

## 成像型可见光定位系统优化研究

刘翔宇<sup>①</sup> 刘保睿<sup>②</sup> 宋 嵩<sup>\*②</sup> 郭 磊<sup>①③</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 智能通信与网络安全研究院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110819)

<sup>③</sup>(杭州中科先进技术研究院 杭州 310005)

**摘 要：**现有室内成像型可见光定位系统多注重定位精度的提高，而忽略了系统的解码识别成功率和定位算法的适用性。表现在：(1)接收端捕获带有模糊效应的图像会导致解码识别率变低；(2)定位系统移动状态下采用单一算法定位，且双灯算法的旋转角存在非确定性，导致定位精度大幅度变化，甚至定位系统失效。该文首先提出基于条纹宽度比的解码算法，消除人为设定硬阈值的缺陷；然后，提出基于旋转角优化的联合定位算法，利用方向传感器辅助确认旋转角并联合定位；此外，还设计了简易导航功能。实验结果表明，该算法使得解码识别率在1.5 m内可达99%，系统平均定位误差为3.998 cm。

**关键词：**可见光定位；条纹宽度比；定位算法；优化系统

**中图分类号：**TN92

**文献标识码：**A

**DOI:** 10.11999/JEIT211019

## Research on Optimization of Camera-based Visible Light Positioning System

LIU Xiangyu<sup>①</sup> LIU Baorui<sup>②</sup> SONG Song<sup>②</sup> GUO Lei<sup>①③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Intelligent Communication and Network Security, School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(School of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

<sup>③</sup>(Hangzhou Institute of Advanced Technology, Hangzhou 310005, China)

**Abstract:** The existing indoor visible light positioning systems focus more on the positioning accuracy improvement and ignores the system's decoding success rate and the applicability of the positioning algorithm. The specific aspects are as follows: (1) Captured images with the blurring effect result in a lower decoding recognition rate; (2) Most existing systems use a single algorithm to achieve the positioning, and the dual-LED positioning algorithm exists the uncertainty for the rotation angle. The above problems result in the positioning accuracy decreasing or even the positioning system failure. First, the decoding algorithm based on the fringe width ratio is proposed to remove the defect of the artificial hard-threshold. Then, the joint positioning algorithm based on optimized rotation angle is proposed, which uses the smartphone orientation sensor to calibrate the rotation angle. Furthermore, a simple navigation application is designed. Experimental results show that the designed algorithms raise the decoding recognition rate up to 99% within 1.5 m, and the average positioning error is 3.998 cm.

**Key words:** Visible light positioning; Fringe width ratio; Positioning algorithm; Optimization system

### 1 引言

随着无线通信技术的发展和智能移动终端的更

新换代，基于位置的服务(Location Based Service, LBS)已经成为人们生活中不可缺少的一部分，室内活动的逐渐增加使人们对室内定位的需求也越来越大<sup>[1,2]</sup>。

与只需要米级别精度的室外定位技术相比，室内定位环境动态性更强，需要分米乃至厘米级别的精度。目前，室内无线定位的主流方案有：无线局域网(Wi-Fi<sup>[3]</sup>)、蓝牙(Bluetooth<sup>[4]</sup>)、射频识别(Ra-

收稿日期：2021-09-24

\*通信作者：宋嵩 songsong@stumail.neu.edu.cn

基金项目：重庆市高校创新研究群体(CXQT21019)

Foundation Item: Chongqing University Innovation Research Group (CXQT21019)

tio Frequency IDentification, RFID<sup>[5]</sup>)、超宽带(Ultra Wide Band, UWB<sup>[6]</sup>)和Zigbee<sup>[7]</sup>等定位技术。但这些技术却存在定位成本与定位精度之间难以均衡的问题。例如,超宽带技术能够提供厘米级的定位服务,但是需要专业设备进行部署,费用高昂。Wi-Fi技术部署成本低廉,但是定位精度仅为米级别。

与这些定位方案相比,利用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的成像型可见光定位(Visible Light Positioning, VLP)技术具有同时满足高精度和部署成本低的优势,受到了国内外广泛的关注<sup>[8,9]</sup>。室内成像型可见光定位系统的应用场景如图1所示。

目前,成像型可见光定位技术的研究者多集中于提高系统的定位精度<sup>[10,11]</sup>,忽略了现有定位系统在信标解码识别率和定位算法适用性的研究依旧不足。这主要体现在:

(1)在成像型接收端解码过程中,接收端利用捕获图像中特定条纹的宽度计算单位bit宽度<sup>1)</sup>,以此判定其他条纹并进行解码。但接收端移动会使得捕获到的图像产生模糊效应<sup>[12]</sup>,进而导致图像中的条纹宽度发生变化,降低接收端的解码识别率,影响定位系统性能;

(2)在成像型接收端定位算法过程中,现有双灯定位算法通过将旋转角定义为“世界坐标系与图像坐标系的夹角”实现坐标等效转换<sup>[12]</sup>,但这一夹角无法在所有正向旋转与逆向旋转条件下都计算正确,有可能导致该次定位失效,降低系统的平均定位精度与实效性;

(3)移动状态下接收端捕捉LED数量是动态变化的,而现有定位系统采用固定的定位算法实现定位。例如,基于双灯的定位算法,当系统捕获1盏LED时,定位系统失效,当捕获到多余3盏LED时,定位算法仍采用2盏LED进行定位。这会导致定位系统在移动状态下的精度产生大范围幅度变化。

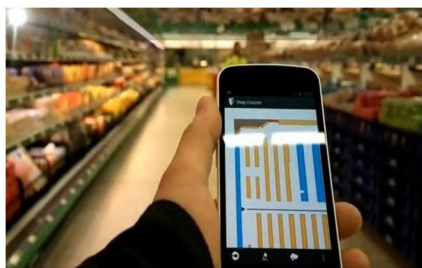


图1 室内可见光定位技术应用场景

<sup>1)</sup>单位bit宽度指一位编码形成的条纹在图像中所占像素点的个数。

针对上述问题,本文在成像型可见光定位系统的基础上,提出如下优化解决方案:

(1)本文设计了基于条纹宽度比(Fringe Width Ratio, FWR)的解码算法。本算法通过引入条纹宽度比,增大条纹判决范围,使得因模糊效应导致宽度变化的条纹被成功识别。

(2)针对双灯算法中旋转角定义不明确的问题,本文提出旋转角优化方案。本方案将水平旋转角度重新定义为“以世界坐标系为基准,图像坐标系顺时针旋转的角度”,去除了“人为设置阈值来判决正负双旋转角中的正确角度”这一不稳定的判定机制,保证了旋转角的唯一性和准确性;

(3)针对接收端移动状态下定位精度变化问题,本文设计了基于旋转角优化的联合定位算法。当接收端仅捕获一盏LED时,联合定位算法使用智能手机的传感器确认旋转角,并进行单灯定位;当接收端捕获两盏及以上LED时,联合定位算法采用旋转角优化后的双灯算法定位。

最后,本文搭建实验平台进行定位与导航功能测试。在3.2×3.0 m的空间下,设计的解码算法在1.5 m内能够达到99%以上的解码识别率;设计的定位算法平均定位误差为3.998 cm。优化的定位系统能够满足以工厂内智能小车的物流运输为模拟场景的室内定位与简易导航需求,提升了定位系统中解码识别成功率和定位算法适用性。

## 2 经典可见光定位系统

### 2.1 经典系统模型

成像型室内可见光定位系统模型分为两个部分<sup>[13,14]</sup>:发送端与接收端,如图2所示。

在发送端,LED通过微控制处理器进行信号编码与调制,使得每盏LED发出带有自身位置信息的唯一信标<sup>[15]</sup>。在接收端,智能手机捕获带有LED的图像,并进行一系列的图像处理来解码与识别出LED的信标信息。然后,系统计算出接收端的世界坐标,实现定位。

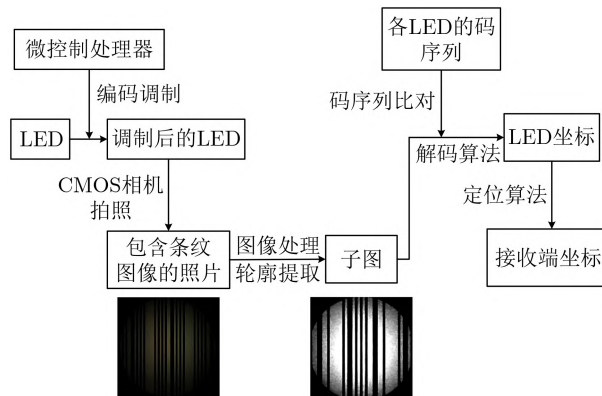


图2 基于图像处理的室内可见光定位系统

## 2.2 经典图像解码算法

在可见光定位系统中，发送端LED将发送信标的序列头设置为持续时间最长的高电平。这使得接收端在捕获图像中仅需找寻最宽亮条纹便可识别出捕获的序列头。然后，解码算法利用捕获的序列头宽度计算单位bit宽度。有了单位bit宽度后，系统便能够判断每个捕获条纹的宽度所携带的bit信息，实现解码，如图3示。

## 2.3 经典定位算法

(1) 双灯算法。双灯定位算法原理如图4所示，系统考虑接收端完全平行图4(a)与天花板及水平面旋转图4(b)两种情形。其中 $(X_A, Y_A)$ ,  $(X_B, Y_B)$ 为LED的世界坐标， $(X_a, Y_a)$ ,  $(X_b, Y_b)$ 为捕获图像中LED对应条纹中心点的像素坐标， $(X_{mid}, Y_{mid})$ 为捕获图像中心点像素坐标， $D_1$ 为两盏LED在世界坐标系中的距离， $D_2$ 为捕获图像中两盏LED条纹中心点的像素距离， $(X, Y)$ 为待求的接收端坐标。

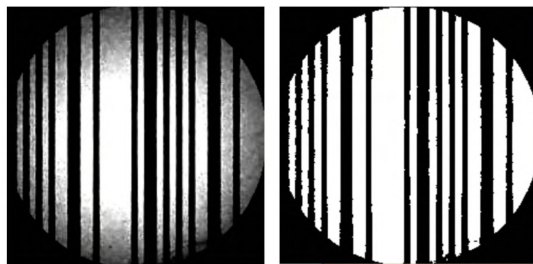
在图像坐标系和世界坐标系完全平行的情况下，根据相似三角形原理，可得出关系为

$$\left. \begin{aligned} \frac{D_1}{D_2} &= \frac{X_A - X}{X_a - X_{mid}} = \frac{X_B - X}{X_b - X_{mid}} \\ \frac{D_1}{D_2} &= \frac{Y_A - Y}{Y_a - Y_{mid}} = \frac{Y_B - Y}{Y_b - Y_{mid}} \\ D_1 &= \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \\ D_2 &= \sqrt{(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

进一步地，求得接收端坐标为

$$\left. \begin{aligned} X &= X_A + (X_{mid} - X_a) \times \frac{D_1}{D_2} \\ &= X_B + (X_{mid} - X_b) \times \frac{D_1}{D_2} \\ Y &= Y_A + (Y_{mid} - Y_a) \times \frac{D_1}{D_2} \\ &= Y_B + (Y_{mid} - Y_b) \times \frac{D_1}{D_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

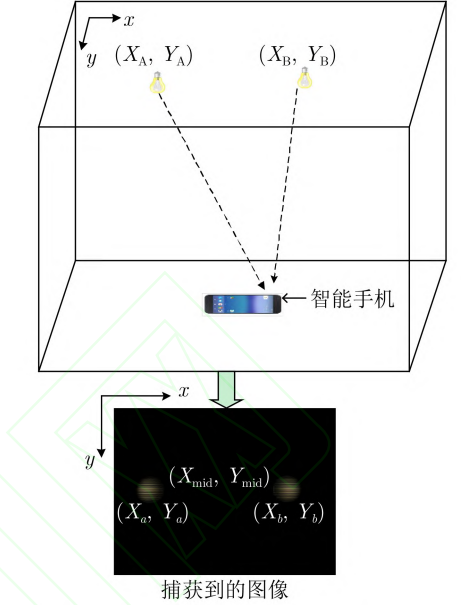
当接收端旋转时，如图4(b)所示。记旋转角度为 $\theta$ ， $XOY$ 为水平图像坐标系， $X_rOY_r$ 为旋转图像



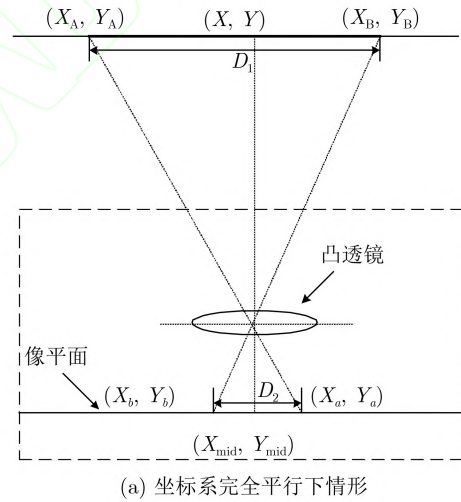
(a) 捕获LED图像灰度化 (b) 灰度图像二值化

图3 捕获LED图像二值化后进行解码

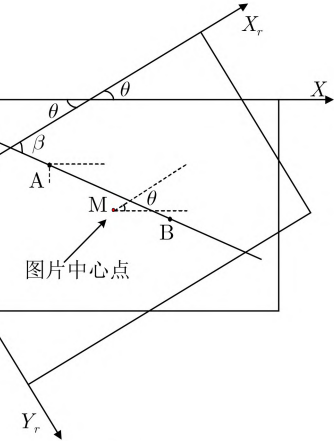
坐标系。记 $(X_f, Y_f)$ 为LED在水平图像坐标系下的坐标， $(X_f^r, Y_f^r)$ 为LED在旋转图像坐标系下的坐标，满足关系为



捕获到的图像



(a) 坐标系完全平行下情形



(b) 坐标系旋转情形

图4 两盏LED的可见光定位算法 图5 一盏LED的可见光定位算法



$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_f^r \\ Y_f^r \end{pmatrix} \quad (3)$$

旋转角 $\theta$ 可以通过式(4)获得。即：通过两LED与世界坐标系的 $X$ 轴夹角为 $\alpha$ ，以及旋转图像坐标系的 $X_r$ 轴与捕获图像中两LED连线的夹角 $\beta$ 。根据图4(b)，则 $\theta, \alpha, \beta$ 有关系为

$$\theta = \beta - \alpha \quad (4)$$

正确获取 $\theta$ 后，利用式(1)—式(4)实现接收端水平旋转下情况的定位。

(2)单灯算法。一盏LED的可见光定位算法原理如图5所示。 $(X_s, Y_s)$ 为LED的世界坐标， $(X_f, Y_f)$ 为LED中心点的像素坐标， $(X_{mid}, Y_{mid})$ 为图像中心点的像素坐标， $D_1$ 为LED表面的直径， $D_2$ 为LED轮廓的像素直径， $(X, Y)$ 为待求的接收端坐标。

在世界坐标系与图像坐标系完全平行的情况下，根据相似三角形原理，可得出关系为

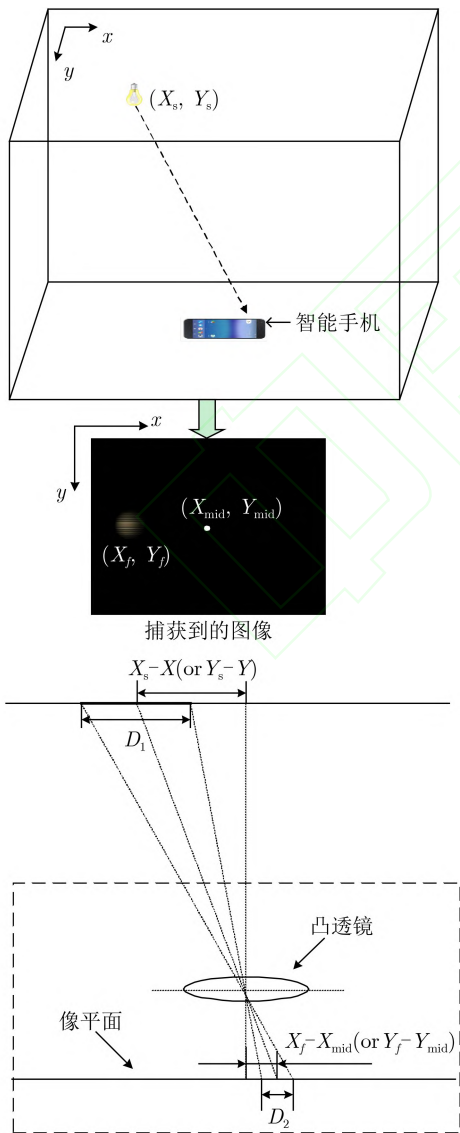


图5 一盏LED的可见光定位算法

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{X_s - X}{X_f - X_{mid}} = \frac{Y_s - Y}{Y_f - Y_{mid}} \quad (5)$$

进一步地，求得接收端坐标为

$$\left. \begin{aligned} X &= X_s - (X_f - X_{mid}) \times \frac{D_1}{D_2} \\ Y &= Y_s - (Y_f - Y_{mid}) \times \frac{D_1}{D_2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

### 3 基于条纹宽度比的解码算法

为了使图像解码算法能够克服模糊效应，并在移动状态下具有较高的解码识别率，本节提出基于条纹宽度比的图像解码优化算法。

#### 3.1 优化方案

现有图像解码算法效果不佳的原因是由于对条纹宽度判别要求过于严格。因此，本优化算法引入条纹宽度比，使一定宽度范围内的条纹都可被视为同种条纹。优化的解码算法步骤如下：

步骤1 智能手机对捕获的图像提取得到多个LED子图；

步骤2 对多个子图进行二值化；

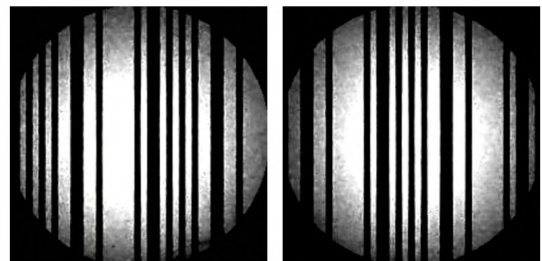
步骤3 取得子图中间一行每个像素点的红绿蓝(Red Green Blue, RGB)值，利用灰度与RGB值关系 $\text{Gray}(i) = 0.299 * R(i) + 0.587 * G(i) + 0.144 * B(i)$ 计算每点的灰度值；

步骤4 比较前后两点的灰度值大小，若满足 $\text{Gray}(i) > \text{Gray}(i-1)$ ，则判定第 $i$ 列为白条纹起点。反之若 $\text{Gray}(i) < \text{Gray}(i-1)$ ，则判定第 $i$ 列为黑条纹起点；

步骤5 判断次长白条纹宽度是否大于最长白条纹宽度的90%。若大于，则进入步骤6-1，否则进入步骤6-2；

步骤6-1 最长的两个条纹均为序列头，对这两个条纹区间内条纹进行解码。若第 $x(y)$ 个条纹为最(次)长的条纹，则从第 $i = x + 1$ 个条纹开始解码；

步骤6-2 子图中仅包含一个完整序列头，从序列头前第7个条纹到序列头后第8个条纹进行解码(参见图6)；



(a) 仅有1个序列头

(b) 包含2个序列头

图6 子图中包含序列头的不同情形

步骤7 判断条纹的颜色。若解码为黑条纹，对大于最短黑条纹1.65倍宽度的条纹判别为黑2<sup>2)</sup>，否则判别为黑1。若解码为白条纹，对大于3倍最短白条纹宽度的条纹判别为白5，对最短白条纹宽度1.6倍到3倍之间的条纹判别为白2，其余条纹判别为白1；

步骤8 判定 $i$ 是否等于 $y$ ，即是否完成区间内最后一个条纹解码。若是，则解码工作结束；若不是，则令 $i = i + 1$ ，并重复步骤7。

### 3.2 优化分析

优化的解码算法增加如下部分：

(1)二值化。捕获LED子图进行二值化处理，如图3所示。通过图3可以发现，二值化处理后像素值仅包含灰度值0和255，解码算法不再需要人为设置阈值判别像素点的灰度值，降低了现有算法步骤3和步骤4中进行颜色判别所带来的不稳定性。

(2)多重解码方式。由于捕获LED时预览框中条纹是循环滚动的，子图中可能出现包含一个或两个完整的序列头情形，如图6所示。

当子图中只包含一个完整序列头时，现有解码算法无法以序列头为起点捕获完整的信号周期，需要重新捕获图像进行解码，增大了系统的处理时间。本优化算法则提供解码方式。以图6(a)为例，当其中仅包含一个完整的序列头时，序列头的位置大致位于子图中央，为了对每盏LED都能稳定形成解码区间，选取序列头前7个与后8个条纹作为解码区间。然后，系统对包含序列头在内共16个条纹进行解码，并为该解码方式单独赋予码序列。

(3)引入条纹宽度比。在本文，子图中条纹的宽度采用数字进行标识，数字“5”表示此条纹像素宽度为最短条纹宽度的5倍，如图7所示。在图7中，除了被标注的条纹以外，其余白条纹均为白1，黑条纹均为黑1，条纹种类人眼能够轻易辨识出来。

由于子图受到模糊效应的影响，各条纹的宽度并不完全满足式(7)

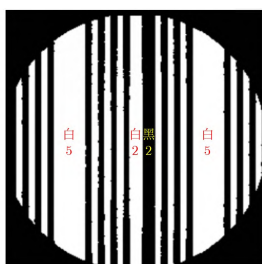


图7 条纹种类示意

<sup>2)</sup>黑2表示该条纹是最短黑条纹宽度的2倍。

$$W_{B1} = W_{W1} = W_{B2}/2 = W_{W2}/2 = W_{W5}/5 \quad (7)$$

其中， $W_{Bx}$ 表示黑 $x$ 条纹宽度， $W_{Wx}$ 表示白 $x$ 条纹宽度， $x = 1, 2, 5$ 。

但人眼依旧可以辨别条纹种类。仿照人眼可以将一定范围内宽度的条纹辨别为同一种类的条纹这一现象，引入条纹宽度比，增加算法对条纹宽度的容错，提高解码识别率。

具体引入方式如下：

(1)在解码方式选择阶段，利用次长条纹与最长条纹的宽度比判定次长条纹是否为白5，得到子图中序列头的数量，据此选择解码方式；

(2)在条纹种类判别阶段，利用被解码条纹的宽度与子图中该颜色最短条纹宽度的比例关系判定被解码条纹的种类；

(3)在条纹宽度比数值的选择问题上，通过大量测试不同子图中各条纹的宽度，最终选定适用于所有子图条纹的比例数值，进行条纹判定。

## 4 基于旋转角优化的联合定位算法

本节介绍室内定位系统的定位算法优化方案。

### 4.1 旋转角唯一化

传统定位算法中，理论上旋转角存在两个解， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 计算的定位结果只有一个是正确的。但人为设置的阈值可能使得旋转角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 计算的定位结果都被判定为正确的，两者取均值会使该次定位失效，降低系统的平均定位精度。

具体地，当两盏LED图像解码成功后，现有定位算法利用子图圆心的像素坐标计算出 $\alpha$ 和 $\beta$ ，如图4(b)。然后，算法分别将旋转角 $\theta_1 = \alpha - \beta$ 和旋转角 $\theta_2 = \beta - \alpha$ 带入式(4)，通过式(3)计算出A灯定位结果( $X_{\theta iA}, Y_{\theta iA}$ )及B灯定位结果( $X_{\theta iB}, Y_{\theta iB}$ )，定位结果带入式(8)

$$\begin{cases} |X_{\theta iA} - X_{\theta iB}| \leq 0.6 \\ |Y_{\theta iA} - Y_{\theta iB}| \leq 0.6 \end{cases} \quad (8)$$

其中，0.6(单位：m)为人为设置的判别阈值。 $i = 1$ 为旋转角 $\theta_1$ 的情况， $i = 2$ 为旋转角 $\theta_2$ 的情况。若旋转角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 计算的定位结果都满足式(8)，则取两个角度下定位结果的均值作为最终定位结果；若只有一个旋转角满足式(8)，则取该角度下的定位结果为最终结果；两旋转角定位结果都不满足式(8)，则定位失败。

为了将旋转角唯一化，在捕获图像时记录智能手机方向传感器的数据，并与双灯算法中计算出的两个旋转角进行对比。本文发现：

(1)如果旋转角不接近 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ ，智能手机方向传感器角度与 $\theta_1 = \alpha - \beta$ 相近，且 $\theta_1$ 计算的定位结果与实际测量的结果更接近；

(2)如果旋转角接近 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ , 智能手机方向传感器角度与 $\theta_1$ 或 $\theta_2$ 接近, 但始终 $\theta_1$ 计算的定位结果与实际测量的结果更接近。

因此, 本文以方向传感器数值显示规则为思路(数值以正北方向为基准, 顺时针旋转的角度范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ ), 将算法中的旋转角定义为“以世界坐标系为基准, 图像坐标系顺时针旋转的角度”。通过这样定义, 可以获得正确的定位结果。

此优化点解决了式(8)设置阈值判别旋转角可能出现将错误结果以均值形式计入最终结果中导致该次定位失效的问题, 对旋转角进行了唯一化定义, 提升了系统的定位精度。

## 4.2 联合定位

多数情况下, 可见光定位系统接收端在移动状态下捕获到LED的数量是非固定的。若系统只使用单灯算法, 会由于传感器的因素导致定位精度偏低; 若系统只使用多灯算法, 当接收端仅捕获一盏LED时无法定位。

因此, 本文针对上述问题提出了应对接收端在移动状态下捕获任意数量LED情况的联合定位算法。

图8为本优化算法方案的设计思路。通过在实验场景及其它不同场所测试后发现, 正常成年人手持智能手机对LED进行移动拍照时, 屏幕捕获到一或两盏LED。虽然也能捕获到3盏及以上LED, 但是几率较低, 这是由于光源分布稀疏及手机视场角受限的原因。为了尽量降低定位复杂度, 当本系统捕获到3盏及以上LED时, 定位算法不采用诸如三边定位法的多灯算法, 而是仅选取其中两盏LED进行优化的双灯算法定位。

具体地, 本文设计的算法加入了基于接收端捕捉到信标数量的自适应算法切换机制, 结合优化点(1), 当解码成功的信标数量大于等于2时使用优化后的双灯算法, 同时加入单灯算法弥补解码成功的信标数量为1时的空白, 做到“只要有至少1个能够成功解码的子图, 定位就不会失败”。就定位结果

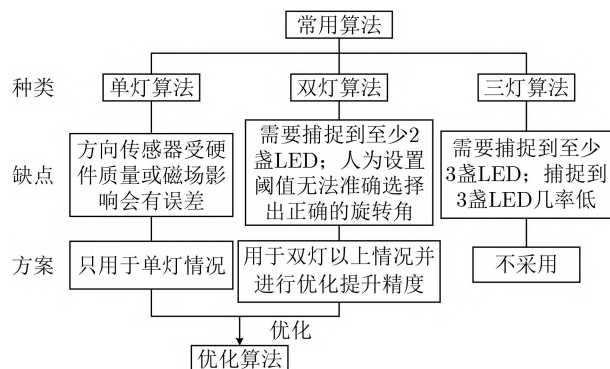


图8 基于旋转角优化的联合定位算法

而言, 降低了接收端在移动状态下定位失败的可能性, 整体而言提升了定位算法的鲁棒性。

## 5 简易导航

本节从用户实际需求出发, 结合实验环境内有限条件, 设计简易导航算法。

### 5.1 导航规划

图9左为实验测试场景(取自智能手机应用界面), 该图向上指北, 以房间西北角为原点,  $x$ 轴正方向指东,  $y$ 轴正方向指南。图9中1~9号标记为9盏LED的位置, 坐标对应为 $(x_1, y_1) \sim (x_9, y_9)$ 。每两盏相邻的LED间的距离大致相同, 9盏LED形成了田字格。

导航算法以工厂内智能小车接收端进行物流运输为模拟应用场景。假设智能小车只有在田字格上的路径为小车行驶安全路径, 其余区域不适合小车进行工作。若小车处于安全路径外, 需要优先执行回到安全路径上的指令。

现小车处于房间内能够捕获到LED的某一位置 $(x, y)$ , 目标地点为某盏LED正下方 $(x', y')$ , 如图9右所示。根据选择的目标点, 设计算法引导智能小车首先走最短路线回到安全路径上, 然后再沿着安全路径走最短距离到达目标地点。对于图9右中的情况, 若智能小车前往2号LED下, 则导航路线应为 $(x, y) \rightarrow (x, y_3) \rightarrow 8号LED \rightarrow 5号LED \rightarrow 2号LED$ 。

### 5.2 导航实施方案

图9右为一个矩形的无向无权图, 其特点为图中任意一个矩形对角的两个节点间所有路径的路程相同。

根据此特点, 简易导航算法主要步骤如下:

步骤1 将 $x$ 分别与 $x_1, x_2, x_3$ 对比,  $y$ 分别与 $y_1, y_2, y_3$ 对比, 当 $x$ 或 $y$ 与对比数值相同时, 说明出发点 $(x, y)$ 已在安全路径上, 执行步骤3。否则说明 $(x, y)$ 在安全路径外, 检查 $(x, y)$ 是否在安全路径围成的区域内部, 若是则执行步骤2-1, 否则执行步骤2-2;

步骤2-1 查询 $(x, y)$ 距离哪条路径最近, 对 $|x - x_i|, |y - y_i| (i = 1, 2, 3)$ 共6个距离进行排序, 得

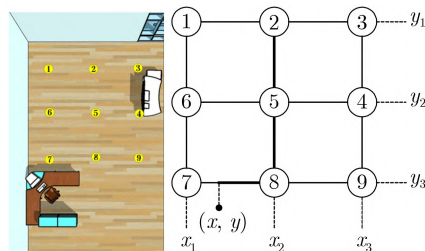


图9 导航算法模拟场景及实施方案



到其中的最小值  $\min(|x - x_i|)$  或  $\min(|y - y_i|)$ 。若  $(x, y)$  离东西方向的路径最近, 则令  $y = y - (y - y_n)$  ( $n$  为  $\min(|y - y_i|)$  中  $i$  的值), 若  $(x, y)$  离南北方向的路径最近, 则同理, 智能小车回到安全路径后, 执行步骤3;

步骤2-2 判断  $(x, y)$  相对于田字格的方位, 根据不同方位使智能小车采取不同的导航路线, 分为8种情况:

(1)  $y < y_1$  且  $x_1 \leq x \leq x_3$  为正北方位, 令  $y = y_1$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x, y_1)$ ;

(2)  $y > y_3$  且  $x_1 \leq x \leq x_3$  为正南方位, 令  $y = y_3$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x, y_3)$ ;

(3)  $x < x_1$  且  $y_1 \leq y \leq y_3$  为正西方位, 令  $x = x_1$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_1, y)$ ;

(4)  $x > x_3$  且  $y_1 \leq y \leq y_3$  为正东方位, 令  $x = x_3$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_3, y)$ ;

(5)  $x < x_1$  且  $y < y_1$  为西北方位, 令  $x = x_1$ ,  $y = y_1$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_1, y_1)$ ;

(6)  $x > x_3$  且  $y < y_1$  为东北方位, 令  $x = x_3$ ,  $y = y_1$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_3, y_1)$ ;

(7)  $x < x_1$  且  $y > y_3$  为西南方位, 令  $x = x_1$ ,  $y = y_3$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_1, y_3)$ ;

(8)  $x > x_3$  且  $y > y_3$  为东南方位, 令  $x = x_3$ ,  $y = y_3$ , 即  $(x, y) \rightarrow (x_3, y_3)$ ; 然后执行步骤3;

步骤3 使用步骤1方法判断智能小车当前处于东西方向的路径还是南北方向的路径, 若处于东西方向路径执行步骤4-1, 若处于南北方向路径执行步骤4-2;

步骤4-1 智能小车沿  $x$  轴方向移动至与目标点横坐标一致的路径上, 即  $(x, y) \rightarrow (x', y)$ , 再令智能小车沿  $y$  轴方向移动至定位目标点, 即  $(x, y) \rightarrow (x', y) \rightarrow (x', y')$ , 导航结束;

步骤4-2 智能小车先沿  $y$  轴方向移动至与目标点横坐标一致的路径上, 即  $(x, y) \rightarrow (x, y')$ , 再令智能小车沿  $x$  轴方向移动至定位目标点, 即  $(x, y) \rightarrow (x, y') \rightarrow (x', y')$ , 导航结束。

## 6 实验测试

本节分别从解码识别率、定位精度以及导航功能对设计的可见光定位系统进行测试。

### 6.1 硬件搭建

系统发送端和接收端的参数设置如表1所示, 信标编码参数如表2所示。每个信号周期由“序列头+8位数据+序列尾”组成, 序列头占5位编码, 每位数据占2位编码(高电平用“10”表示, 低电平用“01”表示, 这样在8位数据的编码中不会出现连续3个以上的“0”或“1”, 有效防止LED闪

烁), 序列尾占1位编码, 共22位。每位编码所占时间为80  $\mu\text{s}$ 。

图10为实验测试场景实物图, 图10(a)为发送端元件, 图10(b)为天花板布局, 图10(c)为智能手机接收端。在本系统中, 设计的软件系统执行一次定位所需的时间为350 ms, 其中捕获图像并存储所需150 ms, 执行图像处理所需150 ms, 定位算法所需时间为20~30 ms, 各步骤之间存在时间冗余间隙, 用于去除软件代码可能带来的误差及错误影响。

### 6.2 解码识别率

(1) 实验测试。发送端与接收端之间的距离对接收端解码识别率的影响如图11所示。测试过程中, 保持发送端与接收端的各项参数不变, 仅改变接收端与LED之间垂直距离。LED离地面约2.65 m, 测试范围在0.5~2.65 m内。接收端对不同高度进行约50次解码的移动测试。通过图11可以发现, 解码识别率在1.5 m处开始下降, 在1.9~2 m间下降速度最快, 达到2.65 m左右时已几乎无法正确解码。

由测试结果可知, 发送端与接收端的垂直距离在1.5 m以内时, 信标解码识别率可达99%。发送端与接收端的垂直距离为1.75 m以内时, 信标解码识别率可达到95%以上。与Liu算法<sup>[12]</sup>对比, 解码

表1 系统参数设置

参数	值
实验区域大小	3.2×3.0×2.65 m
LED型号	CXA1512
LED最大功率	21.6 W
灯罩直径	20 cm
芯片型号	Cylone IV EP4CE6F
放大电路	LM324N
MOS管型号	IRF520
电源	GPS-430C
智能手机型号	Google Pixel
屏幕分辨率	1920×1080
系统版本	Android 7.0/8.0
前置摄像头分辨率	2448×3264
相机曝光时间	100 $\mu\text{s}$
相机感光度	64

表2 信标编码参数

参数	值
序列头宽度	400 $\mu\text{s}$
序列尾宽度	80 $\mu\text{s}$
时隙(单位编码)宽度	80 $\mu\text{s}$

识别率有明显提升。这是因为文献[12]所采用的条纹判别阈值为硬阈值,无法随光环境的变化而发生变化。同时,成年人手持智能手机距离天花板LED的距离通常在1.75 m内,因此,设计的解码算法满足绝大多数用户的使用条件。

此外,实际应用中接收端捕获到LED可能不止1盏,而测试中仅对1盏LED的子图进行解码。从概率的角度看,当接收端捕获多盏LED时,同高度下的多个信标中至少1个信标被成功解码的概率要远高于图11中的单盏LED情况,提高了定位系统鲁棒性。

### 6.3 定位精度

(1)接收端移动状态。移动状态下的定位结果如图12所示。从图中可以发现,单灯定位误差在10 cm左右,双灯定位误差在5 cm左右。双灯定位效果比单灯定位效果要好,这是由于接收端捕获两盏以上LED时所采用的旋转角由几何计算方式得到,相较于一盏LED时读取方位传感器所得到的旋

转角更为准确。文献[12]算法无法实现单灯定位,定位结果分布较少,定位精度同本文设计的定位算法大致相同。

此外,从图12中可以发现,移动轨迹覆盖到了实验环境的大部分区域,系统的定位误差在实验区域内均匀分布,不同位置的定位误差并未出现明显差异,证明了联合定位算法的可靠性。

(2)接收端定点状态。在定点状态下,本文尽可能多的采样定位数据。定位系统选择能够捕获到3盏LED的坐标点作为定位点,通过遮挡光路的方式对每两盏LED分别进行一次双灯定位,共得到3组数据,再对每盏LED分别进行一次单灯定位,得到3组数据,每个定位点共6组数据,部分测试结果如图13所示。

定点状态与移动状态下的接收端定位误差大致相同,这说明设计的系统在移动和定点状态下都能保持良好的应用。同时,由于智能手机传感器本身的误差因素,单灯算法的平均定位误差要高于双灯算法。在多组测试数据的情况下,文献[12]的双灯算法定位精度低于本文定位算法中双灯情况下的定位精度,这说明旋转角优化方案降低了定位误差。

此外,为了提高实验结果的可靠性,本文采用50个定位点共300组数据的定位结果绘制出误差累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF),如图14所示。通过图14可以发现,单灯算法的最大误差为37.183 cm,平均误差为12.093 cm;双灯算法的最大误差为9.725 cm,平均误差为3.998 cm。

产生误差的原因除了上述提到的传感器因素外,天花板与地面的平行程度等建筑因素、测试时智能手机发生轻微倾斜等人为因素以及轮廓检测算法对子图圆心检测准确程度等图像处理因素,都会为定位系统带来误差。



图10 实验测试场景实物图

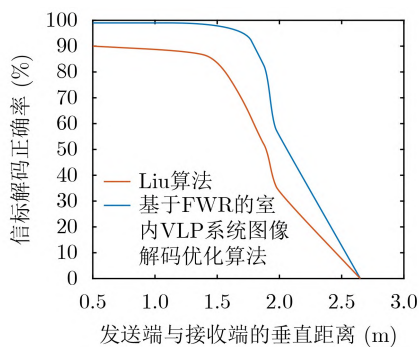


图11 发送端与接收端的垂直距离对解码识别率的影响

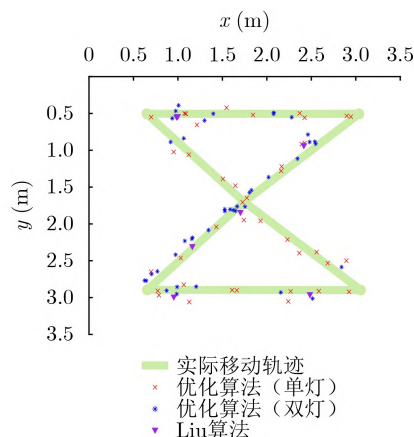


图12 接收端移动状态下定位结果分布



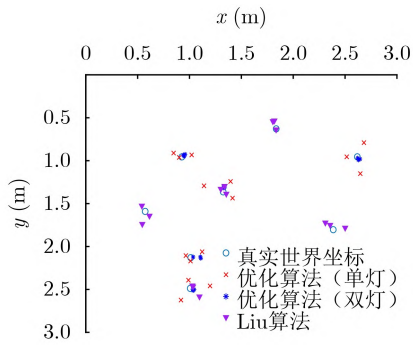


图 13 接收端定点状态下的部分定位结果分布

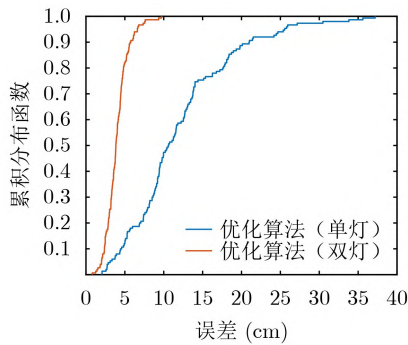


图 14 误差累积分布函数

#### 6.4 导航

本文设计的导航功能具有如下效果：

(1)进行模式选择，进入导航模式；

(2)在导航模式下，点击屏幕上的LED标记，选择想要去往的目标地点；

(3)按下开始键后智能手机进行一次捕获定位，并将接收端的位置显示在屏幕上；

(4)生成一条起始点与目标点间的路径，形成导航路径，如图15所示。

例如，将目标地点选为5号LED，其坐标为(1.484, 1.578)。按下导航键后，智能手机屏幕显示当前位置定位为(0.304, 2.478)。定位系统首先判定出起始点在田字格的正西方向。然后，定位系统执行导航命令，令接收端先沿 $x$ 轴进行移动，路径为(0.304, 2.478)→(0.465, 2.478)。接着，定位系统判定到达点的横坐标属于南北方向路径的横坐标之一。令接收端接着沿 $y$ 轴移动至与目标点纵坐标相同处，路径为(0.465, 2.478)→(0.465, 1.578)。接收端最后再次执行移动命令，移动至5号LED正下方，路径为(0.465, 1.578)→(1.484, 1.578)。至此，导航结束。

#### 7 结束语

本文对室内可见光定位系统解码识别率和定位算法适用性展开了详细的研究。提出了基于条纹宽度的图像解码算法和基于旋转角优化的联合定位

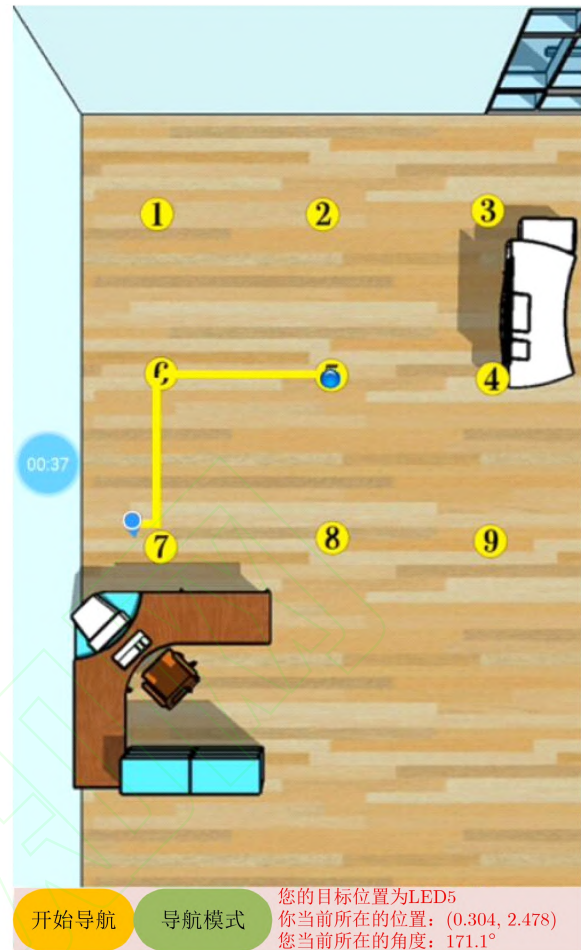


图 15 导航效果展示

算法。最后，本文搭建可见光定位系统实验平台，从系统解码识别率、定位精度及导航实现等方面评估设计的定位系统。实验结果表明，提出的两种算法方案能够有效地优化可见光定位系统性能。

#### 参考文献

- [1] Wu X, Soltani M D, Zhou L, *et al.* Hybrid LiFi and WiFi networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 1398–1420.
- [2] Liu F, Liu J, Yin Y, *et al.* Survey on WiFi-based indoor positioning techniques[J]. *IET Communications*, 2020, 14(9): 1372–1383. doi: 10.1049/iet-com.2019.1059.
- [3] Bernardini F, Buffi A, Fontanelli D, *et al.* Robot-based indoor positioning of UHF-RFID tags: The SAR method with multiple trajectories[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1–15.
- [4] Spachos P, Plataniotis K N. BLE beacons for indoor positioning at an interactive IoT-based smart museum[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 3483–3493. doi: 10.1109/JSYST.2020.2969088.
- [5] Yao C Y, Hsia W C. An indoor positioning system based on the dual-channel passive RFID technology[J]. *IEEE Sensors*

- Journal*, 2018, 18(11): 4654–4663. doi: [10.1109/JSEN.2018.2828044](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2828044).
- [6] Feng D, Wang C, He C, *et al.* Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high-accuracy indoor positioning and navigation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(4): 3133–3146. doi: [10.1109/JIOT.2020.2965115](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2965115).
- [7] Zhou M, Li X, Wang Y, *et al.* 6G multi-source information fusion based indoor positioning via Gaussian kernel density estimation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020.
- [8] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights[J]. *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50(1): 100–107. doi: [10.1109/TCE.2004.1277847](https://doi.org/10.1109/TCE.2004.1277847).
- [9] Luo J, Fan L, Li H. Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2871–2893.
- [10] Gu W, Aminikashani M, Deng P, *et al.* Impact of multipath reflections on the performance of indoor visible light positioning systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2578–2587. doi: [10.1109/JLT.2016.2541659](https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2541659).
- [11] Kuo Y S, Panmuto P, Hsiao K J, *et al.* Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light[C]//Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking. 2014: 447–458.
- [12] Liu X, Wei X, Guo L. DIMLOC: Enabling high-precision visible light localization under dimmable LEDs in smart buildings[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 3912–3924. doi: [10.1109/JIOT.2019.2893251](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2893251).
- [13] Wang Z, Yang Z, Huang Q, *et al.* ALS-P: Light weight visible light positioning via ambient light sensor[C]//IEEE Conference on Computer Communications, 2019: 1306–1314.
- [14] Zhang C, Zhang X. Pulsar: Towards ubiquitous visible light localization[C]//Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2017: 208–221.
- [15] Zhang C, Tabor J, Zhang J, *et al.* Extending mobile interaction through near-field visible light sensing[C]//Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2015: 345–357.
- 刘翔宇: 男, 1989年生, 博士后, 研究方向为可见光定位和无线光通信。
- 刘保睿: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信和可见光定位。
- 宋 嵩: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为自由空间光通信和无线光通信。
- 郭 磊: 男, 1980年生, 重庆邮电大学教授, 杭州市钱江特聘专家, 研究方向为通信网络技术。

责任编辑: 余 蓉