

基于辅助标记的单 LED 信标可见光定位系统

卫飞龙,李兴广*,崔炜,田旭宇

(长春理工大学 电子信息工程学院,长春 130022)

摘要:针对室内可见光定位(VLP)一般需要多个发光二极管(LED)信标的问题,提出一种基于单个 LED 信标和单个互补金属氧化物(CMOS)传感器的高鲁棒性三维 VLP 系统。使用额外标记且可调制的 LED 信标作为 VLP 系统的发射器,CMOS 传感器作为接收器,采集到的图像被视为一个带有几何特征的椭圆。对采集到的图像进行特征提取与椭圆光斑解调以识别预定信息,结合单目测距和到达角(AOA)算法求解出待定位点的位置坐标。通过实验评估了 VLP 系统的性能,在 $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的区域内平均定位精度为 9.7 cm,置信度为 80% 时可实现 13.1 cm 的定位误差。

关键词:可见光定位;单发光二极管信标;互补金属氧化物传感器;三维定位

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)08-0043-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Visible light position system based on single LED beacon with aided marker

WEI Feilong, LI Xingguang*, CUI Wei, TIAN Xuyu

(School of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem that indoor visible light positioning (VLP) generally requires multiple light emitting diode (LED) beacons, a high robustness three-dimensional VLP system based on a single LED beacon and a single complementary metal oxide semiconductor (CMOS) sensor is proposed. A modifiable LED beacon with mark on the edge is used as transmitter, CMOS sensors as receiver for VLP systems and the collected image is regarded as an ellipse with geometric features. Perform feature extraction and demodulation of the elliptical light spot on the acquired image to identify predetermined information, and the undetermined position is solved by combining the monocular ranging and the angle of arrival (AOA) algorithm. The performance of the proposed VLP system is evaluated by experiments. The average positioning accuracy is 9.7 cm in the region of $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2\text{ m}$, and the positioning error of 13.1 cm with 80% confidence can be achieved.

Key words: visible light positioning; single light emitting diode beacon; complementary metal oxide semiconductor sensor; three-dimensional positioning

0 引言

为满足室内定位需求,无线网络(WiFi)、紫蜂(Zig-

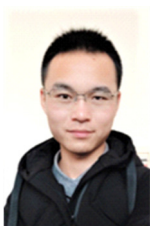
Bee)、蓝牙和超宽带(UWB)等射频定位技术得到了空前的发展,但其中大多数定位方法不能提供较高的定位精度,且有抗电磁干扰小、较依赖额外设备导致成本略高的问题,不能满足大规模应用的需求^[1]。基于发光二极管(LED)的可见光定位(VLP)技术是在可见光通信(VLC)的基础上利用 LED 信标的位置及其发出光信号所携带的信息对目标接收器进行定位的,具有成本低、无需频谱许可和无射频电磁干扰等优点^[2],加上 LED 的广泛使用,VLP 技术在室内定位和导航中越来越流行。

在相关研究中,接收端采用光电检测器(PD)的定位方法因多径效应的影响而易受外界干扰,而采用互

收稿日期:2020-01-13。

基金项目:吉林省重点科技研发项目(20180201042G X)资助;吉林省重点科技攻关项目(20170204019G X)资助。

作者简介:卫飞龙(1996—),男,硕士研究生,现就读于长春理工大学电子信息工程学院信息与通信工程专业,主要从事复杂环境下的位置感知技术和可见光通信方面的研究工作。参与的项目包括吉林省重点科技攻关项目《智能消防头盔关键技术研究》和吉林省产业技术研发专项《基于 UWB 的作业车间呼叫与位置感知系统》。



*通信作者:李兴广(E-mail:lixingguang@cust.edu.cn)。

得LED信标的ID^[10],通过查找ID数据库获得参考的LED信标在世界坐标系中的位置 M 。同时,在灰度图像中使用Sobel算子提取出LED信标的边缘像素点,并基于最小二乘拟合求解与这些边缘点最佳匹配的椭圆^[11]。这部分图像的采集需要满足LED信标的中心与成像平面的中心重合,即需要满足CMOS传感器平面的法向量 $\vec{n} \cdot \overrightarrow{QQ'} = 0$ 。进而,根据拟合出的椭圆光斑可以提取出其几何特征,例如长轴像素长度、短轴像素长度和椭圆中心点的像素坐标等。

在第三部分中,利用从圆形LED信标的椭圆光斑图像中提取的几何特征等参数来估计CMOS传感器在世界坐标系中的3D位置坐标,下文将具体介绍算法推导与说明。

2 单LED信标定位算法

假设系统的LED信标平行于水平地面,其在水世界坐标系中的位置坐标为 $M(x_M^w, y_M^w, z_M^w)$,且对应唯一的ID进行编码、调制与广播,需要推导CMOS传感器在水世界坐标系中的位置坐标 $N(x_N^w, y_N^w, z_N^w)$,其中上标 w 表示世界坐标系。

在定位时,通过对CMOS传感器采集到的图像进行处理,提取带标记的椭圆光斑图像。同时,在图像中建立像素坐标系,在像素坐标系中可以得到标记坐标 $P'(x_p^p, y_p^p)$ 、靠近标记的长轴顶点坐标 $A(x_A^p, y_A^p)$ 、短轴顶点坐标 $B(x_B^p, y_B^p)$ 和椭圆光斑中心 $Q'(x_Q^p, y_Q^p)$,其中上标 p 表示像素坐标系。椭圆半长轴 a 和半短轴 b 的像素长度分别为:

$$a = |\overrightarrow{AQ'}| \quad (1)$$

$$b = |\overrightarrow{BQ'}| \quad (2)$$

定义椭圆倾斜因子 λ ,其值为:

$$\lambda = b/a \quad (3)$$

根据CMOS传感器采集图像时的位置约束条件 $\vec{n} \cdot \overrightarrow{QQ'} = 0$,可以求出CMOS传感器相较于平面 xoy 的倾斜角度为:

$$\alpha = \arccos \lambda \quad (4)$$

根据图1的几何特征,容易得出CMOS传感器相较于LED信标在 z 轴负方向上的偏离角 $\theta = \alpha$,即求出了AOA算法中的第一个角。

对于AOA算法的第二个角 φ ,需要借助增加的标

记进行求解。在图像中,定义标记的偏离角 β 为直线 $Q'P'$ 与其相邻椭圆半长轴的夹角(如图1所示),其大小为:

$$\beta = \arccos \frac{|\overrightarrow{Q'P'} \cdot \overrightarrow{Q'A}|}{|\overrightarrow{Q'P'}| \cdot |\overrightarrow{Q'A}|} \quad (5)$$

但是,要求解的是CMOS传感器相较于LED信标的偏向角 φ ,在图1中显示为CMOS传感器与LED信标的连接向量 $\overrightarrow{QQ'}$ 在 xoy 平面的投影 $\overrightarrow{QQ'}$ 与 $\overrightarrow{QP'}$ (也可称为与 $\overrightarrow{ox}$)的夹角。此时,引入一个过度角 ϕ , ϕ 的值为:

$$\phi = \arccos \frac{|\overrightarrow{QP'}| \cos \beta}{\alpha} \quad (6)$$

根据待定位点 N 在水世界坐标系中的位置不同,偏向角 φ 的取值也不相同。本文通过实验与推算证实了偏向角 φ 在 $[0, 2\pi)$ 范围下可分成4个区域,在4个区域下推导出 φ 和 ϕ 的关系,即 $\varphi \in \{\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}, \Phi_{IV}\} = \{[0, \pi/2), [\pi/2, \pi), [\pi, 3\pi/2), [3\pi/2, 2\pi)\}$ 下,其数学关系为:

$$\varphi = \begin{cases} \pi/2 - \phi, N \in \Phi_I \\ \pi/2 + \phi, N \in \Phi_{II} \\ 3\pi/2 - \phi, N \in \Phi_{III} \\ 3\pi/2 + \phi, N \in \Phi_{IV} \end{cases} \quad (7)$$

其中, N 为待定位点的位置, Φ_I 、 Φ_{II} 、 Φ_{III} 和 Φ_{IV} 为待定位点 N 在水世界坐标系中相对于其参考LED信标 M 划分的4个象限区域。从而求解出偏向角 φ 。

基于图1并结合单目测距算法和AOA算法,可以得出关系式(8)~式(10):

$$\tan \theta = \left| \frac{y_Q^w}{z_Q^w} \right| \quad (8)$$

$$\tan \varphi = \left| \frac{y_Q^w}{x_Q^w} \right| \quad (9)$$

$$\left(x_Q^w\right)^2 + \left(y_Q^w\right)^2 + \left(z_Q^w\right)^2 = d^2 \quad (10)$$

其中,式(8)~式(10)中的 x_Q^w 、 y_Q^w 和 z_Q^w 表示世界坐标系中待定位点 N 相对于参考LED信标在 x 、 y 和 z 轴3个方向上的变化量,且为矢量。测量距离 $d = |\overrightarrow{QQ'}|$,由文献[12]中的单目视觉测距算法获得,并且在使用前对测量距离和实际距离进行线性拟合,以减小测距误差,通过实验得到在3 m范围内最大测距误差为5 cm。

由式(8)~式(10),求解出变化量 x_Q^w 、 y_Q^w 和 z_Q^w :

$$\begin{cases} x_Q^w = \begin{cases} \frac{d}{\sqrt{\omega} \tan \varphi}, N \in \{\Phi_I, \Phi_{II}\} \\ \frac{-d}{\sqrt{\omega} \tan \varphi}, N \in \{\Phi_{III}, \Phi_{IV}\} \end{cases} \\ y_Q^w = \begin{cases} \frac{d}{\sqrt{\omega}}, N \in \{\Phi_I, \Phi_{II}\} \\ \frac{-d}{\sqrt{\omega}}, N \in \{\Phi_{III}, \Phi_{IV}\} \end{cases} \\ z_Q^w = \frac{-d}{\sqrt{\omega} \tan \varphi}, N \in \{\Phi_I, \Phi_{II}, \Phi_{III}, \Phi_{IV}\} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\omega=1+\cot^2\theta+\cot^2\varphi$, 结合参考 LED 信标 M 的初始位置 (x_M^w, y_M^w, z_M^w) , 可以求出待定位点 N 的位置坐标 (x_N^w, y_N^w, z_N^w) 。为更好的表示坐标间的对应关系,下文用矩阵表示出信标 M 和待定位点 N 的偏移关系:

$$\begin{bmatrix} x_N^w \\ y_N^w \\ z_N^w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M^w \\ y_M^w \\ z_M^w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_Q^w \\ y_Q^w \\ z_Q^w \end{bmatrix} \quad (12)$$

基于式(12),可以估计待定位点的 3D 位置坐标,同时,本文提出的算法还能适用于多个 LED 信标的情况。通过空间复用技术,图像中不同 LED 信标的投影可以通过 CMOS 传感器的卷帘快门效应和接收器中相应的滤波技术来提取。此外,理论上每个 LED 信标可以确定接收器的一个 3D 位置,对于同一位置多个定位结果,可以通过最小化线性均方误差(MMSE)的优化过程来实现最终的定位结果^[13,14]:

$$(x^w, y^w, z^w) = \underset{x^w, y^w, z^w}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n \left((x^w - x_i^w)^2 + (y^w - y_i^w)^2 + (z^w - z_i^w)^2 \right) \quad (13)$$

其中, (x^w, y^w, z^w) 表示世界坐标系中待定位点 N 最终的位置坐标; (x_i^w, y_i^w, z_i^w) 表示世界坐标系中根据第 i 个 LED 信标定位的结果; n 是图像中捕获的参考 LED 信标的数量。

3 实验设置

3.1 实验方案

对于 VLP 系统的研究,除了需要进行理论研究(如关键技术方面),还需要搭建 VLP 平台验证这些理论研究的可行性,为后续研究的推进以及技术的推广和应用奠定基础^[15]。通常室内建筑高度约为 3 m,用户手持的相机高度约为 1 m,因此本文的实验测试场地大小选择 1.8 m×1.8 m×2 m,LED 信标布置在测试场

地的天花板上且平行于水平面,其分布图如图 3 所示。定义其世界坐标系中的坐标为(0,0,3)。实验所用的 LED 信标是经过稍微修改的商用 LED 平板灯,切断了 LED 平板灯和直流变压器之间的电源线,并将其连接到信号发生模块上,其中信号发生模块由微控制器 STM32F103 和 LED 信标驱动电路组成。接收端使用 MI 8SE 前置摄像头。实验系统具体参数如表 1 所示。

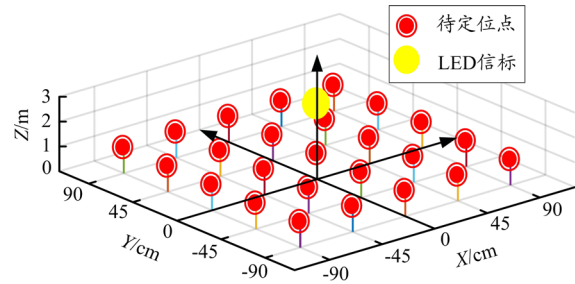


图3 测试点分布图

表1 实验系统参数

LED 信标参数	数值	CMOS 传感器参数	数值
功率	20 W	型号	MI 8 SE
LED 信标直径	22.5 cm	分辨率	1920 px×1080 px
发光部分直径	21 cm	帧率	30 f/s
标记直径	1 cm	光圈	f/2.2
调制频率	400 Hz	—	—

在实验区域内每隔 45 cm 选择一个测试点(如图3所示),所有测试点离 LED 信标的垂直高度为 2 m,本文共设置 25 个测试点,为降低随机误差影响,每个测试点的定位结果是其测量 10 次的平均值。定义定位误差和平均定位误差表达式分别为:

$$\text{error}(i) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (14)$$

$$\text{avgeror} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{error}(i) \quad (15)$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 和 (x, y, z) 分别表示实际坐标和理论坐标, n 为测试点总数。

3.2 实验结果与分析

由于实验条件所限,在无法使用系统自动测数的情况下,本文采用人工测试,实验测试结果如表 2 所示。可以看出,本文提出的定位算法能实现厘米级定位精度,最小定位误差为 2.4 cm,最大误差为 15.6 cm,平均定位误差为 9.7 cm。

为了直观观测各点的定位结果,本文根据表 2 的数据作出待定位点的定位误差显示图,如图 4 (a)所

表 2 25 个待定位点测试结果

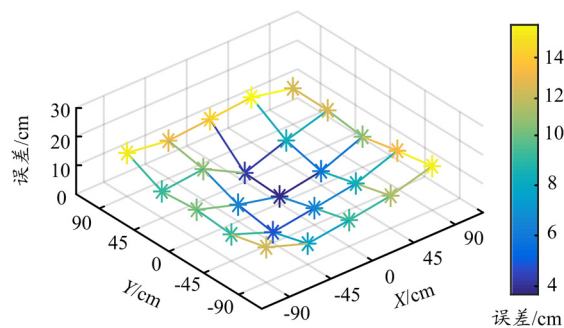
待定位点	实际坐标/cm	显示坐标/cm	误差/cm
1	(-90, -90, 100)	(-86.3, -98.9, 92.5)	12.2
2	(-45, -90, 100)	(-49.2, -88.4, 94.4)	7.2
3	(0, -90, 100)	(2.2, -94.5, 92.4)	9.1
4	(45, -90, 100)	(38.2, -97.1, 105.6)	11.3
5	(90, -90, 100)	(95.2, -87.3, 85.9)	15.3
...	...	...	...
13	(0, 0, 100)	(-0.4, -1.1, 97.9)	2.4
...	...	...	...
21	(-90, 90, 100)	(-96.5, 85.1, 112.7)	15.1
22	(-45, 90, 100)	(-42.0, 82.8, 110.5)	13.1
23	(0, 90, 100)	(4.8, 87.0, 86.9)	14.3
24	(45, 90, 100)	(44.3, 81.5, 113.1)	15.6
25	(90, 90, 100)	(95.3, 100.7, 103.7)	12.5

示。可以看出, LED 信标和 CMOS 传感器之间的欧式距离越远, 定位误差就越大, 当 CMOS 传感器在 LED 信标正下方时可以获得最小的定位误差。文献 [9] 中 IMU 和 CMOS 融合的 VLP 算法的定位误差如图 4(b) 所示, 其最小定位误差为 3.2 cm, 最大误差为 16.8 cm, 平均定位误差为 11.3 cm。对比以上结果可以知道, 本文算法得出的最小、最大和平均定位误差都低于文献[9]中算法得出的结果, 证明了本文算法在定位精度上的优越性。

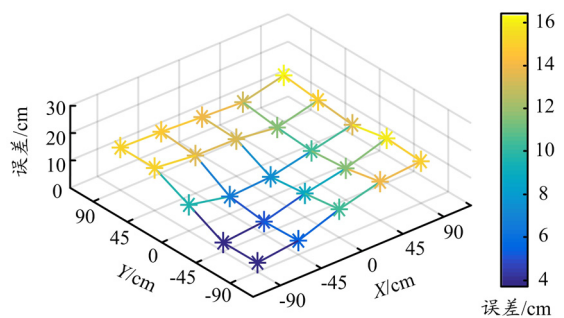
以上 2 种算法在 3D 定位时的误差累积分布函数 (CDF) 值如图 5 所示。可以看出, 当 CDF 值为 0.8 (即置信度为 80%) 时, 本文可实现 13.1 cm 的定位误差, 优于文献[9]中的 15.3 cm 定位误差, 并且本文不需要 IMU 进行辅助, 减少了硬件的使用, 降低算法复杂度, 证明了本文算法的优越性。

经过分析, 本文出现实验误差主要有 3 个原因。

① LED 信标未能与地面平行, 这在做实验时属于硬件误差, 较难控制; ② 使用单目视觉测距时会存在测距误差, 根据式 (10) 可知, 距离数据在定位算法中起着关键性的作用, 测距误差直接影响定位误差; ③ 本文使用的图像分辨率为 1920 px × 1080 px, 而 CMOS 传感器采集图像的分辨率对图像质量, 特别是像素坐标影



(a) 本文定位误差



(b) 文献[9]定位误差

图 4 定位误差

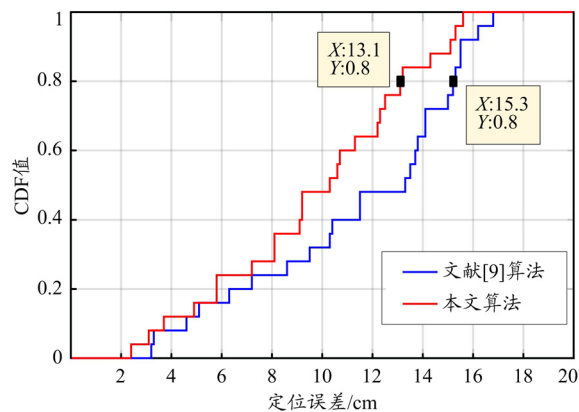


图 5 定位误差的 CDF 值

响较大, 较小的分辨率会造成像素点的坐标精度不够高, 从而使 VLP 系统存在较大的定位误差^[16]。

4 结束语

鲁棒性和定位精度是 VLP 系统的重要性能指标, 如何在一个 LED 信标的情况下进行 3D 定位并保证较高的定位精度对 VLP 系统至关重要。本文以室内 VLC 系统为背景研究了提高 VLP 系统鲁棒性和定位精度的算法, 提出了单 LED 信标和单 CMOS 传感器的 VLC 系统。通过实验对提出的单 LED 信标 VLP 系统

卫飞龙,李兴广,崔炜,等:基于辅助标记的单LED信标可见光定位系统

性能及定位精度进行验证,结果表明在 $1.8\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的区域内平均定位精度为 9.7 cm ,置信度为 80% 时可实现 13.1 cm 的定位误差,证实了所提算法能在单LED信标下进行定位和拥有较高的定位精度。由于室内LED信标的广泛部署,需要定位的室内环境中通常自带基站,不需要额外安装。因此,基于可见光的定位算法明显优于其它定位算法,其中又以本文提出的单LED信标定位算法更优。基于该算法的VLC系统具有低成本、高鲁棒性和高精度的优势,在大型商场、医院有着广阔的前景。

参考文献:

- [1] 成湘,白元涛,郭鑫,等. 基于改进粒子群优化算法的可见光室内定位技术[J]. 光通信技术,2019,43(4):8-11.
- [2] KESKIN M F, SEZER A D, GEZICI S. Optimal and Robust Power Allocation for Visible Light Positioning Systems Under Illumination Constraints[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 527-542.
- [3] HOSSEN M S, PARK Y, KIM K D. Performance improvement of indoor positioning using light-emitting diodes and an image sensor for light-emitting diode communication [J]. Optical Engineering, 2015, 54(4): 1-11.
- [4] 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.
- [5] GUAN W, WEN S, ZHANG H, et al. A Novel Three-dimensional Indoor Localization Algorithm Based on Visual Visible Light Communication Using Single LED [C]// 2018 IEEE International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE2018), November 16-18, 2018, Shenyang, China. Piscataway: IEEE, 2018: 202-208.
- [6] QIN L, NIU B, LI B, et al. Indoor visible light high precision three-dimensional positioning algorithm based on single LED lamp [J]. Optik, 2020, 207(5): 163786-1-163786-10.
- [7] KOKDOGAN F, ERDEM O, GEZICI S. Theoretical limits on localization in single input multiple output (SIMO) visible light systems[J]. Digital Signal Processing, 2018, 82: 31-42.
- [8] YANG F, LI S, ZHANG H, et al. Visible Light Positioning via Floor Reflections[J]. IEEE Access, 2019(7): 97390-97400.
- [9] HAO J, CHEN J, WANG R. Visible Light Positioning Using A Single LED Luminaire[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-13.
- [10] XIE C, GUAN W, WU Y, 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.
- [11] JI Y, XIAO C, GAO J, et al. A single LED lamp positioning system based on CMOS camera and visible light communication [J]. Optics Communications, 2019, 443: 48-54.
- [12] ZHANG L, ZHOU T, LIAN B. Integrated IMU with Faster R-CNN Aided Visual Measurements from IP Cameras for Indoor Positioning [J]. Sensors, 2018, 18(9): 3134-1-3134-22.
- [13] HOU Y, XIAO S, BI M, et al. Single LED Beacon-Based 3-D Indoor Positioning Using Off-the-Shelf Devices[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(6): 1-11.
- [14] KESKIN M F, GEZICI S, ARIKAN O. Direct and Two-Step Positioning in Visible Light Systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 239-254.
- [15] 赵博睿. 基于DCO-OFDM的可见光通信平台开发及同步技术研究[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [16] LIN B, GHASSEMLOOY Z, LIN C, et al. An Indoor Visible Light Positioning System Based on Optical Camera Communications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(7): 579-582.

“十三五”国家重点出版物出版规划项目——可见光通信关键技术系列丛书推荐

《高速可见光通信关键技术》主要介绍了基于LED的高速可见光通信的技术原理,给出了本书作者研究团队的实验成果,对高速可见光通信技术的未来进行了展望。作者迟楠是该领域的知名专家,多次得到中央电视台、凤凰台和英国BBC等媒体的报道。

《高速可见光通信芯片与应用系统》围绕高速可见光通信专用芯片组的设计和研制工作展开,系统地介绍了可见光通信专用芯片组、标准模块与相关应用系统,填补了国际国内还未有高速可见光通信芯片书籍这一空白。作者朱义君是该领域的知名专家,设计并实现 50 Gb/s 超高速可见光通信系统,研制了全球首款可见光通信专用芯片组,为可见光通信的规模应用奠定了基础;新华社对相关研究成果播发通稿,国内外媒体广泛报道。

《室外可见光通信与智能交通》主要介绍了面向智能交通的室外可见光通信关键技术,系统地阐述了室外可见光通信的应用背景与相关标准化进展。作者徐正元教授是中国科学技术大学博士生导师,无线光通信与网络研究中心主任,中国科学院无线光电通信重点实验室主任,国家特聘专家,国家“973”计划项目首席科学家。