

## 激光与光电子学进展

## 基于发光二极管与图像传感器的可见光三维定位系统

许永泽<sup>1,2,3</sup>, 陈哲<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>暨南大学理工学院光电工程系广东省可见光通信工程技术研究中心, 广东 广州 510632;<sup>2</sup>暨南大学理工学院光电工程系广州市可见光通信工程技术重点实验室, 广东 广州 510632;<sup>3</sup>暨南大学理工学院光电工程系光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632;<sup>4</sup>季华实验室, 广东 佛山 528251

**摘要** 随着物联网的快速发展,智能设备需要高精度、实时的定位服务。为了解决现有可见光定位技术中存在的只能实现二维定位、系统复杂、定位精度低、定位时间长的问题,本文提出了一种基于两个发光二极管(LED)和图像传感器的可见光三维定位系统。首先结合针孔成像模型和畸变模型建立了仿真模型。然后提出了一种基于二分及双指针的条纹搜索算法来快速确定LED在图像上的位置。最后利用LED在图像上所成像的几何特征实现三维定位。经计算,系统在 $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 300\text{ cm}$ 的空间内,仿真实验的平均定位误差为 $0.79\text{ cm}$ ;实物实验的平均定位误差为 $5.61\text{ cm}$ ,平均定位时间为 $64.13\text{ ms}$ 。此外,与线性法的条纹搜索方法相比,提出的条纹搜索算法的时间性能提升了 $70.06\%$ 。因此,该定位系统能提供良好的三维定位服务。

**关键词** 光通信; 三维定位; 发光二极管; 图像传感器

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221643

## Visible Light Three-Dimensional Positioning System Based on Light-Emitting Diode and Image Sensor

Xu Yongze<sup>1,2,3</sup>, Chen Zhe<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>Engineering Research Center on Visible Light Communication of Guangdong Province, Department of Optoelectronic Engineering, College of Science & Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Visible Light Communications of Guangzhou, Department of Optoelectronic Engineering, College of Science & Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Department of Optoelectronic Engineering, College of Science & Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;<sup>4</sup>Jihua Laboratory, Foshan 528251, Guangdong, China

**Abstract** With the rapid development of the Internet of Things, smart devices require high-precision, real-time location services. However, only two-dimensional positioning can be achieved in existing visible light positioning technologies; furthermore, the system is complex and has a low positioning accuracy and extended positioning time. To address these issues, this study proposes a visible light three-dimensional positioning system based on two light-emitting diodes (LEDs) and image sensors. First, a simulation model is established by combining the pinhole imaging model and the distortion model. Next, a stripe search algorithm based on bisection and a double pointer is proposed to rapidly determine the position of the LED on the image. Finally, the geometric features of the LEDs on the image are used to achieve three-dimensional positioning. After calculations, in a  $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 300\text{ cm}$  space, the average positioning error of the simulation experiment is  $0.79\text{ cm}$ , and the average positioning error of the physical experiment is  $5.61\text{ cm}$ . The average positioning time is  $64.13\text{ ms}$ . In addition, the time performance of the proposed stripe search algorithm is improved by  $70.06\%$  compared with that of the linear stripe search algorithm. Therefore, the proposed system can provide a good three-dimensional positioning service.

**Key words** optical communication; three-dimensional positioning; light-emitting diode; image sensor

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-05-30; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: TESTBED2 欧盟项目(H2020-MSCA-RISE-2019)、国家自然科学基金(62075088)、国家重点研发计划项目子项目(2019YFE0123600)、广州市产业领军人才聚集工程项目(CXLJTD-201607)

通信作者: \*thzhechen@163.com

# 1 引言

随着物联网的快速发展,涌现了室内导航、货物运输、远程手术等新兴应用<sup>[1-2]</sup>,因此智能设备很需要高精度、实时的室内三维定位服务。然而,全球定位系统(GPS)、基于蓝牙、射频识别等的定位技术方案存在着定位误差大(几十厘米至几米)、易受多径效应影响等问题,无法提供良好的定位服务。而随着可见光通信(VLC)技术的快速发展,它的其中一项应用——可见光定位(VLP)可以很好地解决上述问题。

VLP是一种新型的室内定位技术,系统一般由发射机与接收机组成,其中发射机为发光二极管(LED),接收机为光学接收器,主要有光电二极管(PD)和图像传感器(IS)这两种。其通过LED发出带有位置信息的光信号,并传输至接收机中,通过计算处理后确定接收机的位置,从而实现室内定位的目标。相比于其他定位技术方案,VLP具有以下优势:1)定位精度高;2)一次能量集中在视线链路上,基本不受多径效应的影响<sup>[3]</sup>;3)免疫电磁干扰,适用于电磁敏感的区域如加油站、矿场等<sup>[3-4]</sup>,同时不会对人体产生威胁<sup>[5]</sup>;4)利用现有的照明设施即可搭建,成本低;5)安全性高<sup>[6]</sup>。因此,VLP有望成为解决“定位最后一公里”的技术方案<sup>[7]</sup>。

近年来,学者们对VLP开展了研究。文献[8-10]使用了光流检测法和贝叶斯预测法<sup>[8]</sup>、到达时间差法<sup>[9]</sup>、单灯标记法<sup>[10]</sup>等实现了二维定位,然而他们无法估计接收机的高度,不能满足三维定位服务。为此,文献[11-12]使用了可调激光器<sup>[11]</sup>和可伸缩旋转平台<sup>[12]</sup>这些组件,再配合光学接收器完成目标的定位,但额外的组件提高了成本;此外,文献[13-15]需预先构建指纹数据库<sup>[13-15]</sup>,这也造成了系统部署的困难。文献[16-19]虽仅使用了LED和光学接收器实现了三维定位,但平均定位误差分别为6~8.5 cm<sup>[16]</sup>、8.4 cm<sup>[17]</sup>、10 cm<sup>[18]</sup>以下和17.52 cm<sup>[19]</sup>,定位精度低,不适用于高精度的应用场景。此外,很多研究未考虑定位时间,而实时性能也是VLP系统非常重要的一个指标。

因此,为了解决VLP系统复杂、定位精度低、实时性差的问题,使VLP能应用于实际场景中,本文提出了一个基于双LED和IS的可见光三维定位系统,通过IS所捕获的LED在图像上的几何特征实现三维定位,从而简化了系统的组成,并提供厘米量级的定位精度。此外,本文提出了一种基于二分及双指针的条纹搜索

算法,时间复杂度仅为 $O(\log_2 N)$ ,可快速确定LED在图像上的位置,从而提高系统的实时性。

# 2 原理

## 2.1 仿真模型

本文提出的系统使用了IS作为接收机,而在理想条件下可使用针孔成像模型来描述IS的成像过程<sup>[20]</sup>,由此可以确定三维世界中LED的一点在二维图像上的位置。在针孔成像模型中,主要涉及四个坐标系:世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系,其转换过程如图1所示。

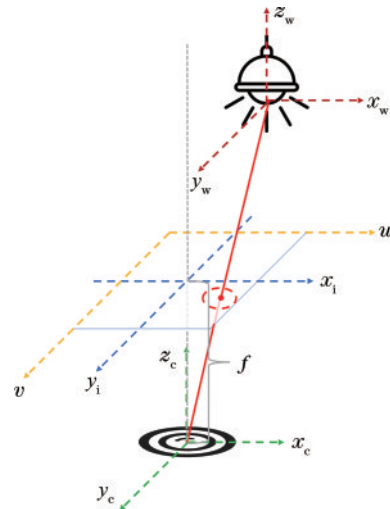


图1 针孔成像模型的坐标系转换过程

Fig. 1 Process of coordinate system conversion in pinhole imaging model

世界坐标系 $o_w-x_wy_wz_w$ 是存在于物理空间中的一个三维坐标系,可任意指定三轴和原点,单位一般为m或cm。相机坐标系 $o_c-x_cy_cz_c$ 是以IS自身为参考的坐标系,原点位于透镜光心, $z_c$ 轴与光轴重合, $x_c$ 轴和 $y_c$ 轴与图像的水平面平行,单位一般为mm。设LED任意一点的世界坐标为 $p_w(x_w, y_w, z_w)$ ,则可通过刚体变化得到其相机坐标 $p_c(x_c, y_c, z_c)$ 为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵,是由IS与世界坐标系各坐标轴之间的弧度决定的,设其分别绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴旋转 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 弧度<sup>[21]</sup>,则有

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_x(\alpha) \cdot \mathbf{R}_y(\beta) \cdot \mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$T$  为平移矩阵,是由 IS 与世界坐标系各坐标轴的偏移距离决定的,由于 IS 的成像特点,偏移距离需取相反数,有

$$T = \begin{bmatrix} -t_x \\ -t_y \\ -t_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

图像坐标系  $o_i-x_iy_i$  是以成像平面为基准的二维坐标系,原点为光轴与成像平面的交点,  $x_i$  轴与  $y_i$  轴分别平行于  $x_c$  轴和  $y_c$  轴,单位一般为 mm。设该点的图像坐标为  $p_i(x_i, y_i)$ ,则可通过透视投影将该点从三维的相机坐标系转换到二维的图像坐标系,设  $f$  为 IS 的焦距,根据相似三角形关系<sup>[22-23]</sup>有

$$z_c \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

像素坐标系  $o_p-uv$  是表示点在图像上位置的二维坐标系,原点位于图像的左上角,  $u$  轴和  $v$  轴分别平行于图像的长轴和短轴,以像素为单位。设该点的像素坐标为  $p_p(u, v)$ ,则可通过数字化图像将其图像坐标转化为像素坐标。设 IS 中一个像素的物理尺寸  $dx \times dy$ ,图像中心点的像素坐标为  $p_{p0}(u_0, v_0)$ <sup>[22-23]</sup>,则有

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

结合上述三个转换步骤,设 IS 在像素坐标系中  $u$  轴和  $v$  轴的尺度因子为

$$\begin{cases} f_u = f/dx \\ f_v = f/dy \end{cases} \quad (6)$$

令

$$K = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

这样,就可以得到 LED 上任意一点的世界坐标与其像素坐标之间的关系为

$$z_c \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \cdot [R \quad T] \cdot \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $z_c$  为 LED 与 IS 光学中心的距离;  $K$  是一个  $3 \times 3$  的 IS 内参数矩阵,一般是固定的;  $[R \quad T]$  是一个  $3 \times 4$  的 IS 外参数矩阵,会随着其运动状态的变化而变化。

然而,由于 IS 的构造、安装工艺等因素会不可避免地引入畸变,畸变会导致物体成像发生形变。为了得到真实的像素坐标,需引入畸变模型进行计算。首先需将式(8)所得的像素坐标转化为归一化的图像坐标:

$$\begin{cases} x_{iN} = (u - u_0)/f_u \\ y_{iN} = (v - v_0)/f_v \end{cases} \quad (9)$$

则该归一化图像坐标与图像坐标系原点的欧氏距离<sup>[22-23]</sup>为

$$r = \sqrt{(x_{iN} - 0)^2 + (y_{iN} - 0)^2} = \sqrt{x_{iN}^2 + y_{iN}^2} \quad (10)$$

而径向畸变和离心畸变是成像过程中最主要的畸变<sup>[24]</sup>。

如果设  $\delta_r$  为一点在图像坐标系上的径向畸变,  $\delta_{rx}$  为其的  $x$  轴分量,  $\delta_{ry}$  为其的  $y$  轴分量,则径向畸变可用如下模型描述:

$$\begin{cases} \delta_{rx} = x_{iN} \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \\ \delta_{ry} = y_{iN} \cdot (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $k_1$ ,  $k_2$  和  $k_3$  为径向畸变系数。

如果设  $\delta_c$  为一点在图像坐标系上的离心畸变,  $\delta_{cx}$  为其的  $x$  轴分量,  $\delta_{cy}$  为其的  $y$  轴分量,则离心畸变可用如下模型描述:

$$\begin{cases} \delta_{cx} = 2p_1 \cdot x_{iN} \cdot y_{iN} + p_2 \cdot (r^2 + 2x_{iN}^2) \\ \delta_{cy} = 2p_2 \cdot x_{iN} \cdot y_{iN} + p_1 \cdot (r^2 + 2y_{iN}^2) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $p_1$  和  $p_2$  为离心畸变系数。

结合式(11)和式(12),该点的畸变图像坐标为

$$\begin{cases} x_i' = x_{iN} + \delta_{rx} + \delta_{cx} \\ y_i' = y_{iN} + \delta_{ry} + \delta_{cy} \end{cases} \quad (13)$$

根据式子(13),就可以将该点的畸变图像坐标转换为畸变像素坐标,即真实像素坐标为

$$\begin{cases} u' = x_i' \cdot f_u + u_0 \\ v' = y_i' \cdot f_v + v_0 \end{cases} \quad (14)$$

由此,就可确定 LED 任意一点的真实像素坐标,再结合定位算法即可完成仿真计算。

## 2.2 系统架构

本文所提出的 VLP 系统主要由两部分组成:LED 作为发射机;IS 作为接收机。首先,通过开关键控(OOK)调制<sup>[25]</sup>的方式,使 LED 发出带有位置信息,即其唯一编号(ID)的光信号。利用 IS 的卷帘快门的成像机制,经 OOK 调制的 LED 会在图像上形成一组亮暗交替的条纹。然后,使用条纹搜索算法来确定条纹在图像上的位置,并进行解调来获取 LED 的 ID 信息,从而可在映射表中查找该 LED 对应的世界坐标。最后,利用 LED 在图像上的几何特征实现三维定位。系统的流程图如图 2 所示。

## 2.3 基于二分及双指针的条纹搜索算法

为了快速地确定 LED 所成像——亮暗交替的条纹在图像上的位置,本文提出了一种基于二分及双指针的条纹搜索算法,如图 3 所示,并结合了采样的方式进行判断,而采样是指获取图像某块区域所有的像素点的值并求和。



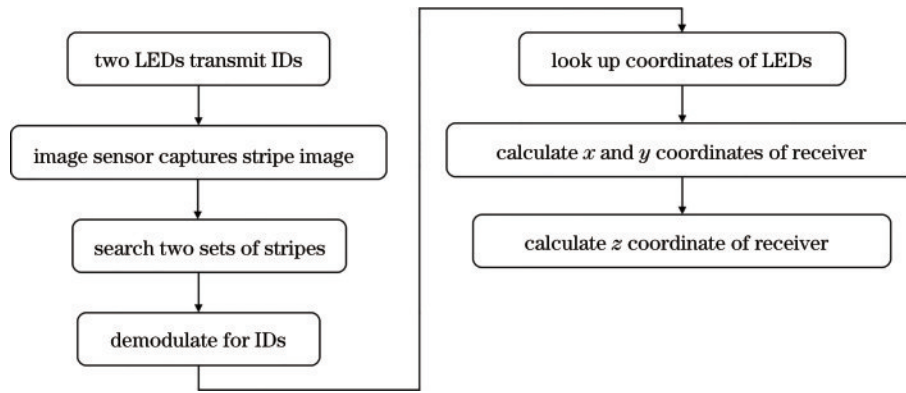


图 2 提出的 VLP 系统流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed VLP system

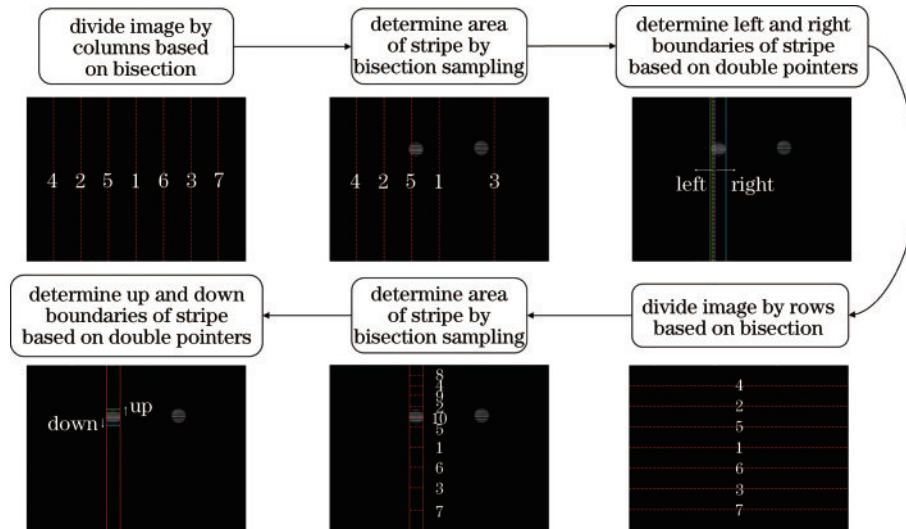


图 3 基于二分及双指针条纹搜索算法的流程图

Fig. 3 Flow chart of stripe searching algorithm based on bisection and double pointers

首先需按列不断二分图像,直至相邻两列的间隔小于条纹的最小宽度,从而确保采样列必定经过条纹区域。其中,图像上的数字表示采样的次序。接着,根据次序采样这些列,如果采样列的像素和大于阈值,则表明采样列在条纹内,即确定了条纹在图像上的大致区域。由于使用了二分的思想,所以这部分算法的时间复杂度为  $O(\log_2 N)$ 。为了进一步确定这组条纹的左右边界,使用双指针的方法。结合上一步得到的经过条纹区域的列序号,在其相邻两边分别初始化两个指针:其中一个指针为 left,往左逐列采样;另一个指针为 right,往右逐列采样。当两个指针采样列的像素和小于阈值时,表明已搜索到这组条纹的左右边界。由于条纹的大小是由拍摄距离决定的,不会随着图像大小的变化而变化,所以这部分算法的时间复杂度为  $O(1)$ 。因此确定条纹的左右边界的算法的时间复杂度为  $O(\log_2 N)$ 。

同样地,采用上述思想来确定条纹的上下边界。由于已确定了条纹的左右边界,所以只需在它们围成的图像区域中继续搜索即可。此外,条纹是按行排列

的,所以处理的过程略有不同。首先也需按行不断二分图像,为了确保采样行经过条纹区域,两个相邻采样行的间隔要足够小。接着,按照图像的行进行二分采样以确定条纹的大致区域,然后,使用 up 和 down 两个指针确定条纹的上下边界。当它们采样到的行的像素和大于阈值时,表明该行为亮单元,不断更新上下边界的值;当采样行的像素和小于阈值时,则该行为暗单元,统计其长度,如果长度大于阈值时,表明已采样到条纹外的黑色区域,从而确定了条纹的上下边界。因此,确定条纹的上下边界的算法的时间复杂度也为  $O(\log_2 N)$ 。

由此就能完成一组条纹的搜索,相比于线性条纹搜索算法,算法的时间复杂度能从  $O(N^2)$  降为  $O(\log_2 N)$ ,从而可更快速地确定条纹在图像的位置。此外,由于本文所提出的 VLP 系统需捕获两个 LED 的像,所以需确定两组条纹在图像上的位置。已完成搜索的这组条纹又将图像分为左右两部分区域,只需在这两个区域使用上述算法即可。

## 2.4 三维定位算法

根据图 2, 当对搜索到的条纹解调得到 LED 的 ID 后, 可根据映射表确定其世界坐标。当 IS 捕获到两个 LED 时, 可根据它们在图像上的几何特征求得 IS, 即接收机的世界坐标。设接收机的世界坐标为  $P_w(x, y)$ , 两个 LED 的世界坐标分别为  $L_{w1}(x_1, y_1)$  和  $L_{w2}(x_2, y_2)$ , 它们在世界坐标系中的欧氏距离为  $s_1$ , 两个 LED 对应的像素坐标分别为  $L_{p1}(u_1, v_1)$  和  $L_{p2}(u_2, v_2)$ , 它们在像素坐标系中的欧氏距离为  $s_2$ , 图像中点的像素坐标为  $P_{p0}(u_0, v_0)$ , 根据相似三角形的比例关系<sup>[25]</sup>, 可得

$$\begin{cases} \frac{s_1}{s_2} = \frac{x_1 - x}{u_1 - u_0} = \frac{x_2 - x}{u_2 - u_0} \\ \frac{s_1}{s_2} = \frac{y_1 - y}{v_1 - v_0} = \frac{y_2 - y}{v_2 - v_0} \end{cases}, \quad (15)$$

此外, 可求出相关的距离为

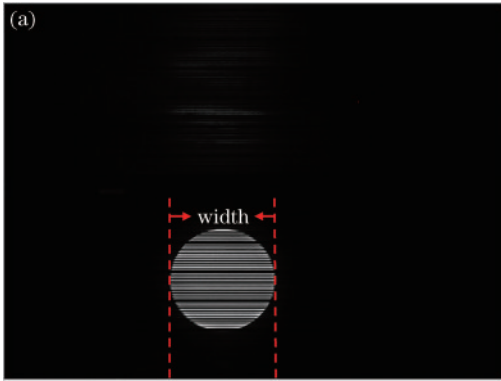


图 4 不同距离下不同大小的条纹。(a)距离为 2 m;(b)距离为 3 m

Fig. 4 Different sizes of stirpes at different distances. (a) Distance is 2 m; (b) distance is 3 m

如果令条纹的宽度  $w$  为自变量, LED 与 IS 之间的垂直距离  $d$  为因变量, 其采样数据集为  $(w_i, d_i) (i = 1, 2, \dots, m)$ , 其中  $m$  为采样数据个数。这组数据集满足如下的多项式:

$$f(w_i) = a_0 + a_1 \cdot w_i + a_2 \cdot w_i^2 + \dots + a_n \cdot w_i^n, \quad (18)$$

式中:  $n$  为该多项式的阶数;  $a_j (j = 1, 2, \dots, n)$  为该多项式各项的系数。

令采样数据点的误差平方和取极小值, 可得到拟合效果最好的多项式, 其各项的系数为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & w_1 & \cdots & w_1^n \\ 1 & w_2 & \cdots & w_2^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & w_m & \cdots & w_m^n \end{bmatrix}^{-1}. \quad (19)$$

由此, 可得到关于条纹宽度  $w$  与垂直距离  $d$  之间的多项式表达式。此外, LED 一般都部署在同一高度平面上, 即它们的世界坐标的  $z$  轴分量是相等的, 设为  $h$ 。如果两组条纹的宽度分别为  $w_1$  和  $w_2$ , 则可求得接收机的  $z$  坐标为

$$\begin{cases} s_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ s_2 = \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \end{cases}. \quad (16)$$

因此, 接收机的  $x, y$  坐标<sup>[25]</sup>为

$$\begin{cases} x = x_1 + (u_0 - u_1) \cdot \frac{s_1}{s_2} = x_2 + (u_0 - u_2) \cdot \frac{s_1}{s_2} \\ y = y_1 + (v_0 - v_1) \cdot \frac{s_1}{s_2} = y_2 + (v_0 - v_2) \cdot \frac{s_1}{s_2} \end{cases}. \quad (17)$$

为了求得接收机的  $z$  坐标, 可使用一种基于最小二乘多项式拟合的求高算法。如图 4 所示, 物理空间中的 LED 在 IS 中所成像的大小与拍摄距离, 即它们之间的垂直距离有关。当垂直距离越小时, LED 所成的像越大; 反之, LED 所成的像越小。这里使用条纹的宽度来表征其像的大小。因此, 可使用最小二乘多项式拟合算法来建立条纹宽度与垂直距离之间的映射关系。

$$z = h - f\left(\frac{w_1 + w_2}{2}\right). \quad (20)$$

这样, 完成数据的采集以及多项式拟合后, 当 LED 的部署发生变化时, 只需更改式(20)中  $h$  的值即可, 从而提升了算法的适用性。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 定位精度

定位精度是广泛用于评估 VLP 系统性能的一个指标<sup>[6]</sup>。本节将通过仿真实验和实物实验进行验证。一般使用定位误差来表征系统的定位精度, 它们之间存在着反比关系。而三维定位误差  $e$  定义为一点的真实世界坐标  $(x_{\text{real}}, y_{\text{real}}, z_{\text{real}})$  与其计算世界坐标  $(x_{\text{cal}}, y_{\text{cal}}, z_{\text{cal}})$  之间的欧氏距离, 因此有

$$e = \sqrt{(x_{\text{real}} - x_{\text{cal}})^2 + (y_{\text{real}} - y_{\text{cal}})^2 + (z_{\text{real}} - z_{\text{cal}})^2}. \quad (21)$$

#### 1) 实验参数

为了更好地进行对比分析, 仿真实验和实物实验

相关的实验参数是一致的。实验均使用世界坐标系描述 LED 和 IS 的位置,单位为 cm。测试的空间大小为 100 cm × 100 cm × 300 cm。定义地板平面上的中点为世界坐标系的原点,两个 LED 安装在天花板平面上,并分布于原点的两侧。而在日常的使用中,以人手持接收机和无人小车为例,高度范围一般在 100 cm 及以下,因此选取在高度分别为 0、50、100 cm 的三个平面上进行测试,且在每个平面上,以 15 cm × 15 cm 的网格进行划分,并使用型号为 OmniVision OV2640 的 IS 分别置于这 147 个定位点进行测试。详细的实验参数如表 1 所示。

2) 理想条件下的仿真实验

本节将进行理想条件下的仿真实验,系统的误差来源只有 IS 的畸变。定位点的真实世界坐标与计算世界坐标的三维分布如图 5 所示,其中,圆点表示真实世界坐标,叉号表示计算世界坐标,可以发现,叉号与相应的圆点基本重合在一起,且系统的平均定位误差为 0.79 cm。所以本系统在理想条件下定位精度很高。此外,处于边缘的定位点计算世界坐标与真实世界坐标的偏离程度要略大于处于中间区域的定位点,这里可使用畸变模型来解释。位于边缘的定位点所成的像也位于图像的边缘,而图像边缘的像素点畸变越大,所得的像素坐标的误差越大,最终导致定位误差越大。

表 1 实验参数

Table 1 Parameters of experiments

LED	
Model	DELIXISI RT-TD251
Power /W	18
Diameter /cm	18
Image sensor	
Model	OmniVision OV2640
Image size /pixel	1600×1200
Focal length /mm	3.6
Sensor size /mm	6.35
Coefficients of radial distortion	$k_1=0.2011, k_2=0.7885, k_3=0$
Coefficients of centrifugal distortion	$p_1=0.0019, p_2=0.0012$
Field of view /( $^{\circ}$ )	65
Positioning device	
CPU	Ingenic X1500, single core, 1 GHz
Power /W	0.54
Parameters of positioning	
Positioning size	100 cm × 100 cm × 300 cm
Number of positioning points	7 × 7 × 3
Coordinates of LEDs /cm	$L_1(-30, 0, 300), L_2(30, 0, 300)$

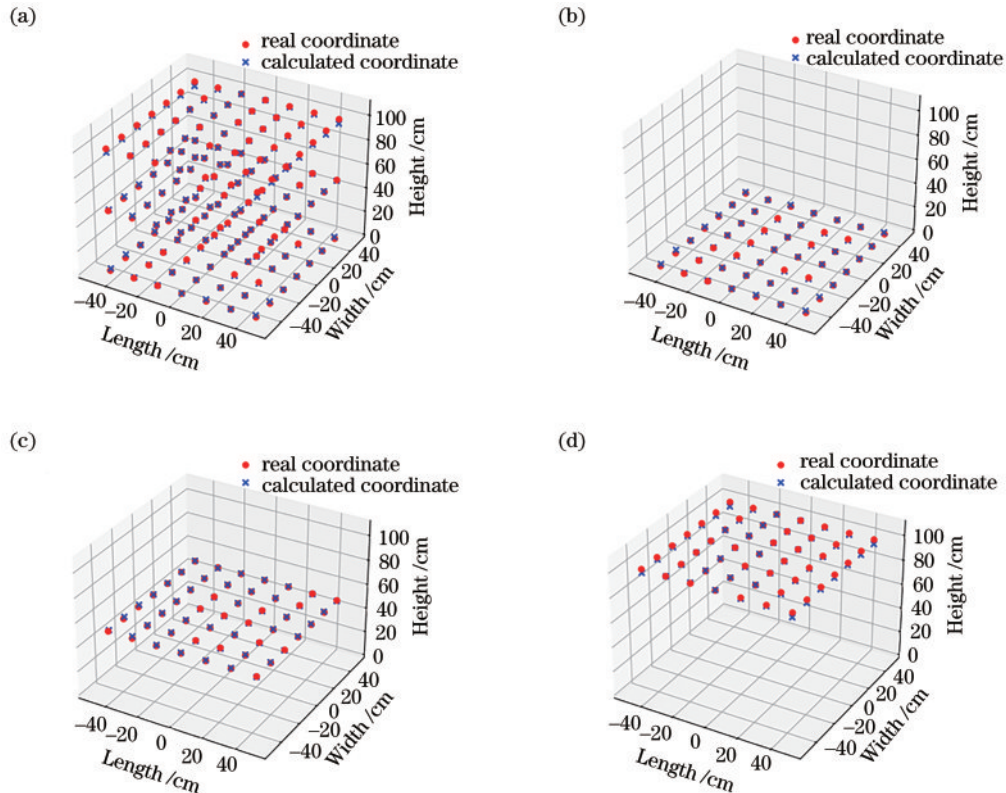


图 5 仿真实验中定位点的真实世界坐标与计算世界坐标的三维分布。(a)所有定位点;(b)高度为 0;(c)高度为 50 cm;(d)高度为 100 cm

Fig. 5 Three-dimensional distributions of real coordinates and calculated coordinates of positioning points in simulation experiments. (a) Whole positioning points; (b) height is 0; (c) height is 50 cm; (d) height is 100 cm



### 3) 存在偏移误差或倾斜误差下的仿真实验

在实际应用中,会不可避免地LED或IS上引入偏移误差或倾斜误差。其中,偏移误差指它们没有放置在准确的位置上,倾斜误差指它们未保持平行。本节将在仿真模型中引入这两种误差来探讨它们对系统定位精度的影响。

为了分析偏移误差对定位精度的影响,在LED和IS的各个轴上分别引入1~5 cm的偏移误差,实验结果如图6所示。引入偏移误差后会使得系统的平均定位误差增大,且它们之间呈线性增长,平均每引入1 cm的偏移误差,就会引入约1 cm的定位误差。此外,在LED的 $x$ 轴上引入误差对系统的定位精度影响最小。

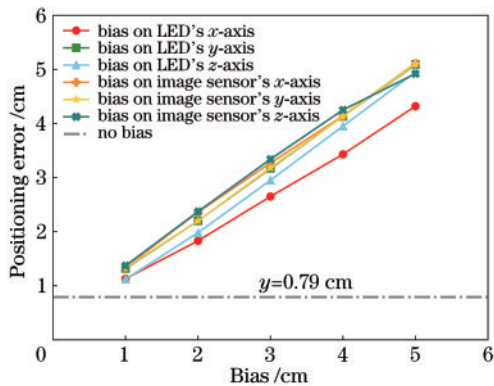


图6 偏移误差对定位精度的影响

Fig. 6 Influence of bias error on positioning accuracy

对于倾斜误差,在实际情况中终端的倾斜角度一般为 $10^\circ$ 以下,因此在IS各个轴上分别引入 $1^\circ\sim 5^\circ$ 的倾斜误差进行分析,实验结果如图7所示。由于在LED上引入倾斜误差本质上就是引入偏移误差,而在IS上引入倾斜误差本质上是改变了针孔成像模型中的旋转矩阵,所以本节只分析后一种情况。由图7可得,在IS上引入倾斜误差仍会使得平均定位误差更大,其中 $x$ 轴和 $y$ 轴的影响基本一致,都是平均每引入 $1^\circ$ 的角度误差,就会引入约5 cm的平均定位误差; $z$ 轴的影响最小,即使引入 $5^\circ$ 的角度误差,平均定位误差

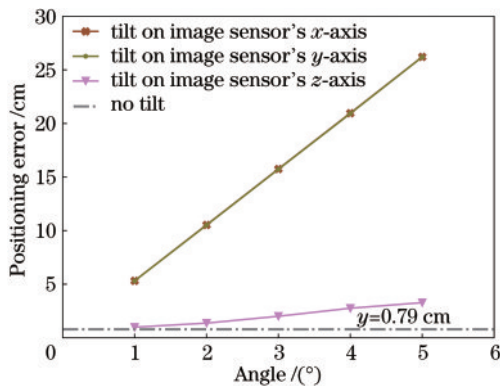


图7 角度误差对定位精度的影响

Fig. 7 Influence of angle error on positioning accuracy

仍小于5 cm。

根据针孔成像模型,并结合这两种误差对系统定位精度的影响,可得:在IS的 $x$ 轴和 $y$ 轴引入角度误差,会分别在一点的像素坐标的 $v$ 坐标和 $u$ 坐标上引入较大的偏差,所以它们对定位精度的影响远大于其他情况,而在IS的 $z$ 轴引入角度误差,会在一点的像素坐标的 $u$ 坐标或 $v$ 坐标或两者上引入较小的偏差,从而使得其对定位精度的影响是最小的。说明本系统中IS对角度的变化是比较敏感的,因此在定位时需确保其与LED平行。所以,本系统适用于使用装有伸缩杆的无人小车对工厂中的物品进行监测等应用场景。

### 4) 实物实验

为了评估本系统在实际应用中的性能,本节将讨论其在实物实验中的定位精度,实验场景及设备如图8所示。其中,选取LED作为发射机,定位设备作为接收机,并将定位结果传输至电脑上查看,两根伸缩杆的高度分别为50 cm和100 cm,这样可将定位设备置于地板和伸缩杆上以模拟在3个不同高度的平面上定位的场景。为了减小偶然误差,每个定位点重复测试5次。其他实验参数如表1所示。

定位点的真实世界坐标与计算世界坐标的三维分布如图9所示。其中,圆点表示真实世界坐标,叉号表示计算世界坐标。相比于仿真实验,叉号与圆点的偏离程度大于仿真实验,但它们基本上也是重合的。经计算,所有定位点的平均定位误差为5.61 cm,最大定位误差为11.23 cm,最小定位误差为1.25 cm,表明该系统可以实现厘米量级的定位精度。

再从不同的高度进行分析,各个高度平面的定位误差分布如图10所示。实验结果表明,0、50、100 cm这3个高度平面的平均定位误差分别为5.54、5.28、6.02 cm,说明本系统在不同的高度平面上都能提供较好的定位精度,且随着高度的变化平均定位误差没有明显的变化,即本系统对于高度的变化具有鲁棒性。此外,处于边缘区域的定位点的平均定位误差一般要比处于中间区域的定位点大,这与仿真实验中的结果是相吻合的。

然后,使用累计分布函数(CDF)作进一步分析,如图11所示。结果表明,90%的定位点的定位误差小于8.10 cm,说明了本系统在大多数情况下都具有较好的定位精度。

最后,对比分析仿真实验与实物实验,实物实验中的平均定位误差更大,结合偏移误差和倾斜误差对定位精度的影响,LED安装不精确、定位平面不平整、IS安装工艺的缺陷等都可能导导致这种结果,从而使得在实际中系统的平均定位误差增大。

### 3.2 定位时间

实时性能是VLP系统的另一个指标,对于实时应用非常重要。一般地,使用定位时间来衡量VLP的实

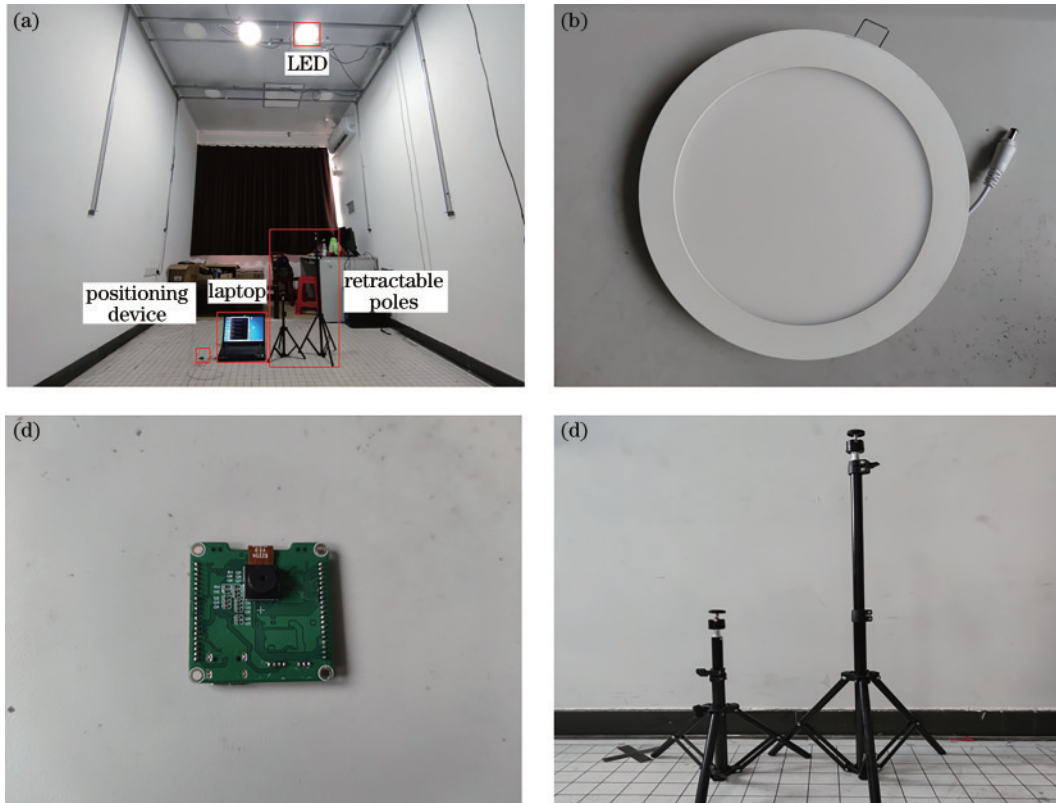


图 8 实验场景及设备图。(a)实验场景图;(b)LED;(c)定位设备;(d)伸缩杆

Fig. 8 Experimental environment and equipment. (a) Experimental environment; (b) LED; (c) positioning device; (d) retractable poles

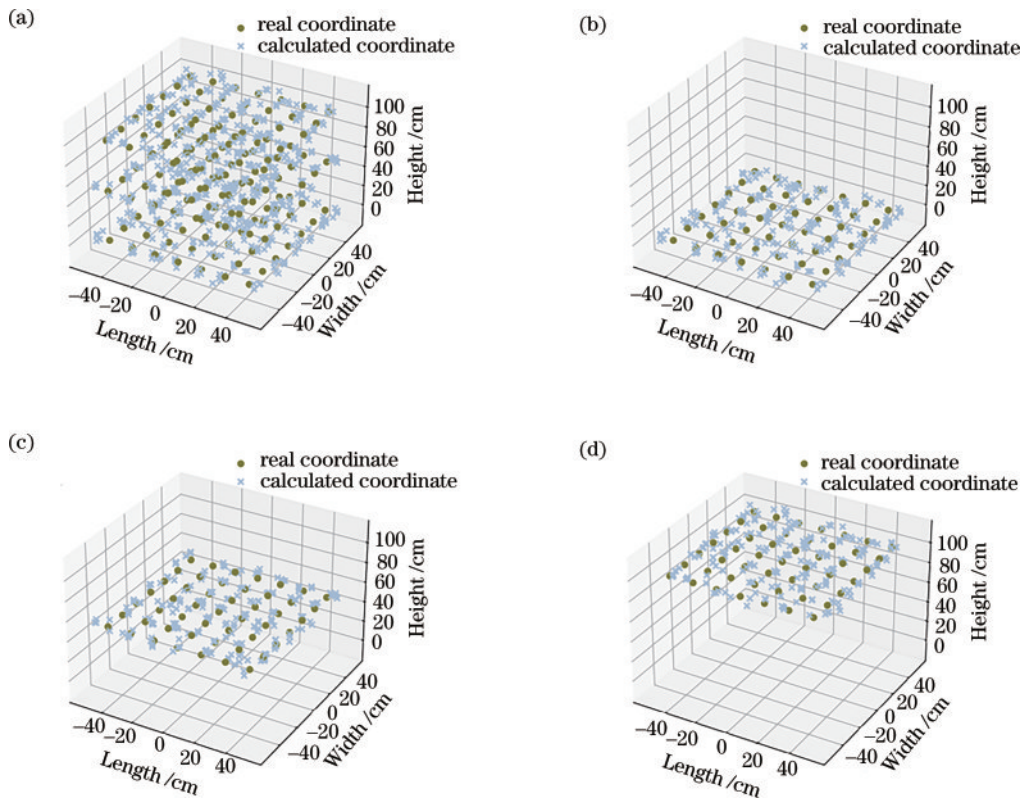


图 9 实物实验中定位点的真实世界坐标与计算世界坐标的三维分布。(a)所有定位点;(b)高度为 0;(c)高度为 50 cm;(d)高度为 100 cm

Fig. 9 Three-dimensional distributions of real coordinates and calculated coordinates of positioning points in physical experiments. (a) Whole positioning points; (b) height is 0; (c) height is 50 cm; (d) height is 100 cm



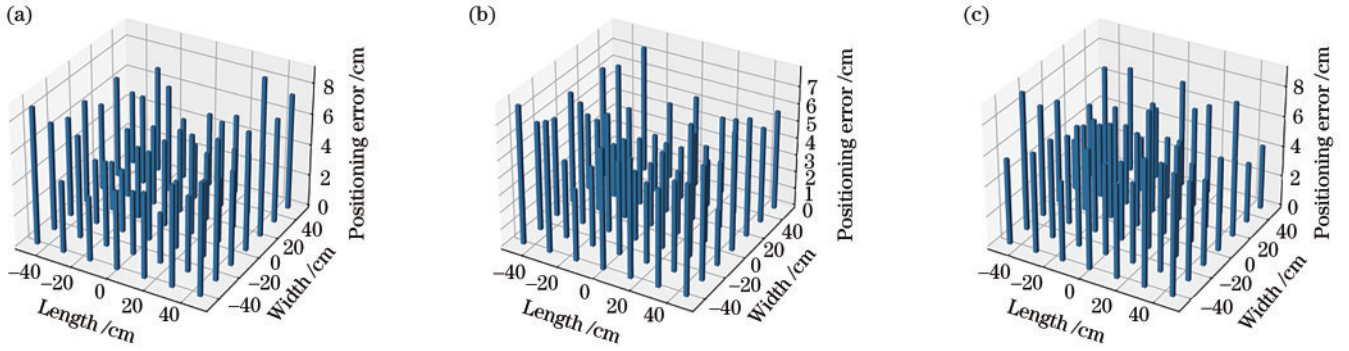


图 10 不同高度平面的定位误差分布图。(a)高度为0;(b)高度为50 cm;(c)高度为100 cm

Fig. 10 Positioning error distribution maps at different heights. (a) Height is 0; (b) height is 50 cm; (c) height is 100 cm

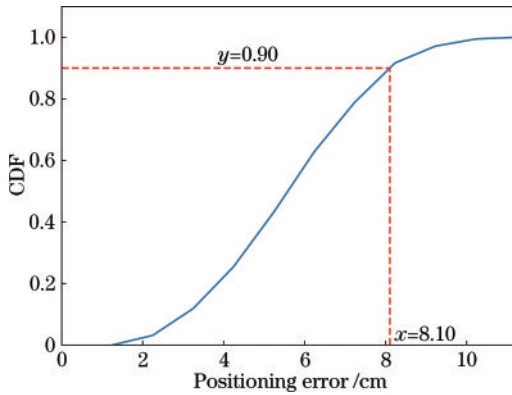


图 11 定位误差的 CDF 图

Fig. 11 CDF of positioning error

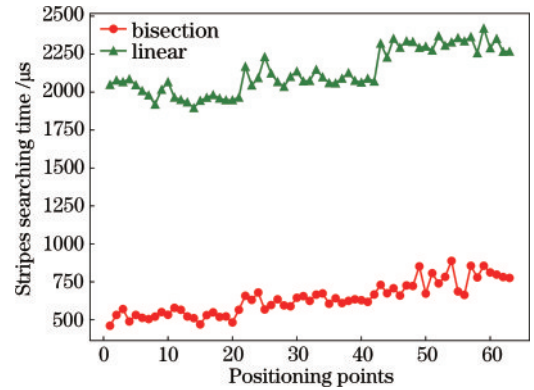


图 12 不同算法的条纹搜索时间

Fig. 12 Stripe searching time of different algorithms

时性能。

1) 条纹搜索时间

条纹搜索是基于 IS 的 VLP 系统中的一个流程,因此条纹搜索时间也会影响系统的定位时间。此外,文献[26]提出了一种先大步长后小步长采样的线性条纹搜索算法<sup>[26]</sup>,为了便于说明,文献[26]的算法简称为 linear,本文所提出的基于二分及双指针的条纹搜索算法简称为 bisection。本实验主要比较两种算法在图像上成功搜索出两组条纹所需的时间,使用了从不同高度、不同位置拍摄的图像作为样本数据,并使用型号为联想小新 Pro-13(AMD)的计算机进行运算,实验结果如图 12 和表 2 所示。本文提出算法的平均条纹搜索时

间为 638.92  $\mu$ s,线性法的平均条纹搜索时间为 2134.35  $\mu$ s,因此本文提出的算法在条纹搜索上的时间性能提升了 70.06%。且在不同的高度平面或不同的区域均优于线性法。而且随着 IS 和 LED 的距离增大或 IS 越靠近 LED 的左边区域时,该算法的时间性能提升越明显。

2) 定位时间

本节为了验证 VLP 系统的时间性能,样本数据来自于实物实验的测试数据,使用了定位设备作为接收机,共测试了 147 个定位点,最终求得平均定位时间为 64.13 ms,表明了系统的定位时间为毫秒量级,具有良好的实时性能。

表 2 不同算法的条纹搜索时间及对比分析

Table 2 Stripe search time and comparative analysis of different algorithms

Stripe searching time	All	Height /cm			Area		
		0	50	100	Left	Middle	Right
Bisection / $\mu$ s	638.92	525.05	631.00	760.71	621.00	642.19	653.57
Linear / $\mu$ s	2134.35	1989.24	2097.10	2316.71	2154.33	2129.43	2119.29
Improved in percentage /%	70.06	73.61	69.91	67.16	71.17	69.84	69.16

4 结 论

本文提出了一种基于双 LED 和 IS 的三维 VLP 系统,利用 LED 在图像上的几何特征即可实现三维定

位。结合针孔成像模型和畸变模型搭建了仿真模型,并开发了定位设备用于实际测试。在 100 cm  $\times$  100 cm  $\times$  300 cm 的空间中,仿真实验中的平均定位误差为 0.79 cm;实物实验中的平均定位误差为 5.61 cm,

两者的偏差可能由在 LED 或 IS 上的偏移误差或倾斜误差所导致,且 90% 的定位误差在 8.10 cm 以下。此外,本文提出了一种基于二分及双指针的条纹搜索算法,可快速地确定条纹在图像上的位置。相比于线性条纹搜索算法,提出算法的时间性能可提升 70.06%。实验结果表明,提出系统的平均定位时间为 64.13 ms。因此,本文所提出的 VLP 系统简化了系统的复杂度,且提高了定位精度和实时性能,具有很大的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Almadani Y, Ijaz M, Rajbhandari S, et al. Dead-zones limitation in visible light positioning systems for unmanned aerial vehicles[C]//2019 Eleventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), July 2-5, 2019, Zagreb, Croatia. New York: IEEE Press, 2019: 419-421.
- [2] Alarifi A, Al-Salman A M, Alsaleh M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: analysis and recent advances[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 707.
- [3] Luo J H, Fan L Y, Li H S. Indoor positioning systems based on visible light communication: state of the art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2871-2893.
- [4] Xu S W, Chen C C, Wu Y, et al. Adaptive residual weighted  $K$ -nearest neighbor fingerprint positioning algorithm based on visible light communication[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4432.
- [5] Torres J C, Montes A, Mendoza S L, et al. A low-cost visible light positioning system for indoor positioning[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5145.
- [6] Afzalan M, Jazizadeh F. Indoor positioning based on visible light communication: a performance-based survey of real-world prototypes[J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, 52(2): 35.
- [7] 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.
- [8] Guan W P. Research on high precision indoor visible light positioning algorithm based on image sensor[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [9] Guan W P, Chen X, Huang M X, et al. High-speed robust dynamic positioning and tracking method based on visual visible light communication using optical flow detection and Bayesian forecast[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7904722.
- [9] Naz A, Hassan N U, Pasha M A, et al. Single LED ceiling lamp based indoor positioning system[C]//2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things, February 5-8, 2018, Singapore. New York: IEEE Press, 2018: 682-687.
- [10] 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): 7906512.
- [11] Lam E W, Little T D C. Indoor 3D localization with low-cost LiFi components[C]//2019 Global LIFI Congress (GLC), June 12-13, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019.
- [12] Li Q L, Wang J Y, Huang T, et al. Three-dimensional indoor visible light positioning system with a single transmitter and a single tilted receiver[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10): 106103.
- [13] 邓勇, 刘赣. 基于BAS-LSSVM的室内可见光指纹定位方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1106005.
- [13] Deng Y, Liu G. Indoor visible light fingerprint location method based on BAS-LSSVM[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1106005.
- [14] 秦岭, 王东星, 王凤英, 等. 基于极限学习机神经网络的室内可见光定位方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(3): 0304002.
- [14] Qin L, Wang D X, Wang F Y, et al. Indoor visible light positioning method based on extreme learning machine neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(3): 0304002.
- [15] 许浩, 王旭东, 吴楠. 基于卷积神经网络的室内可见光指纹定位方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1706008.
- [15] Xu H, Wang X D, Wu N. Indoor visible light fingerprint positioning scheme based on convolution neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1706008.
- [16] Zhang R, Zhong W D, Qian K M, et al. Image sensor based visible light positioning system with improved positioning algorithm[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 6087-6094.
- [17] Yang Y, Li C Y, Bao R Z, et al. Multi-angle camera assisted received signal strength algorithm for visible light positioning[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(23): 7435-7446.
- [18] Lee J W, Kim S J, Han S K. 3D visible light indoor positioning by bokeh based optical intensity measurement in smartphone camera[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 91399-91406.
- [19] Zhang R, Zhong W D, Kemao Q, et al. A single LED positioning system based on circle projection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 7905209.
- [20] 刘果. 3D传感器标定算法及软件设计研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [20] Liu G. Research on the calibration algorithm and software design of 3D sensor[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [21] Slabaugh G G. Computing Euler angles from a rotation matrix [EB/OL]. (2022-02-05) [2022-05-19]. <https://minio-github.io/rtcw-wet-blender-model-tools/publications/EulerToMatrix.pdf>.
- [22] Wieneke B. Stereo-PIV using self-calibration on particle images[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 267-280.
- [23] Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments[J]. *Machine Vision and Applications*, 2001, 13(1): 14-24.
- [24] 舒娜. 摄像机标定方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [24] Shu N. Research on camera calibration method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [25] 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): 8200711.
- [26] Lin P X, Hu X B, Ruan Y K, et al. Real-time visible light positioning supporting fast moving speed[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14503-14510.