

## 基于支持向量机的室内定位系统研究

张彬<sup>1</sup>, 万生鹏<sup>1,2\*</sup>, 张思军<sup>1</sup>, 张正平<sup>1</sup>, 钟海华<sup>1</sup><sup>1</sup>南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063;<sup>2</sup>南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

**摘要** 提出了一种基于支持向量机(SVM)的两点光源定位技术。发送端利用现场可编程门阵列产生位置信息,编码并加载到对应的发光二极管(LED)驱动电路,接收端的图像传感器捕获两个LED的图像。在实际定位时,定位点的移动会导致接收光功率的变化,从而影响曝光度与曝光时间,继而无法准确提取条纹特征,因此提出了一种选择列像素的方法。利用SVM实现对LED的分类及准确识别,并利用可见光的三维成像定位算法得到目标的实际位置,最终在 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的空间范围内实现了精度为 $1\sim 2\text{ cm}$ 的定位。

**关键词** 机器视觉; 可见光通信; 室内定位; 现场可编程门阵列; 图像处理; 机器学习

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1615005

## Indoor Positioning System Based on Support Vector Machine

Zhang Bin<sup>1</sup>, Wan Shengpeng<sup>1,2\*</sup>, Zhang Sijun<sup>1</sup>, Zhang Zhengping<sup>1</sup>, Zhong Haihua<sup>1</sup><sup>1</sup>Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

**Abstract** In this paper, we propose a two-point light source location technology using a support vector machine (SVM). Here, the transmitter uses a field-programmable gate array to generate position information, encode and load it into the driving circuit of the corresponding light-emitting diode (LED) and the image sensor at the receiver captures two LED images. In the actual positioning, the movement of the positioning point changes the received light power, which affects the exposure degree and time, thereby causing inaccurate extraction of the fringe features. Therefore, our method selects column pixels since SVM is used to realize the classification and accurate recognition of LED and the actual position of the target is obtained using the three-dimensional imaging positioning algorithm of visible light. Finally, we obtained a positioning accuracy of  $1\sim 2\text{ cm}$  in the spatial range of  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ .

**Key words** machine vision; visible light communication; indoor positioning; field programmable gate array; image processing; machine learning

## 1 引言

近年来,随着社会经济的发展,人们对定位技术的关注度越来越高。传统的定位技术有全球定位系统(GPS)定位<sup>[1]</sup>、Wi-Fi定位<sup>[2]</sup>、射频识别技术(FRID)与二维码定位<sup>[3]</sup>等。GPS作为较常用的定位技术,有着无辐射的优点,但其穿透能力弱,信号被遮挡时,定位会出现漂移。Wi-Fi作为新型的定位技术,一般应用

于小型的室内定位,但易受其他信号的干扰,从而影响定位精度。FRID成本低,但通信距离较短。可见光通信(VLC)的出现弥补了室内定位技术中的一些劣势,白色发光二极管(LED)作为定位系统的发射端,在保证照明的同时,还具有通信的功能,将物体的位置信息转化为可见光信号,通过传感器接收并解调出物体位置信息,从而实现定位。VLC有着丰富的频谱资源,不受电磁干扰,在保证高精度定位的同时可实现发

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-09; 录用日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61465009)、江西省自然科学基金重点项目(20202ACBL202002)、江西省主要学科科学技术带头人资助计划(20172BCB22012)

通信作者: \*sp\_wan@163.com

送端与终端之间的交互通信、显示一体化。

2011年, Cossu 等<sup>[4]</sup>通过三角定位算法设计了一种基于正交频分复用的可见光定位系统。2012年, Lou 等<sup>[5]</sup>利用二进制振幅键控(OOK)调制技术, 结合身份证标识号(ID)定位算法实现了精度为 1.3 m 的定位。Jiang 等<sup>[6]</sup>采用 K-means 和随机森林算法实现了 4.45 cm 的基于指纹识别的高精度 VLC 三维定位。Guan 等<sup>[7]</sup>将基于光电传感器(PD)的 VLC 三维定位模型转换为优化模型, 通过群智能优化算法实现了 5 cm 以内的高精度三维定位。

目前, VLC 定位技术研究中以 PD 来解析光信号较为常见, 这类技术较为简单, 但对于接收端接收角度、信号强度与环境光的变化有着很大的依赖, 难以实现较高精度的定位<sup>[8]</sup>。

因此, 本文提出了一种基于机器学习算法的室内定位技术。首先对移动终端上图像传感器所接收到的二维图像进行图像处理, 然后利用机器学习算法对 LED 的类别进行准确分类, 最后利用可见光的三维成像定位算法计算出目标的实际位置。在实际应用中, 因与移动设备的结合, 所提系统便携性高, 而且环境光源干扰的影响较小, 可以实现较高精度的定位<sup>[9]</sup>。

## 2 系统设计及实现

所提系统框图如图 1 所示。系统分为发送端与接收端两个模块, 工作流程如下: 发送端利用现场可编程门阵列(FPGA)产生 LED-ID 位置信息, 直接调制(OOK)到 LED 上, 接收端图像传感器捕获两个 LED 图像, 对捕获的 LED 明暗条纹进行图像处理, 提取条纹特征, 利用机器学习算法实现对 LED 的分类及准确

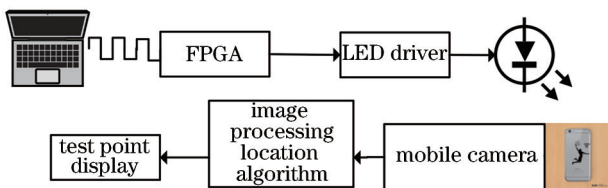


图 1 可见光室内定位系统总体框图

Fig. 1 Overall block diagram of visible light indoor positioning system

识别, 采用基于两点光源的定位算法来显示待测点的位置, 并将其与实际位置进行误差分析<sup>[10]</sup>。

### 2.1 LED 驱动电路

LED 驱动电路是发射端的核心部分, 在正常照明的同时要保证码元无明显失真。根据 LED 的伏安特性可知, 如果将编码好的数据直接从开发板的 IO 口加载至 LED 两端, 由于开发板 IO 口的电压在 0~3.3 V 之间, 电流最大不超过 20 mA, 所以并不能正常驱动 LED。在可见光系统中, 常用的 LED 驱动电路是由前置电压放大和电流驱动两部分组成, 前者利用运算放大器对电压进行放大, 后者一般使用三极管或者场效应管进行电压-电流转换, 整体电路不但需要满足相应的传输速率, 而且还要考虑工作的稳定性。图 2 为 LED 驱动电路, 将 FPGA 调制后输出的二进制信号加载到 LED 上从而达到调制的目的。

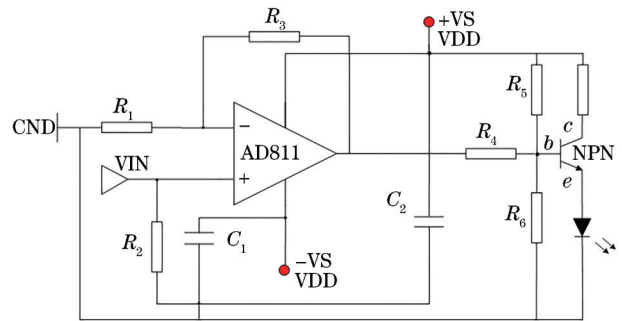


图 2 LED 驱动电路

Fig. 2 LED drive circuit

### 2.2 位置信息编码与发送

系统使用的软件是 Quartus II 13.0, 在 LED 输出控制过程中, 利用 FPGA 配置锁相环(PLL)与计数器寄存器, 如图 3 所示。LED 的位置信息由频率、占空比等变量构成, 将 6 个 LED 位置信息采用 OOK 直接调制, 方便后期对条形码特征进行提取。在保证 LED 正常照明的前提下, 避免长 0 与长 1 的存在, FPGA 开发板 I/O 口输出一个 24 位的数据。改变 LED 的调制频率可以改变 LED 投影上亮条纹的数目, 改变 OOK 的占空比可以改变亮条纹的占空比, 前三个 LED 与后三个 LED 频率不同, 占空比分别为 25%, 50%, 75%, 图 4 为 LED 的信号波形图。

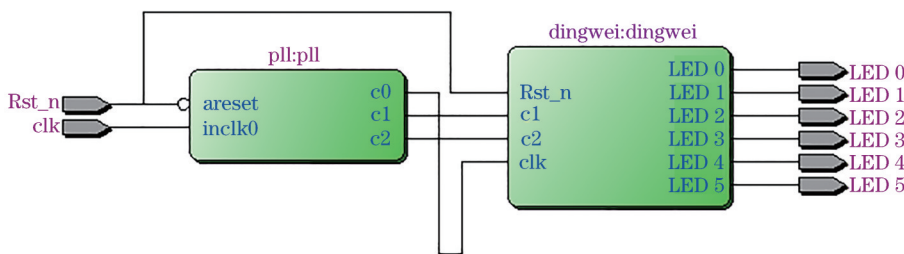


图 3 编码 RTL 流程图

Fig. 3 Flow chart of coding RTL

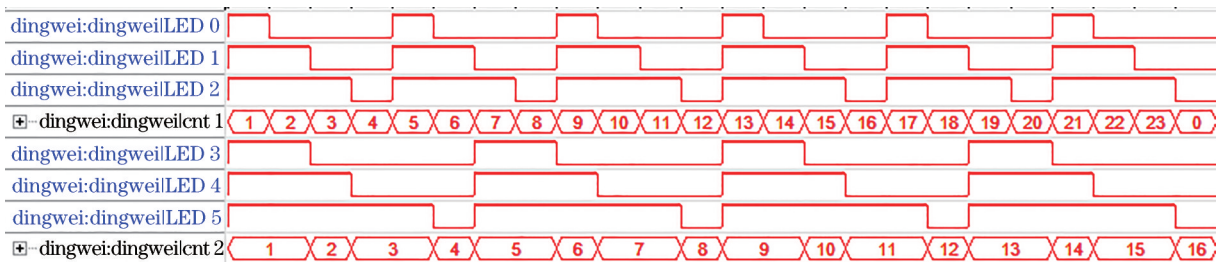


图 4 LED 的 Singal 波形图  
Fig. 4 Singal waveform of LED

### 2.3 特征选择与提取

系统使用的图像传感器是 CMOS, 采用逐行曝光方式来拍摄 LED, 当 CMOS 行扫描频率大于灯具的闪

烁频率时, 会获得图像中的明暗条纹。在 LED-ID 光条纹码的获取过程中, 不同曝光度和不同感光度下产生的光条纹码会不同, 如图 5、图 6 所示。



图 5 不同曝光度下的 LED-ID 光条纹码的效果。(a) 1/500; (b) 1/1000; (c) 1/2000  
Fig. 5 Effects of LED-ID light stripe code under different exposure. (a) 1/500; (b) 1/1000; (c) 1/2000

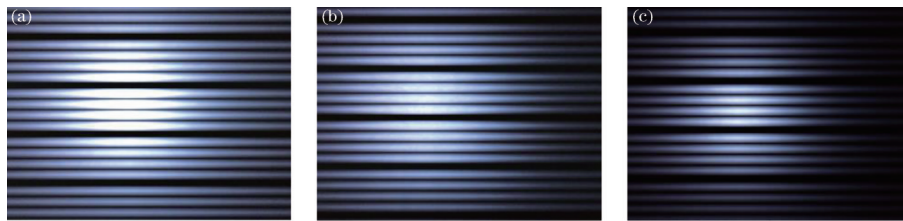


图 6 不同感光度下的 LED-ID 光条纹码的效果。(a) 1000; (b) 200; (c) 50  
Fig. 6 Effects of LED-ID light stripe code under different sensitivity. (a) 1000; (b) 200; (c) 50

从图 5 可以明显看出, 随着曝光时间的降低, LED-ID 光条纹码越清晰, 曝光度为 1/2000 时, 有较好的实验效果。

从图 6 可以看出: 感光度越高, 明暗条纹中的亮条纹宽度越大; 当高于一定值, 难以获取清晰的光条纹码。因此要调低感光度, 感光度为 50 时, 可以得出较清晰的条纹码。

位置信息的发送端, 加入了 LED 闪烁频率、占空比与面积这 3 个特征变量, 随着驱动 LED 的调制信号

频率越高, 在图像传感器上获得的明暗条纹数目也会越多, 对像素为 1 和像素为 0 的列向量计数, 通过计数条纹数目建立起与 LED 闪烁频率的映射关系, 保持占空比为 50% 不变, 将调制频率设置为 1500, 2000, 3000 Hz。不同频率下的光条纹码效果<sup>[11]</sup>如图 7 所示。

保持频率为 2000 Hz 不变, 将占空比分别设置为 25%, 50%, 75%。图 8 为不同占空比下的光条纹码效果。

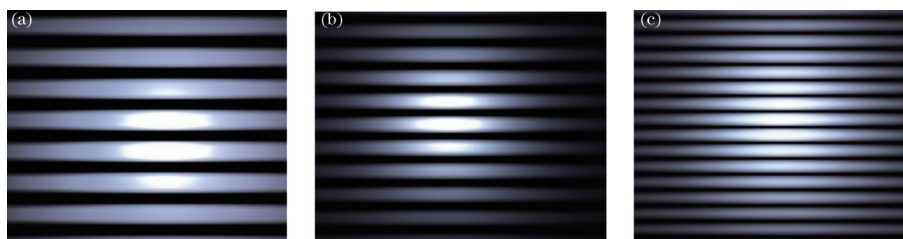


图 7 不同频率下的光条纹码效果<sup>[11]</sup>。(a) 1500 Hz; (b) 2000 Hz; (c) 3000 Hz  
Fig. 7 Effects of light stripe code at different frequencies<sup>[11]</sup>. (a) 1500 Hz; (b) 2000 Hz; (c) 3000 Hz



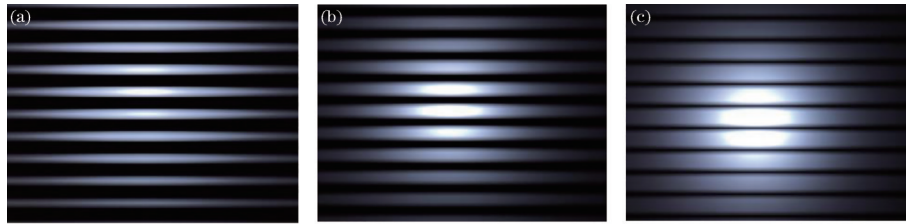


图 8 不同占空比下的光条纹码效果。(a) 25%; (b) 50%; (c) 75%

Fig. 8 Effects of light stripe code under different duty cycle. (a) 25%; (b) 50%; (c) 75%

图像传感器到 LED 距离不同时,成像面积也会随之改变,图 9 为在保证调制信号频率为 2000 Hz 的情况下,不同距离下的光条纹码效果。

在提取 LED 特征时,首先对整个图像进行灰度二值化处理,然后捕获图像中的 LED 区域进行分割。利

用函数将 LED 的投影面积化为一个圆形。通过建立 LED 亮条纹数目与调制频率的映射关系,来判别 LED 的调制频率。为了得到亮暗条纹的数目,可以求出二值化图像中像素为 1 与 0 的元素数目。

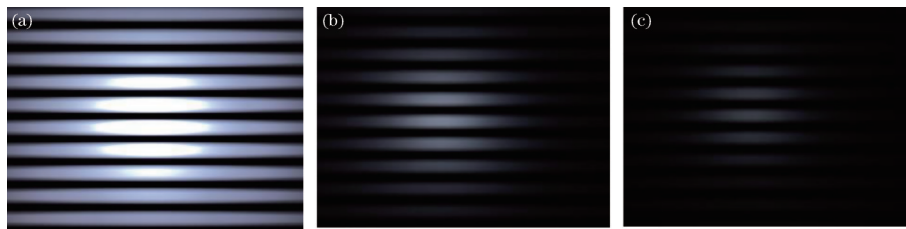


图 9 不同距离下的光条纹码效果。(a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm

Fig. 9 Effects of light stripe code under different distances. (a) 10 cm; (b) 20 cm; (c) 30 cm

判断占空比即像素 1 与 0 的数目比时,一般情况下可以对图像的中心列像素进行采样,但由于 LED 光源中心光照过强,高光溢出现象导致图片细节损失严重,因此本实验组采用图 10 所示的占空比列像素选择方法来有效减小误差。保证距离与调制信号频率一定,改变明条纹的宽度在光条纹整个宽度中的占比,将占空比设置为 50%,如图 10 所示。

信号解调。为了解决高光溢出现象,在光源中心的外围对像素灰度值进行列选择,即选择图中曲线所示像素列灰度值进行数据解调<sup>[12]</sup>。

计算 LED 像素区域中像素值为 1 与像素值为 0 的比率,即求出占空比为 50%。图 11 为列像素灰度图。

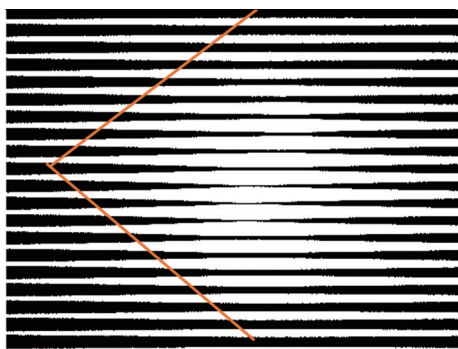


图 10 占空比列像素的选择

Fig. 10 Selection of duty cycle column pixels

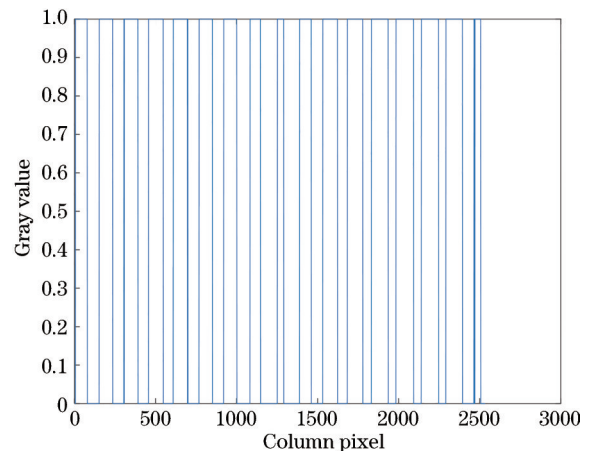


图 11 列像素灰度图

Fig. 11 Column pixel grayscale

高光溢出是指传感器在将光子转换为电荷的过程中,会因感光过度导致饱和像素的电荷溢出到相邻像素的现象。从图 10 很容易看出,灰度图中中心列出现高光溢出现象,明暗条纹间的对比度下降,不利于后续的

## 2.4 特征匹配及 ID 位置信息识别

支持向量机(SVM)作为传统机器学习中的非常重要的分类算法,通过某种事先选择的非线性映射将输入向量  $x$  映射到一个高维特征空间  $z$ ,并在这个空间

中构造最优分类超平面(也称决策曲面),使正例和反例样本之间的分离界限达到最大。

作者通过实验对拍摄的 LED 图像进行处理,提取光条形码特征(频率、占空比、面积等),并将提取到的这些特征参数作为输入,LED 的 ID 位置作为输出。从这些样本中选出训练数据与测试数据,并加入规范函数进行规范化。训练线性分类器得到模型,利用模型对测试集进行预测,最后比较误差,得出预测的准确率。图 11 为支持向量的示意图。

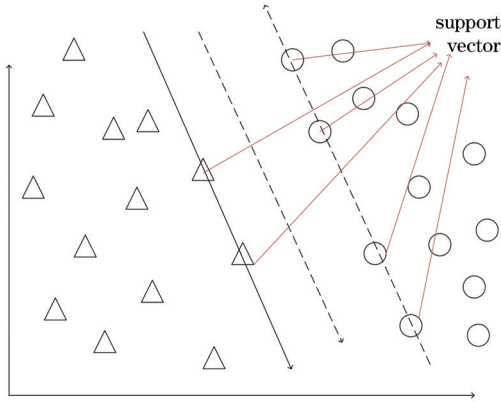


图 12 支持向量  
Fig. 12 Support vector

调用上述 SVM 模型,引入 LED 1、LED 2、LED 3、LED 4、LED 5、LED 6 的频率,占空比与面积特征,加入规范函数,范数为 2。为测试 SVM 分类器效果,取 150 组训练数据,160 组测试数据。SVM 训练时,迭代次数越少,训练时间越少,支持向量越少,说明选择的样本和特征越好,越容易分类。通过查找文档可知,迭代次数默认的最大值是 15000 次,可满足大部分分类问题。数据随机交叉验证可实现准确的 LED-ID 识别,识别率在 97.65%。图 13 为 LED-ID 识别三维图。

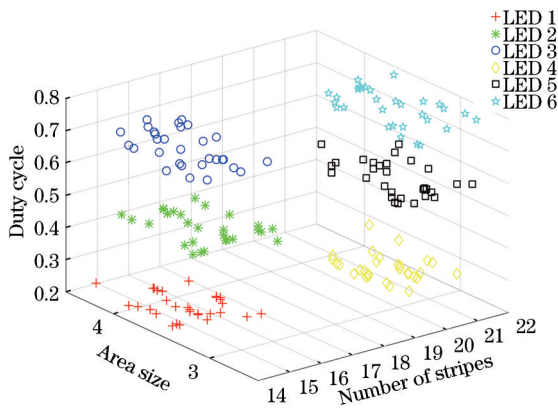


图 13 LED-ID 识别三维图  
Fig. 13 Three-dimensional diagram of LED-ID recognition

为了便于直观查看 LED 的分类,以条纹数目(频率特征)与占空比为轴绘制 LED-ID 识别侧视图,如图 14 所示。

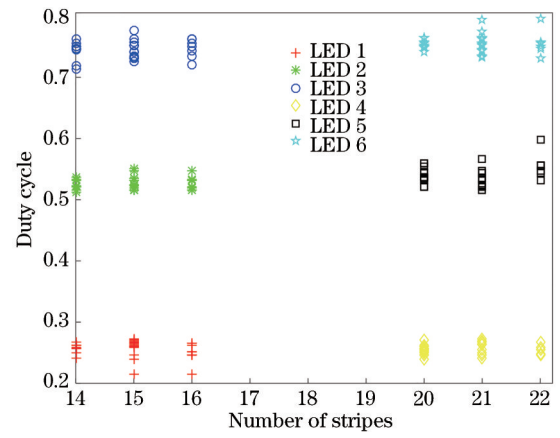


图 14 LED-ID 识别侧视图  
Fig. 14 Side view of LED-ID recognition

### 2.5 像素坐标系到世界坐标系的转化

像素坐标系到世界坐标系的转化,可以更好描述接收终端的位置,坐标关系如图 15 所示。 $uv$  为像素坐标系, $o-xy$  为图像坐标系,光心为图像中点, $O_c-X_cY_cZ_c$  为相机坐标系,光心为原点, $O_w-X_wY_wZ_w$  为世界坐标系,用来描述相机位置<sup>[13]</sup>。

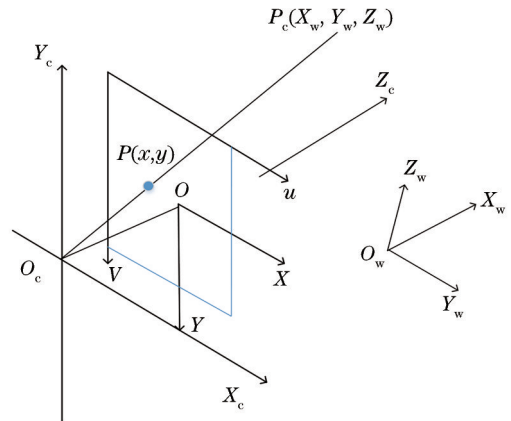


图 15 坐标系的转化关系  
Fig. 15 Transformation relation of coordinate system

### 2.6 基于两点光源的定位算法

将 LED 1 与 LED 2 两个光源安装在同一平面,世界坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1)$  和  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $i_1$  与  $i_2$  为 LED 光源中心通过透镜成像在图像传感器平面上的投影点,  $p$  为图像传感器透镜的中心即待测点。通过上述机器学习算法准确分类出 LED 的位置信息,然后使用基于两灯可见光三维成像定位方法实现较高精度的定位。图 16 为所提定位算法系统模型。

假设两 LED 在同一平面上,通过已知的两发送端在世界坐标系的坐标可得出其物理距离  $d_{12}$  和两个 LED 像素区域的中心距离  $p_{12}$ ,

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (1)$$

$$p_{12} = \sqrt{(i_1 - i_2)^2 + (j_1 - j_2)^2}, \quad (2)$$

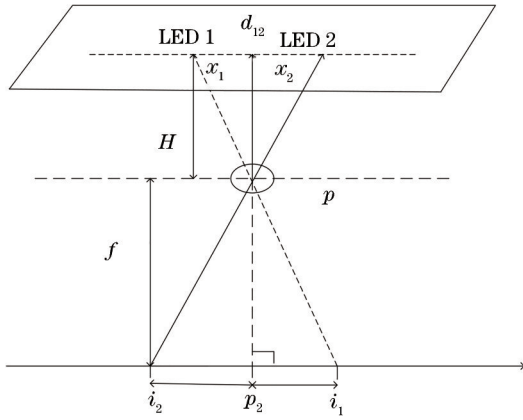


图 16 所提定位算法系统模型

Fig. 16 System model of proposed location algorithm

式中:  $i$  与  $j$  为像素坐标系中的横纵坐标。由图 16 可知, LED 所在平面到点  $p$  所在平面距离  $H$  的表达式为

$$H = f \cdot \frac{d_{12}}{\rho_{12}}, \quad (3)$$

式中:  $f$  为已知透镜焦距。同理可以求出待测定位点  $p$  距离每个 LED 参考光源的距离  $d_k (k=1, 2)$ ,

$$d_k = \frac{d_{12}}{\rho_{12}} \sqrt{f^2 + i_k^2}. \quad (4)$$

则待测点  $p$  在  $Z_c$  轴的坐标  $Z_p$  为

$$Z_p = Z_1 - H. \quad (5)$$

假设图像坐标系与世界坐标系平行且坐标轴的方向相同, 那么由三角形相似可以得出:

$$x = \frac{i_1 + i_2}{2} \cdot H + \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad (6)$$

$$y = \frac{j_1 + j_2}{2} \cdot H + \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (7)$$

在实际情况下, LED 1 到 LED 2 的质心向量不一定平行于  $X_c$  轴, 存在一个夹角  $\varphi$ , 旋转角的不同情况如图 17 所示。在判断出 LED 1 与 LED 2 后, 可获得  $\varphi$  与

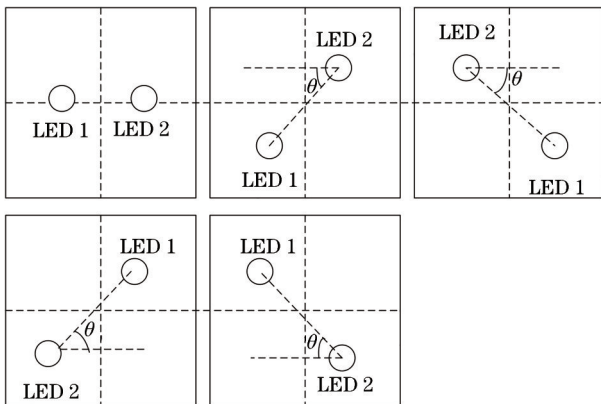


图 17 旋转角  $\varphi$  的不同情况

Fig. 17 Different situations of rotation angle  $\varphi$

$\theta$  的关系, 其中  $\theta$  为图像传感器坐标系相对于世界坐标系的旋转。

在图 17 中, 从左往右  $\varphi$  的取值依次为

$$\begin{cases} \varphi = 0^\circ \\ \varphi = \theta \\ \varphi = 180^\circ - \theta, \\ \varphi = \theta + 180^\circ \\ \varphi = 360^\circ - \theta \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = a \tan \left( j_1 - \frac{j_1 + j_2}{2}, i_1 - \frac{i_1 + i_2}{2} \right). \quad (9)$$

通过坐标转换矩阵, 可以得出待测点的实际位置坐标。

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 3 系统搭建及结果分析

设立一个长 30 cm、宽 30 cm、高 50 cm 的实验空间。将两个 LED 光源固定在顶层中部, 坐标分别设定为 (10, 15, 50), (20, 15, 50), 在光源视角角范围内, 保证摄像头可以将 2 个 LED 的图像同时捕获。对两个 LED 辐射的光照度相加来计算相邻 LED 辐射重叠区域的光照度, 并利用 Matlab 画出室内可见光通信光照分布图, 如图 18 所示。

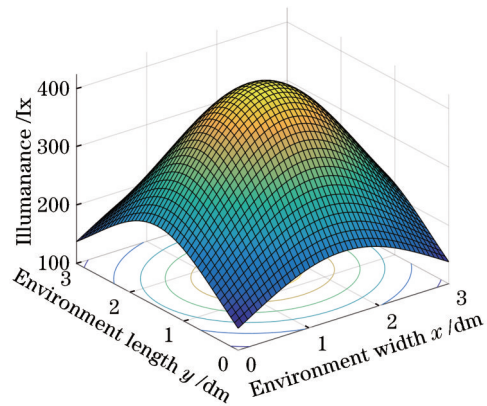


图 18 光照分布图

Fig. 18 Light distribution map

对于三维定位, 选取训练样本时, 选取高度在距离地面 10, 15, 20 cm 的位置获取训练集, 训练出一个 SVM 模型。图 19、20 为定位结果的三维图与俯视图。

在其他影响因素保持不变的情况下, 利用欧几里得距离公式, 计算待测点与实际位置在三维空间下的距离  $e$ , 即定位误差。

$$e = \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (z_p - z)^2}. \quad (11)$$

均方误差是样本数据值偏离真实样本数据值的平



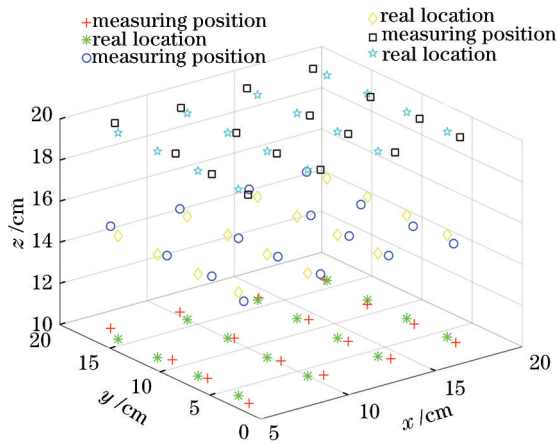


图 19 定位结果的三维图

Fig. 19 Three-dimensional diagram of positioning results

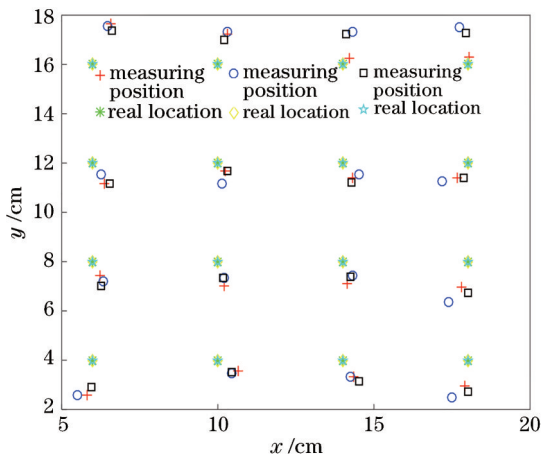


图 20 定位结果的俯视图

Fig. 20 top view of positioning results

方和的平均数,也即误差平方和的平均数,即

$$E_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ (x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (z_p - z)^2 \right]}{N} \quad (12)$$

MSE 可以评价数据的变化程度,通过式(12)得出 MSE 为 1.13,说明所提模型具有更好的精确度,定位性能较好。

图 21 为定位误差分布图。在定位过程中,LED 在成像后所测的像素中心会与实际有所偏差,智能终端顶部或尾部倾斜的角度也会对定位精度有所影响,但结果表明最大的误差不会高于 2 cm,因此可以实现较好定位。从图 21 可以看出,当图像传感器靠近房间中心处摆放的 LED 时,定位误差普遍小于 0.5 cm,而当图像传感器偏离中心位置,定位误差也会随之增大,这与文献[14]中的结论一致。两个 LED 光源分布在顶层中部附近位置,光照辐射的重叠区域决定了定位区域,因而四周定位区域的光照强度会小于偏中心区域,导致图像传感器接收两路光线并不完整。在捕获两个 LED 光源图像后,在实际选取成像平面的像素中心位

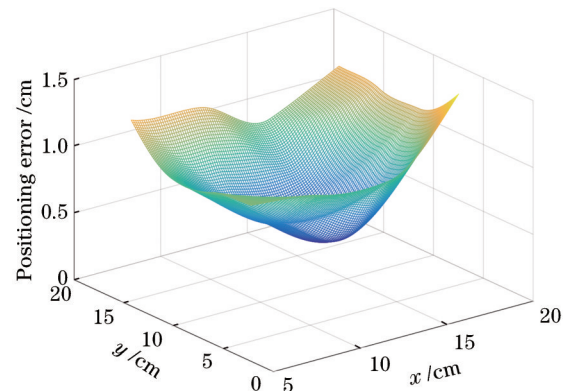


图 21 定位误差分布图

Fig. 21 Distribution of positioning error

置时会有偏差,因此在定位过程中会造成较大的误差。考虑到 LED 的功率与照度,搭建的实验场景主要对定位算法进行验证,在包括 LED 安装误差和算法误差的前提下,多次改变定位测试点的位置,达到 1~2 cm 的定位精度。由文献[15]可知,在将 LED 的发射功率提升至 6 W 左右时,可以模拟一个 3 m × 3 m × 4 m 的实验空间,模拟后平均误差为 3.62 cm,最大误差为 9.04 cm,最小误差为 0.87 cm。如果假设 90% 是可接受的服务覆盖率,则所提算法将能够在三维房间中提供小于 5 cm 的精度,较为合理。后续实验会加大 LED 的功率,扩大实验空间以符合真实场景。

## 4 结 论

针对室内定位系统,对捕获的 LED 明暗条纹进行图像处理,提取条纹中频率、占空比、面积这 3 个特征,利用机器学习算法实现对多个 LED 的分类及准确识别。在图像传感器捕获两个 LED 图像后,利用基于两点光源的定位算法,使其达到较高精度的室内定位。相比于基于 PD 的非成像定位技术,所提技术减小了光强变化等环境因素的影响,虽受限于图像传感器的视场角大小,但提高了定位精度,大大提高了实际应用性。

## 参 考 文 献

- [1] 赵敏星, 袁路萍, 邹贤才. 利用 GPS 卫星轨道确定地球二阶带谐系数的研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(2): 47-50.  
Zhao M X, Zhong L P, Zou X C. Research on the determination of earth second-degree harmonic coefficients by GPS satellites[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(2): 47-50.
- [2] 朱正伟, 蒋威, 张贵玲, 等. 基于 RSSI 的室内 WiFi 定位算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(10): 2958-2962.  
Zhu Z W, Jiang W, Zhang G L, et al. Indoor WiFi location algorithm based on RSSI[J]. Computer Engineering and Design, 2020, 41(10): 2958-2962.

- [3] 陆霞. 基于 LBS 云平台的微信小程序二维码区域定位系统设计[J]. 现代电子技术, 2020, 43(4): 180-182, 186. Lu X. Design of WeChat mini program two-dimensional code region positioning system based on LBS cloud platform[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(4): 180-182, 186.
- [4] Cossu G, Presi M, Corsini R, et al. A Visible Light localization aided Optical Wireless system[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops, December 5-9, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE Press, 2011: 802-807.
- [5] Lou P H, Zhang H M, Zhang X, et al. Fundamental analysis for indoor visible light positioning system[C]//2012 1st IEEE International Conference on Communications in China Workshops, August 15-17, 2012, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2012: 59-63.
- [6] Jiang J J, Guan W P, Chen Z N, et al. Indoor high-precision three-dimensional positioning algorithm based on visible light communication and fingerprinting using K-means and random forest[J]. Optical Engineering, 2019, 58(1): 016102.
- [7] Guan W P, Wu Y X, Xie C Y, et al. High-precision approach to localization scheme of visible light communication based on artificial neural networks and modified genetic algorithms[J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 106103.
- [8] 邹鹏, 赵一衡, 胡昉辰, 等. 基于机器学习的可见光通信信号处理研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010001. Zou P, Zhao Y H, Hu F C, et al. Research status of machine learning based signal processing in visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010001.
- [9] 朱伟俊. 基于图像传感器的可见光通信室内定位算法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018. Zhu W J. Research on indoor positioning algorithm of visible light communication based on image sensor[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018.
- [10] 关伟鹏. 基于图像传感器的高精度室内可见光定位算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. Guan W P. Research on high precision indoor visible light positioning algorithm based on image sensor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [11] Xie C Y, Guan W P, Wu X 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): 17665546.
- [12] Guan W P, Wu Y X, Xie C Y, et al. Performance analysis and enhancement for visible light communication using CMOS sensors[J]. Optics Communications, 2018, 410: 531-551.
- [13] Zhang W Z, Chowdhury M I S, Kavehrad M. Asynchronous indoor positioning system based on visible light communications[J]. Optical Engineering, 2014, 53(4): 045105.
- [14] Panta K, Armstrong J. Indoor localisation using white LEDs[J]. Electronics Letters, 2012, 48(4): 228-230.
- [15] Guan W P, Wu Y X, Wen S S, et al. A novel three-dimensional indoor positioning algorithm design based on visible light communication[J]. Optics Communications, 2017, 392: 282-293.