在定位过程中引入噪声干扰,降低信噪比。

对于该问题,部分研究通过使用加速度计、图像传感器、IMU 等设备来获取其他定位信息,以增加定位约束,从而确保实现较高精度的定位:文献[48-49]中使用由 IMU 和相机组成的接收器,并利用扩展卡尔曼滤波器将两者的测量值相结合,从而实现在仅有一个 LED 或者 LED 光源中断情况下的三维实时定位;文献[53]中使用加速度计来测量照相机和重力之间的倾斜角度,并将该角度和相机捕获到的信息整合到同一智能设备中从而增加定位约束,仅使用两个 LED 就可以实现三维实时定位;文献[58]中提出了一种相机协助的增强接收信号比算法,将视觉信息和光信号强度相结合,在有限的视

野范围内仅使用 3 个 LED 就能实现三维室内空间中的高精度定位,获得了低于 5 cm 的定位误差;文献[59]中使用混合成像光电二极管作为接收器,该接收器的 PD 部分负责测量每个 LED 的 AOA,图像传感器部分负责拍摄高分辨率的图像,以便识别出每个 LED 中的参考点,因此该系统的接收器视野中仅使用一个 LED 也可实现定位。

有些研究提出使用具有特殊结构的接收器来消除接收器视野的限制:文献[46]中使用的是由多个 PD 组成的接收器,与基于单个 PD 的系统相比,该系统仅需两个 LED 就可以实现较高精度定位;文献[60]中通过将图像传感器倾斜一定的角度来接收至少来自 3 个 LED 光源发出的信号,降低房间角落处的定位误差,增加有效定位区域的面积;文献[61]中采用智能光电二极管作为接收器,在定位过程中根据其所处的 LED 照明范围中的位置来旋转其接收面,调整视野范围,从而接收尽可能多的 LED 光源信号。

此外,还可以通过使用特殊的 LED 或基于单个 LED 的定位方法来解决该问题:文献[35]中提出了一种不平衡的单 LED 定位方法,该算法设计并使用了一个带有信标的 LED,利用成像三角关系实现了高精度、低复杂度定位;文献[36]中提出一种由 VLC 辅助的透视四线算法,先根据平面几何和立体几何关系得到单个 LED 在相机坐标系下的坐标,然后再利用最小二乘法 and 单视图几何算法得到相机在世界坐标系中的位置和姿势;文献[62]中使用可转向的 LED 作为发射器,在定位过程中首先利用某个固定角度的光源得到定位目标位置的初始值,然后根据这个初始值以及迭代算法来调整 LED 的角度,调节其照明覆盖范围,降低接收端视野受限带来的定位误差。

3.4 环境光噪声

现实室内场景中并不具备实验室环境下的理想照明条件,接收端不仅会接收到 LED 发出的光信号,还会受到环境光的干扰。对于环境光噪声这一问题,可以利用滤波器技术或者设计特定的算法来减轻其对定位精度和系统稳定性的不良影响:文献[63]和[64]中分别使用卡尔曼滤波器和粒子滤波器对接收到的信号进行处理,有效解决了环境光对信号造成干扰的问题,提高了定位精度和系统的稳定性;文献[65]中通过计算无噪声干扰的情况下和有噪声干扰的情况下的接收端和发射端之间的距离的差值来补偿环境光带来的噪声影响,最高可将定

位误差降低几十厘米,该方法不仅显著降低了太阳光引起的定位误差,且不会增加算法的计算复杂度。

有些定位系统中并不把环境光看作是干扰源,而是利用环境光作为光源,解决了白天关闭 LED 灯的情况下的定位问题:文献[8]中提出了一种基于环境光的 VLIP 系统,该系统在现有的照明结构基础上使用光传感器来检测定位目标在光传感器附近移动时环境光的强度变化,从而利用指纹定位法来确定定位目标的位置,并获得了厘米级的定位精度;文献[66]中提出的系统同样也是直接使用环境光来定位,但不需要使用额外的传感器,只需要将由偏光片和双折射材料制成的芯片覆盖在灯罩或者透光的玻璃窗上,并为芯片建立方向和色调值之间的映射,定位时根据图像传感器捕获的照片中的芯片即可计算出定位目标的位置和方向。

4 结束语

现阶段 VLIP 技术虽然已经取得一定的发展,但若要在未来 6G 愿景下应用部署,并且满足定位需求,还需要深入研究。

为了加快实际应用部署 VLIP 的速度,未来研究工作可以从 3 个方面入手:

一是将 VLIP 技术和其他无线定位技术相结合。现有的基于蓝牙、WLAN、移动射频等无线定位技术都已经比较成熟,而 VLIP 技术还处于理论阶段,将两者相结合可以有效地提高通信速率和定位精度,使得 VLIP 系统能尽快应用在实际环境中。

二是在实验中不断改进当前定位方法。目前提出的大部分定位方法都是在理想室内环境中实现的,但在实际定位过程中会出现很多不确定的干扰因素,现有的方法并不能保证定位成功。

三是根据目前的研究进展设计专门用于 VLIP 的发射器或接收器,从而减少噪声干扰,提高定位系统性能。

参考文献:

[1] 迟楠. LED 可见光通信技术[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[2] 迟楠,陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程,2020,47(3):1-12.

[3] CHI N, ZHOU Y J, WEI Y R, et al. Visible light communication in 6G: advances, challenges, and prospects[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020,15(4):93-102.

[4] 中国半导体照明网. LED 可见光通信室内定位 智能

照明应用新蓝海[EB/OL]. (2018-02-09)[2022-10-11]. https://www.sohu.com/a/221901984_238804?qq-pf-to=pcqq.c2c.

[5] 中国电子技术标准化研究院,深圳市海思半导体有限公司,清华大学,等. 信息技术系统间远程通信和信息交换可见光通信第 4 部分:室内定位传输协议:GB/T 36628.4-2019[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2019:1-23.

[6] LI Z, SHI T, SHAN B, et al. Color-shift keying code design in visible light communications using finite-state machines[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(6):1333-1337.

[7] CHEN H, WEN S, WANG X, et al. Color-shift keying for optical camera communication using a rolling shutter mode[J]. IEEE Photonics Journal, 2019,11(2):1-8.

[8] FAULKNER N, ALAM F, LEGG M, et al. Watchers on the wall: passive visible light-based positioning and tracking with embedded light-sensors on the wall[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020,69(5):2522-2532.

[9] MAJEED K, HRANILOVIC S. Passive indoor localization for visible light communication systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference. Abu Dhabi:IEEE,2018:1-6.

[10] SHAO S H, KHREISHAH A, KHALIL I. Enabling real-time indoor tracking of IoT devices through visible light retroreflection[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020,19(4):836-851.

[11] 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.

[12] MAI Q, HSU C L. Navigation system for indoor parking based on visible light communication[J]. Sensors and Materials, 2020,32(6):2031-2043.

[13] GLIGORIC K, AJMANI M, VUKOBRATOVIC D, et al. Visible light communications-based indoor positioning via compressed sensing[J]. IEEE Communications Letters, 2018,22(7):1410-1413.

[14] XIE C Y, GUAN W P, WU Y X, et al. The LED-ID detection and recognition method based on visible light positioning using proximity method[J]. IEEE Photonics Journal, 2018,10(2):1-16.

[15] ZHAO H X, WANG J T. A novel three-dimensional algorithm based on practical indoor visible light positioning[J]. IEEE Photonics Journal, 2019,11(3):1-8.

[16] AKIYAMA T, SUGIMOTO M, HASHIZUME H. Time-of-arrival-based smartphone localization using visible light communication[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Sapporo:IEEE,2017:1-7.

[17] GHIMIRE B, SEITZ J, MUTSCHLER C. Indoor positioning using OFDM-based visible light

- communication system [C]//Proceedings of 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Nantes:IEEE,2018:1-8.
- [18] DU P F,ZHANG S,CHEN C,et al. Demonstration of a low-complexity indoor visible light positioning system using an enhanced TDOA scheme[J]. IEEE Photonics Journal,2018,10(4):1-10.
- [19] LI H X,WANG J,ZHANG X F,et al. Indoor visible light positioning combined with ellipse-based ACO-OFDM [J]. IET Communications,2018,12(17):2181-2187.
- [20] SATO T,SHIMADA S,MURAKAMI H,et al. ALiSA: a visible-light positioning system using the ambient light sensor assembly in a smartphone [J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(6):4989-5000.
- [21] STEENDAM H,WANG T Q,ARMSTRONG J. Cramer-Rao bound for AOA-based VLP with an aperture-based receiver[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications. Paris:IEEE,2017:1-5.
- [22] DE-LA-LLANA-CALVO A, LAZARO-GALILEA J L, GARDEL-VICENTE A,et al. Indoor positioning system based on LED lighting and PSD sensor[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Pisa:IEEE,2019:1-8.
- [23] CINCOTTA S, NEILD A, HE C,et al. Visible light positioning using an aperture and a quadrant photodiode [C]//Proceedings of 2017 IEEE Globecom Workshops. Singapore:IEEE,2017:1-6.
- [24] HUANG C,ZHANG X,ZHOU F,et al. NLOS-aware VLC-based indoor localization: algorithm design and experimental validation[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Seoul,Korea:IEEE,2020:1-7.
- [25] ARFAOUI M A,SOLTANI M D,TAVAKKOLNIA I,et al. Invoking deep learning for joint estimation of indoor LiFi user position and orientation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2021,39(9):2890-2905.
- [26] VAN M T,TUAN N V,SON T T,et al. Weighted k-nearest neighbour model for indoor VLC positioning[J]. IET Communications,2017,11(6):864-871.
- [27] ALAM F,CHEW M T,WENGE T,et al. An accurate visible light positioning system using regenerated fingerprint database based on calibrated propagation model [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2019,68(8):2714-2723.
- [28] ZHANG S,LIU K,ZHANG Y,et al. A coarse fingerprint-assisted multiple target indoor device-free localization with visible light sensing [J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(2):1461-1473.
- [29] BASTIAENS S,PLECTS D,MARTENS L,et al. Response adaptive modelling for reducing the storage and computation of RSS-based VLP [C]//Proceedings of 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Nantes:IEEE,2018:1-8.
- [30] HOSSEINIANFAR H,NOSHAD M,BRANDT-PEARCE M. Positioning for visible light communication system exploiting multipath reflections[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications. Paris:IEEE,2017:1-6.
- [31] NIU G,ZHANG J,GUO S,et al. UAV-enabled 3D indoor positioning and navigation based on VLC [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications. Montreal:IEEE,2021:1-6.
- [32] OTHMAN R,GAAFAR A,MUAAZ L,et al. A hybrid RSS+ AOA indoor positioning algorithm based on visible light communication [C]//Proceedings of 2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering. Osaka:IEEE,2021:1-5.
- [33] 曹阳,党宇超,彭小峰,等. TOA/RSS 混合信息室内可见光定位方法[J]. 中国激光,2021,48(1):127-135.
- [34] 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.
- [35] LI H P,HUANG H B,XU Y Z,et al. A fast and high-accuracy real-time visible light positioning system based on single LED lamp with a beacon[J]. IEEE Photonics Journal,2020,12(6):1-12.
- [36] BAI L,YANG Y,FENG C,et al. Novel visible light communication assisted perspective-four-line algorithm for indoor localization[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei,Taiwan:IEEE,2020:1-6.
- [37] CHEN G,CHEN W,YANG Q,et al. A novel visible light positioning system with event-based neuromorphic vision sensor[J]. IEEE Sensors Journal,2020,20(17):10211-10219.
- [38] FANG J B,YANG Z,LONG S,et al. High-speed indoor navigation system based on visible light and mobile phone[J]. IEEE Photonics Journal,2017,9(2):1-11.
- [39] 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):1-9.
- [40] CARVER C,WU S,ROGERS A,et al. Indoor localization through visible light characterization using front-facing smartphone camera[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Orlando:IEEE,2017:575-579.
- [41] SHIMADA S,HASHIZUME H,SUGIMOTO M. Indoor positioning using reflected light and a video camera [C]//Proceedings of 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Nantes:IEEE,2018:1-8.
- [42] SHEN S Q,LI S Y,STEENDAM H. Simultaneous position and orientation estimation for visible light systems with multiple LEDs and multiple PDs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2020,38(8):1866-1879.

- [43] WANG L, GUO C. Indoor visible light localization algorithm with multi-directional PD array [C]// Proceedings of 2017 IEEE Globecom Workshops. Singapore:IEEE,2017:1-6.
- [44] ZHU B C, CHENG J L, WANG Y J, et al. Three-dimensional VLC positioning based on angle difference of arrival with arbitrary tilting angle of receiver [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018,36(1):8-22.
- [45] JIN J L, FENG L F, WANG J P, et al. Signature codes in visible light positioning [J]. IEEE Wireless Communications, 2021,28(5):178-184.
- [46] BAKAR A H A, GLASS T, TEE H Y, et al. Accurate visible light positioning using multiple-photodiode receiver and machine learning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021,70:1-12.
- [47] YU X, WANG J, LU H. Single LED-based indoor positioning system using multiple photodetectors [J]. IEEE Photonics Journal, 2018,10(6):1-8.
- [48] LIANG Q, LIN J, LIU M. Towards robust visible light positioning under LED shortage by visual-inertial fusion [C]// Proceedings of 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Pisa:IEEE, 2019:1-8.
- [49] GUAN W, HUANG L, HUSSAIN B, et al. Robust robotic localization using visible light positioning and inertial fusion [J]. IEEE Sensors Journal, 2022,22(6):4882-4892.
- [50] HAO J, CHEN J, WANG R. Visible light positioning using a single LED luminaire [J]. IEEE Photonics Journal, 2019,11(5):1-13.
- [51] ABE K, SATO T, WATANABE H, et al. Smartphone positioning using an ambient light sensor and reflected visible light [C]// Proceedings of 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. LLORET DE MAR:IEEE, 2021:1-8.
- [52] WANG Z Y, YANG Z C, HUANG Q Y, et al. ALS-P:light weight visible light positioning via ambient light sensor [C]// Proceedings of 2019 IEEE Conference on Computer Communications. Paris:IEEE, 2019:1306-1314.
- [53] YANG Z C, WANG Z Y, ZHANG J S, et al. Polarization-based visible light positioning [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019,18(3):715-727.
- [54] WANG J, LI H, ZHANG X, et al. VLC-based indoor positioning algorithm combined with OFDM and particle filter [J]. China Communications, 2019,16(1):86-96.
- [55] LIU R, LIANG Z, YANG K, et al. Machine learning based visible light indoor positioning with single-LED and single rotatable photo detector [J]. IEEE Photonics Journal, 2022,14(3):1-11.
- [56] XU S, WU Y, WANG X, et al. Indoor 3D visible light positioning system based on adaptive parameter particle swarm optimisation [J]. IET Communications, 2020,14(20):3707-3714.
- [57] ZHANG W, FENG L, CHE P. Research on visible light indoor positioning technique using two light sources and specular reflection cancellation [J]. IET Communications, 2019,13(7):842-847.
- [58] BAI L, YANG Y, ZHANG Z, et al. A high-coverage camera assisted received signal strength ratio algorithm for indoor visible light positioning [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,20(9):5730-5743.
- [59] CINCOTTA S, NEILD A, ARMSTRONG J. Luminaire reference points (LRP) in visible light positioning using hybrid imaging-photodiode (HIP) receivers [C]// Proceedings of 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Pisa:IEEE, 2019:1-8.
- [60] FU M, ZHU W, LE Z, et al. Improved visible light communication positioning algorithm based on image sensor tilting at room corners [J]. IET Communications, 2018,12(10):1201-1206.
- [61] SHEORAN S, GARG P, SHARMA P K. Location tracking for indoor VLC systems using intelligent photodiode receiver [J]. IET Communications, 2018,12(13):1589-1594.
- [62] LAM E W, LITTLE T D C. Angle diversity to increase coverage and position accuracy in 3D visible light positioning [C]// Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications. Shanghai:IEEE, 2019:1-7.
- [63] CAI Y, GUAN W, WU Y, et al. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using particle swarm optimization [J]. IEEE Photonics Journal, 2017,9(6):1-20.
- [64] WU Y, GUAN W, ZHANG X, et al. Visible light positioning system based on CMOS image sensor using particle filter tracking and detecting algorithm [J]. Optics Communications, 2019,444:9-20.
- [65] COSTANZO A, LOSCRI V. Visible light indoor positioning in a noise-aware environment [C]// Proceedings of 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Marrakesh:IEEE, 2019:1-6.
- [66] LI L, XIE P, WANG J. Enabling 3D ambient light positioning with mobile phones and battery-free chips [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021,20(3):952-964.

作者简介:

陈静 女,1999 年生于江苏淮安,2021 年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为可见光组网与定位技术。

刘旋 男,1985 年生于山东济宁,2020 年获博士学位,现为讲师、硕士生导师,主要研究方向为未来组网与内容安全。

郑杰 男,2002 年生于江苏盐城,本科生,主要研究方向为基于可见光的信息发布技术。