

引用本文: 纪湘云. 遮挡情况下基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法[J]. 光通信技术, 2025, 49(1): 64–70.

遮挡情况下基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法

纪湘云

(江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 为了解决因发光二极管(LED)图像捕获不完整而导致的定位精度不高的问题, 提出一种基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法。该算法由像素坐标拟合还原算法、循环坐标优化算法和补偿高度差的双灯定位算法组成, 分别处理在不同遮挡条件下捕获的矩形灯具图像, 降低图像噪声对定位结果的影响, 提高屋顶倾斜情况下的定位精度。实验结果表明: 与无遮挡条件下的定位精度相比, 采用像素坐标拟合还原算法后的定位误差小于 1.5 cm; 循环坐标优化算法可以补偿图像噪声对定位影响, 使得定位误差降低 60%; 补偿高度差的双灯定位算法使得平均定位误差降低 65%。

关键词: 可见光通信, 室内定位算法; 遮挡; 视觉定位; 双灯定位

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)01-0064-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Indoor visible light positioning algorithm based on visual error compensation in occlusion condition

Ji Xiangyun

(School of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: To address the issue of low positioning accuracy caused by incomplete image capture of light emitting diodes(LEDs), a novel indoor visible light positioning algorithm based on visual error compensation is proposed. This algorithm consists of three components: a pixel coordinate fitting and restoration algorithm, a cyclic coordinate optimization algorithm, and a dual-lamp positioning algorithm that compensates for height differences. These methods are designed to handle rectangular luminaire images captured under various occlusion conditions, reduce the impact of image noise on positioning results, and improve positioning accuracy in scenarios with tilted ceilings. The experimental results show that compared to positioning accuracy under unobstructed conditions, the positioning error using the pixel coordinate fitting and restoration algorithm is less than 1.5 cm. The cyclic coordinate optimization algorithm can compensate for the effects of image noise on positioning, reducing the positioning error by 60%. Additionally, the dual-lamp positioning algorithm that compensates for height differences reduces the average positioning error by 65%.

Key words: visible light communication, indoor positioning algorithm, occlusion, visual positioning, dual-light positioning

0 引言

室内可见光定位(VLP)技术依据接收机类型的不同, 主要分为光电传感器和图像传感器两大类。考虑到成本效益及设备部署的便捷性, 基于视觉的定位方

法逐渐成为主流。文献[1]采用图像处理技术进行位置估计, 实现了 6.5 cm 的高精度定位。文献[2]提出了一种结合最小二乘法与简化优化方法的 Visible-to-Position for Lean(V-P4L)校正算法^[3], 该算法仅需一个灯具即可完成定位, 且不要求特征点与投影之间有固定的对应关系。文献[4]则研究了一种针对倾斜安装的接收机摄像机校正和部分遮挡发光二极管(LED)图像补偿的算法, 当捕获到超过 40% 的 LED 图像时, 该 VLP 算法能将平均定位误差控制在 7 cm 以内; 而当捕获比例增加至 90% 以上时, 平均定位误差可降低至 3.9 cm。

尽管当前的各种定位算法均可实现室内的精确

收稿日期: 2024-04-16。

作者简介: 纪湘云(1997—), 山东烟台人, 女, 江苏大学, 硕士研究生, 主要研究方向是无线光通信关键技术、室内可见光定位技术和图像处理, 曾荣获省部级数学建模竞赛三等奖 1 项。



定位,但在实际应用中普遍存在对遮挡敏感的问题,即当LED光源被不同程度地遮挡时,接收端的图像传感器可能无法获取完整的信息,从而影响定位功能。虽然文献[3]提出了部分遮挡LED图像补偿算法,但这并不适用于工业环境中常用的矩形灯具。此外,作为接收端的图像传感器,其图像噪声也显著影响着定位的准确性。

鉴于上述挑战,本文提出一种基于视觉误差补偿的室内VLP算法。该算法由像素坐标拟合还原算法、循环坐标优化算法^[5]和补偿高度差的双灯定位算法组成,分别处理在不同遮挡条件下捕获的矩形灯具图像,降低图像噪声对定位结果的影响,提高屋顶倾斜情况下的定位精度。

2 基于视觉误差补偿的室内VLP算法

本文提出的基于视觉误差补偿的室内VLP算法,集成了像素坐标拟合还原算法、循环坐标优化算法和补偿高度差的双灯定位算法。其中,像素坐标拟合还原算法用于识别并计算矩形灯4个角点的像素坐标;后面2种算法分别用于确定接收端的位置和姿态。

2.1 像素坐标拟合还原算法

接收设备捕获矩形灯具时可能出现不完整图像情况,根据遮挡的程度,本文将单个矩形灯的遮挡类型分为以下几类:无遮挡(遮挡角数 $n=0$)、轻微遮挡(遮挡角数 $n=1$)、部分遮挡(遮挡角数 $n=2$)、严重遮挡(遮挡角数 $n=3$),以及完全遮挡(遮挡角数 $n=4$)。针对不同的遮挡情形,提出了像素坐标拟合还原算法,以求解矩形灯在像素平面上的投影坐标。

2.1.1 严重遮挡下的坐标重建步骤

在严重遮挡的情况下,为了恢复被遮挡矩形灯的完整图像,算法设定像素阈值 B 为 0.001 mm ,这确保了即使在时间和空间复杂度较低条件下,也能实现高精度的定位。

对于严重遮挡情况下像素坐标点的重建步骤如下:

- 1) 选择一个适当的步长,使用循环迭代的方法模拟所有可能的被遮挡矩形灯具形状;
- 2) 在已知一个角点及其两侧边被遮挡的情形下,假定遮挡线段代表矩形的最短边;
- 3) 通过迭代调整LED矩形的边长,每次循环对最短边进行步长增量 B 的调整,评估每种可能性,以拟合出所有可能的被遮挡矩形灯形态;
- 4) 遍历所有可能情况,选取拟合面积、边长比平方、最小差值作为最佳拟合标准,以此重建完整的图

像信息;

- 5) 利用图像处理算法提取所有相关的像素坐标点;

- 6) 最终获取LED的完整像素坐标,并将这些关键数据输入定位算法,以确定接收机的位置和姿态。

2.1.2 方向确定与最佳匹配原理

在处理严重遮挡情况下的像素坐标点求解时,本文深入分析了图像数据,并考虑到了矩形灯具可能遭受的水平和垂直方向上的遮挡;为了准确确定矩形灯的方向,引入了基于投影相似性的原理,即通过结合已知的实际条件下矩形灯的长宽尺寸信息,巧妙地运用相似三角形的性质(2个相似图形的面积比等于它们对应边长比的平方)来逐一验证所有可能的方向。算法流程如下:

- 1) 方向估计。根据已知的1个角点和2条边缘线,结合矩形灯的物理尺寸,本文计算出矩形灯可能的长宽比例。

- 2) 迭代检验。通过循环遍历所有可能的方向,对于每一个假设方向,本文构建一个与实际矩形灯相似的虚拟矩形,并计算其拟合面积。

- 3) 最佳匹配选择。比较每个虚拟矩形的拟合面积与其边长比的平方之间的差异,选取最小差值作为最佳匹配标准。

- 4) 图像信息恢复。成功地恢复了遮挡部分的图像信息。

这种方法显著提高了定位系统的可靠性和实用性,因为它不仅考虑了矩形灯的几何特性,还通过数学方法确保了矩形灯具即使是在复杂遮挡条件下的高精度定位。

2.2 循环坐标优化算法

在执行定位算法之前,必须通过图像处理模块获取准确的像素坐标点。由于图像噪声的大小和分布会直接影响矩形灯成像的检测精度,进而影响定位算法的整体性能。为此,本文采用循环坐标优化算法,旨在减轻噪声对定位精度的负面影响。

为了验证所提算法的有效性,本文选择了9个不同的定位点,并捕捉到了每一点上矩形灯的图像。每个图像包含矩形灯的4个角点,因此总共有36组(9张图像 $\times$ 4个角点)原始像素坐标点 (x, y) 。然而,噪声会影响这些坐标点的 x 和 y 值,即每张图像中的矩形灯的4个角点各自具有2个受噪声影响的坐标值。

在使用循环坐标优化算法处理这些像素坐标点后,本文获得了优化后的坐标点 (x^*, y^*) ,从而提高了接收器的定位精度。随后,本文对原始像素坐标点 (x, y)

纪湘云:遮挡情况下基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法

与优化后的坐标点 (x^*, y^*) 进行了 Spearman 等级相关分析和指数回归模型建模,以揭示两者之间的关系并评估优化效果。

循环坐标优化算法的时间复杂度表示为 $T(n)=O(N^k)$, N 为基数, k 为迭代次数, n 为样本大小。在考虑算法的时间复杂度时,本文设定了一个微小的变化值 $T_0=0.01$,用于在每次迭代中调整像素点的坐标,确保在不过多增加计算成本的情况下实现最优定位精度。

循环坐标优化算法如算法 1 所示。

算法 1 循环坐标优化算法

输入 (x, y) , T_0 , 真实的位置 (t_m, t_n) , 世界坐标 $P_i=(x^w, y^w, z^w)$, 相机坐标 $P^c=(X^c, Y^c, Z^c)$

输出 (x^*, y^*)

1) set $T=0.01$

2) for $i=\{1, 2, 3, 4\}$ do

3) $x_i=x_i-T_0$; $T_0: x_i+T_0$

4) $y_i=y_i-T_0$; $T_0: y_i+T_0$

5) set $i \leftarrow i+1$

6) 求解接收机的坐标 t_x, t_y

7) 求解 $(x^*, y^*)=\min \sqrt{(t_x-t_m)^2+(t_y-t_n)^2}$

8) 更新 (x^*, y^*) ,直到求得最小值

9) return

在本研究中,像素点的坐标被设定为 3 个离散值: $x-T_0$ 、 x 和 $x+T_0$,构成了一个基数 $N=3$ 的迭代序列。随着迭代次数的增加,本文观察到程序运行时间呈现出递增的趋势。当迭代次数 k 从 1 增加到 8 时,程序的运行时间分别为 0.05、0.07、0.09、0.37、0.98、7.66、76.49、990.52 s。为了确保算法的收敛性并优化像素坐标点,本文对空间中的每组定位点执行了总共 3^k 次的循环判断。

优化后的像素坐标点 (x^*, y^*) 是根据定位精度函数计算得出的,如式(1)所示。

$$(x^*, y^*) = \underset{\substack{x=(x_0, \dots, x_4) \\ y=(y_0, \dots, y_4)}}{\operatorname{argmin}} f(x, y) \quad (1)$$

其中, $f(x, y)$ 是定位精度函数。

通过将原始坐标点 (x, y) 与优化后的坐标点 (x^*, y^*) 代入定位算法并进行比较,本文发现优化后的定位精度有了显著提升。进一步地,本文使用 Spearman 等级相关系数分析了具有最高定位精度的数据和实际数据之间的关系 r_s ,如式(2)所示。

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (u_i - v_i)^2}{n(n-1)} \quad (2)$$

其中, u_i 和 v_i 表示按大小排列的等级, l 表示 x 或 y 的个数。 n 表示样本大小。计算结果显示, x^* 与 x 之间的相关系数为 0.690 2, y^* 与 y 之间的相关系数为 0.810 4。这表明优化后的 x 坐标与原始 x 坐标之间,以及 y 坐标与原始 y 坐标之间存在较强的正相关关系。

在得到这些相关系数之后,本文建立了指数回归模型以拟合数据,旨在探究优化后的坐标点 (x^*, y^*) 与原始坐标点 (x, y) 之间的关系,并预测定位算法的性能。该数学模型如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} y^* \\ x^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ y \\ N_2 \\ x \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, M_1 、 M_2 、 N_1 、 N_2 为回归模型参数。

本文采用了 9 个定位点,共计 36 组数据进行建模。理论上,随着定位点数量的增加,模型将能够捕捉到更加细微的变化,从而提升预测的准确性和模型的泛化能力。

2.3 补偿高度差的双灯定位算法

传统的 VLP 模型要求所有 LED 应位于同一高度。若 LED 不在同一平面上,则可能导致定位精度出现大约 17 cm 的误差^[2]。为解决这一问题,并考虑到现有定位算法存在的局限性和模型的特点,本文提出了一种基于 V-P4L 算法的双灯补偿高度差定位算法。该算法旨在不增加系统复杂度的情况下,通过使用 2 个 LED 来修正由屋顶倾斜引起的定位偏差,从而增强算法的鲁棒性和提高定位精度。

图 1 为位于倾斜平面上的 2 个矩形灯的实验布局模型图,两灯之间存在 2 cm 的高度差异。图中明确标记了 LED₁ 和 LED₂ 的中心位置,分别记作 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 。

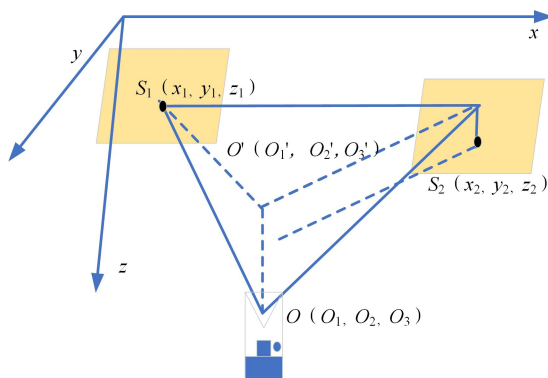


图 1 位于倾斜平面上的 2 个矩形灯的实验布局模型图

z_1), $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 。当表面倾斜时, 这两点将不再处于同一水平线上。点 $o(o_1, o_2, o_3)$ 表示接收机相机的位置, 而点 $o'(o'_1, o'_2, o'_3)$ 则是接收机在理想水平面的投影位置。通过同时拍摄 2 个 LED 的照片, 并分别应用 V-P4L 定位算法进行处理, 本文能够计算出针对 LED₁ 和 LED₂ 各自的接收机方位角 α_1, α_2 和俯仰角 β_1, β_2 。

方位角 α_j 和俯仰角 β_j 可以通过分析接收机与 LED₁、LED₂ 之间的几何关系来确定, 其表达式为

$$\begin{cases} \tan \beta_j = \frac{o_3 - z_j}{f_j} = t_j \\ \tan \alpha_j = \frac{o_2 - y_j}{o_1 - x_j} = k_j \end{cases} \quad (4)$$

其中, $j=1, 2$ 。

基于上述计算得到的方位角, 本文能够进一步确定接收机的具体位置为

$$\begin{cases} o_1 = \frac{y_1 - y_2 - k_1 y_1 + k_2 y_2}{k_2 - k_1} \\ o_2 = \frac{k_2 y_1 - k_1 y_2 + k_1 k_2 (x_2 - x_1)}{k_2 - k_1} \\ o_3 = \frac{1}{2} (z_1 + z_2 + t_1 f_1 + t_2 f_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中, 系数 f_j 为

$$f_j = \sqrt{(o_2 - y_j)^2 + (o_1 - x_j)^2} \quad (6)$$

此外, 通过对系统模型和测量过程的详细分析, 本文还可以得到定位结果的误差估计, 如式(7)所示。

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{o_1}^2 + \sigma_{o_2}^2 + \sigma_{o_3}^2} \quad (7)$$

其中, σ_o 反映出目标相对几何位置与测量误差的对应关系, 也能准确衡量前者对后者的影响程度^[6]。

3 实验结果与分析

3.1 实验设置与条件

为了验证本文所提算法模型的可行性和实际定

位效果, 本文根据表 1 中的参数搭建了一个实验平台。在验证像素坐标拟合还原算法时, 单个 LED 的定位测试是在一个尺寸为 60 cm×80 cm×80 cm 的空间中进行的, 且 LED 均匀地水平安装在天花板上。

表 1 双灯定位实验参数

参数	数值
LED ₁ 在 P_1 角点的坐标(单位: cm)	(20, 20, 120)
LED ₂ 在 P_2 角点的坐标(单位: cm)	(55, 20, 118)
LED ₁ 、LED ₂ 的尺寸(长度, 宽度)(单位: cm)	(26, 17.5)
接收机型号	Redmi note 9 pro
焦距/mm	24

3.2 定位点选择与遮挡情况

在实验过程中, 本文在三维空间中选择了 9 个特定的点来观察原始的定位数据。这些点的坐标分别为 (20 cm, 20 cm, 1 cm)、(20 cm, 30 cm, 1 cm)、(20 cm, 40 cm, 1 cm)、(50 cm, 20 cm, 1 cm)、(50 cm, 30 cm, 1 cm)、(50 cm, 40 cm, 1 cm)、(60 cm, 20 cm, 1 cm)、(60 cm, 30 cm, 1 cm) 和 (60 cm, 40 cm, 1 cm)。在这些定位点处, 本文拍摄了无遮挡情况下及各种遮挡情况下的照片, 并通过所提算法进行处理和拟合, 最终得到了完整的像素坐标点。

在实验中, 本文通过遮挡 P_2 、 P_3 和 P_4 这 3 个角点, 对坐标分别为 (20 cm, 20 cm, 1 cm)、(20 cm, 30 cm, 1 cm)、(20 cm, 40 cm, 1 cm)、(50 cm, 20 cm, 1 cm)、(50 cm, 30 cm, 1 cm) 和 (50 cm, 40 cm, 1 cm) 的这 6 个定位点进行了测试; 而对 (60 cm, 20 cm, 1 cm)、(60 cm, 30 cm, 1 cm) 和 (60 cm, 40 cm, 1 cm) 这 3 个角点进行测试时, 遮挡了 P_1 、 P_2 和 P_4 角点。测试结果表明, 无遮挡与严重遮挡时的误差小于 0.042 mm。这个误差范围证明了像素坐标拟合还原法的高度精确性。

无遮挡条件下的定位误差如表 2 所示。在初始定位测试中, 当定位点分布在 9 个指定位置时, 测得的

表 2 无遮挡下的定位误差

实际定位位置 (单位: cm)	采用循环坐标优化算法前		采用循环坐标优化算法后	
	位置(单位: cm)	定位误差/cm	位置(单位: cm)	定位误差/cm
(20, 20)	(28.04, 32.42)	14.80	(21.4, 29.46)	9.57
(20, 30)	(28.10, 33.80)	8.95	(26.5, 31.03)	6.60
(20, 40)	(29.02, 33.31)	11.22	(20.7, 39.55)	0.84
(50, 20)	(29.02, 33.31)	21.86	(44.48, 29.63)	11.10
(50, 30)	(32.92, 31.77)	17.17	(50.2, 33.26)	3.42
(50, 40)	(36.71, 31.47)	15.78	(50.38, 33.4)	0.43
(60, 20)	(59.74, 39.82)	19.82	(60.9, 31.65)	11.69
(60, 30)	(44.71, 32.41)	19.72	(58.82, 29.72)	9.79
(60, 40)	(43.36, 35.66)	17.19	(57.26, 38.49)	3.12

纪湘云; 遮挡情况下基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法

平均定位误差为 16.27 cm。当应用了循环坐标优化算法进行多次迭代后, 平均定位误差降至 6.28 cm。这表明随着迭代次数的增加, 该算法有效地降低了图像噪声导致的定位误差。

3.3 遮挡情况下的定位精度

将像素坐标拟合还原算法应用于不同的遮挡情况下, 得到了定位误差情况如表 3 所示。

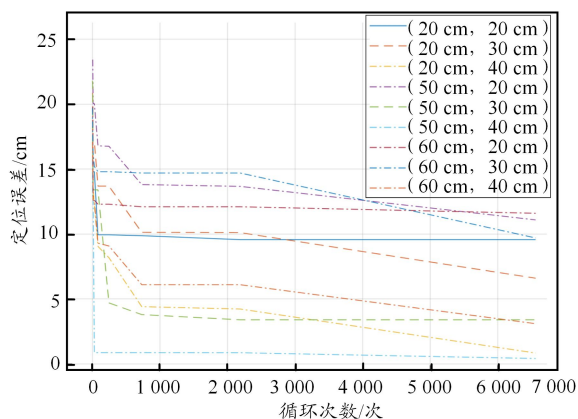
根据表 3 的数据可以计算出, 一般遮挡、严重遮挡情况下的平均定位误差分别为 4.82、4.39 cm, 与表 2 中无遮挡情况相比, 两者之间定位误差分别为 1.46、1.09 cm。这些数据表明, 当应用基于点和线的像素坐标拟合算法进行像素坐标提取时, 相较于无遮挡场景, 遮挡会导致额外的定位误差, 但该误差通常不超过 2 cm。由于遮挡影响像素坐标的恢复, 原始灯具形状无法被完全精确地重建。因此, 本文采用固定步长迭代算法, 并将迭代结果输入到定位算法中, 以从多个可能解中选择与真实值误差最小的灯具形状。

不同遮挡情况下像素坐标拟合还原算法得到的姿态(俯仰角, 旋转角, 偏航角)误差如表 4 所示。通过

计算可得, 与无遮挡时的误差相比, 即使在存在遮挡的情况下, 俯仰角、旋转角和偏航角的平均误差分别保持在 0.3、0.15、0.1 rad 以内。这表明所提算法在估计旋转物体方向方面具有极高的精度。

3.4 循环坐标优化算法的应用

在不同遮挡情况下的定位系统中应用循环坐标优化算法后, 获得了定位误差结果如图 2 所示。从图 2(a) 可以看出, 在无遮挡情况下, 定位误差随循环次数的



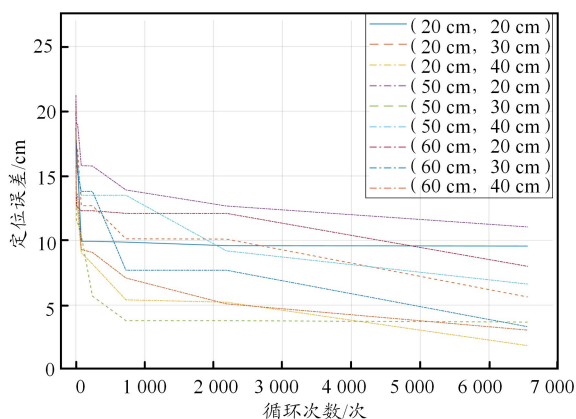
(a) 无遮挡情况

表 3 不同遮挡情况下像素坐标拟合还原算法得到的定位误差

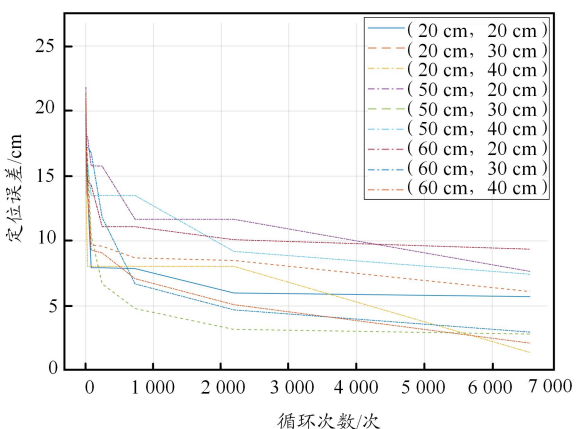
实际定位位置 (单位:cm)	一般遮挡情况下		严重遮挡情况下	
	位置(单位:cm)	定位误差/cm	位置(单位:cm)	定位误差/cm
(20,20)	(20.33,28.49)	8.50	(21.72,25.46)	5.72
(20,30)	(22.45,28.55)	2.85	(26.01,28.9)	6.11
(20,40)	(21.61,39.53)	1.68	(20.83,38.85)	1.42
(50,20)	(45.65,26.87)	8.13	(43.25,23.63)	7.66
(50,30)	(48.46,34.32)	4.59	(49.64,32.82)	2.84
(50,40)	(48.98,35.45)	4.66	(50.61,32.56)	7.46
(60,20)	(57.69,26.71)	7.10	(60.62,29.35)	9.37
(60,30)	(57.87,27.9)	2.99	(59.14,32.86)	2.99
(60,40)	(57.12,39.71)	2.89	(58.48,37.25)	3.14

表 4 不同遮挡情况下像素坐标拟合还原算法得到的姿态(俯仰角, 旋转角, 偏航角)误差

位置(单位:cm)	无遮挡姿态误差(单位: rad)	一般遮挡姿态误差(单位: rad)	严重遮挡姿态误差(单位: rad)
(20,20)	(0.05,-0.08,0.57)	(-0.1,0,0.57)	(0.06,-0.1,0.59)
(20,30)	(-0.1,0,0.60)	(0,0.01,0.58)	(0,-0.05,0.59)
(20,40)	(-0.02,0.02,0.58)	(0.26,0,0.57)	(0.01,-0.03,0.58)
(50,20)	(0.05,-0.08,0.57)	(-0.1,0,0.57)	(0.06,-0.1,0.59)
(50,30)	(0.08,-0.07,0.60)	(0,0,0.60)	(-0.05,0.05,0.58)
(50,40)	(0.03,0.02,0.58)	(0.1,0,0.55)	(0.03,-0.04,0.58)
(60,20)	(0,-0.06,0.52)	(-0.08,0,0.52)	(0,0,0.53)
(60,30)	(0,-0.08,0.54)	(-0.02,0,0.54)	(0.03,0,0.53)
(60,40)	(0.06,0,0.54)	(0.02,0,0.53)	(0,0,0.53)



(b) 一般遮挡情况



(c) 严重遮挡情况

图2 不同遮挡情况下的9个点的定位误差

增加而逐渐减少。从图2(b)可以看出,在一般遮挡情况下,当循环次数达到2 187($k=7$)时,定位误差已经明显降低。相比于未采用循环坐标优化算法的情况(循环次数为0),此时的误差降低了约35%;而在迭代进行至6 561次时,定位误差相较于初始值降低了约60%。实现2 187次循环所需时间约为100 s,这表明

该算法能够在较短时间内有效提高定位精度。因此,在实际应用中,可以根据具体的性能需求和资源限制选择适当的迭代次数,以实现预期的定位精度与响应时间之间的最佳平衡。从图2(c)可以看出,在严重遮挡情况下,随着迭代次数的增加,定位误差呈现出稳步下降的趋势。在完成了6 561次循环后,与初始未优化的定位数据相比,误差降低了约60%。

3.5 算法性能

3.5.1 循环坐标优化算法性能

循环坐标优化算法的分析结果表明:

1)算法的定位精度与所选步长 T 紧密相关。这是因为 T 值直接决定了基数 N 的大小,进而影响了算法的整体规模。较小的 T 值有助于降低定位误差,但同时会增加数据运算量,需要更多的存储空间,并可能降低运算速度。因此,在综合考虑时间复杂度和空间复杂度的平衡后,本文选择了 $T=0.01$ 作为步长。

2)定位误差受到每个顶点像素坐标值的影响。本算法通过在迭代过程中保持一个像素坐标点的值固定,同时更新其它坐标点的数据来寻找最优解,从而逐步优化定位精度。这种迭代策略允许算法逐渐逼近最佳定位精度,展现了其在精细调整估计值以实现高精度定位方面的有效性。本文设定了循环迭代的最大次数 k 为8。经过优化,定位误差降低了60%。当 $k=7$ 时,仅需大约2 000次循环,误差就降低了30%~40%。这表明即使在未达到最大迭代次数的情况下,算法也能显著提高定位精度。

3.5.2 双灯定位算法性能

在倾斜场景下,本文对单灯定位与双灯定位算法进行了实验对比,结果如表5所示。根据表5的数据可以计算出,单灯定位和双灯定位的平均误差分别为

表5 单、双灯定位下的定位误差

实际定位位置 (单位:cm)	单灯定位(LED无高度差)		双灯定位(LED存在高度差)	
	位置(单位:cm)	定位误差/cm	位置(单位:cm)	定位误差/cm
(20,20)	(21.4,29.46)	9.57	(20.1,28.15)	8.15
(20,30)	(26.5,31.03)	6.60	(25.9,31.1)	6.00
(20,40)	(20.7,39.55)	0.84	(20.6,38.51)	1.61
(50,20)	(44.48,29.63)	11.10	(43.44,29.52)	11.56
(50,30)	(50.2,33.26)	3.42	(50,32.95)	2.95
(50,40)	(50.38,33.4)	0.43	(50.56,32.39)	7.63
(60,20)	(60.9,31.65)	11.69	(60.54,31.21)	11.31
(60,30)	(58.82,29.72)	9.79	(59.88,28.47)	1.53
(60,40)	(57.26,38.49)	3.12	(58.5,38.21)	2.34

纪湘云:遮挡情况下基于视觉误差补偿的室内可见光定位算法

17、5.9 cm,这表明双灯定位算法使得平均定位误差降低了 65%。这一显著改进主要得益于该算法能够有效补偿由于高度变化引起的误差。因此,双灯定位算法不仅克服了不平坦表面带来的挑战,还进一步提高了定位的准确性。

4 结束语

本文提出了一种基于视觉补偿的室内可见光定位算法,该算法能够在不同遮挡条件下对矩形灯进行精确定位。实验结果表明,与无遮挡情况相比,采用像素坐标拟合还原算法后的定位误差小于 1.5 cm,姿态误差小于 0.3 rad。为了补偿图像噪声对定位精度的影响,本文引入了循环坐标优化算法,成功将图像噪声对定位误差的影响降低了 60%。此外,双灯补偿算法在处理高度差异时表现优异,使平均定位误差降低了 65%,显著提高了在复杂环境下的定位准确性。

综上所述,本研究提出的算法不仅能够有效应对

遮挡条件下的定位挑战,还能显著减少图像噪声和高度差对定位精度的影响,为实际应用提供了可靠的解决方案。

参考文献:

- [1] JAE-YOON K. High-resolution indoor positioning using light emitting diode visible light and camera image sensor[J]. IET Optoelectronics, 2016, 10(5): 184-192.
- [2] 柏琳. 融合视觉信息的室内可见光定位算法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2022.
- [3] WANG Y, HUSSAIN B, YUE C P. Arbitrarily tilted receiver camera correction and partially blocked LED image compensation for indoor visible light positioning[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(11): 4800-4807.
- [4] BAI L. Computer vision-based localization with visible light communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 2051-2065.
- [5] 刘士清, 胡春华, 朱纪洪. 一种基于灭影线的无人直升机位姿估计方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(9): 50-54.
- [6] 唐小明, 朱洪伟, 何友, 等. 系统误差对 GDOP 的影响分析[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(6): 901-903.