

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211305

# 基于激光扫描的室内定位系统的设计与研究\*

王 晓 蒋 磊 葛淑伟 万海波 龙凤琪 李锦俊

(中国矿业大学(北京)北京 100083)

**摘要:** 室内定位系统在无人机、机器人、医学和VR等领域具有广泛的应用。Lighthouse空间定位技术最初是作为VR设备的跟踪定位系统而开发的,在精度、延迟性上有较大的优势,但该算法的实现常常依赖于集中式的官方跟踪软件,多基站的应用场景部署过程较复杂,且VR设备的跟踪器大、价格高。针对于此,本文提出了单基站的姿态解算算法,并设计了基于FPGA的低成本、轻量化、可扩展的定位跟踪器。定位跟踪器通过捕获来自基站的光学信号,对其进行滤波、解码、数据同步以及姿态解算,通过串口实时输出高精度定位数据,提高了定位系统的集成度以及运算效率。通过搭建实验场景,对本文设计的定位跟踪器和姿态解算算法进行验证,实验结果表明定位系统精度达毫米级,位置抖动范围小于4%。

**关键词:** 室内定位;激光扫描;FPGA;姿态解算;高精度

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Design and research of indoor positioning system based on laser scanning

Wang Xiao Jiang Lei Ge Shuwei Wan Haibo Long Fengqi Li Jinjun

(China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Indoor positioning systems have a wide range of applications in drones, robotics, medicine, and VR. Lighthouse spatial positioning technology was originally developed as a tracking and positioning system for VR devices. It has great advantages in accuracy and delay. However, the implementation of this algorithm often relies on centralized official tracking software and deployment of multiple base stations. The process is complicated, and the tracker of the VR device is large and expensive. For this, this paper proposes an attitude estimation algorithm for a single base station, and designs a low-cost, lightweight, and scalable positioning tracker based on FPGA. The positioning tracker captures the optical signal from the base station, performs filtering, decoding, data synchronization and attitude estimation on it, and outputs high-precision positioning data in real time through the serial port, which improves the integration and computing efficiency of the positioning system. By building an experimental scene, the positioning tracker and attitude estimation algorithm designed in this paper are verified. The experimental results show that the accuracy of the positioning system reaches millimeter level, and the position jitter range is less than 4%.

**Keywords:** indoor positioning; laser scanning; FPGA; attitude solving; high precision

## 0 引 言

近年来室内定位跟踪技术发展迅速,并被广泛应用于运动研究、医学研究、机器人系统研究、虚拟现实(virtual reality, VR)等各个领域。定位跟踪系统是在一定的工作区域中获得被检测对象的三自由度或六自由度(degree of freedom, DOF)位姿信息。目前主流的室内定位技术包括射频识别<sup>[1]</sup>、蓝牙<sup>[2]</sup>、超宽带(ultra-wideband, UWB)<sup>[3]</sup>等。其中,UWB定位技术是目前业界精度较高的定位技术,定

位精度在10~20 cm。

对于六自由度的运动跟踪而言,Mo-cap动作捕获系统<sup>[4]</sup>是目前最先进的人和物体运动跟踪系统。该系统需要搭载多个专用的摄像头,价格昂贵并且安装过程非常复杂。微软推出的运动跟踪产品Kinect<sup>[5]</sup>,可以实时估计摄像机前的人体6 DOF位姿信息,但无法进行360°的跟踪,且需要复杂的硬件设备才能快速处理深度摄像机的高速数据流。

2015年HTC VIVE联合Valve发布了一款搭载最先

收稿日期:2022-09-06

\* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(61936008)资助

进的空间定位技术 Lighthouse(LH)的 VR 头戴式显示设备<sup>[6-7]</sup>,该设备工作时需要依靠两个位置固定的 LH 基站,头戴式显示设备上有超过 40 个的光电传感器,相较于传统视觉定位技术<sup>[8]</sup>,LH 定位技术成本低且定位精度较高。用户在个人电脑(personal computer, PC)端采用官方提供的 SteamVR 跟踪系统和软件开发工具包(software development kit, SDK)接口可获取光电二极管的空间位置<sup>[9]</sup>。

Arnaud 等<sup>[10]</sup>将光电二极管集成在无人机上并利用两个 LH 基站搭建无人机的定位系统,使用“交叉光束法”和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法实现无人机的空间定位。文献<sup>[11]</sup>利用 Teensy 开发板捕获来自两个 LH 基站发出的激光信号,并将光学信息发送至服务器端,在 PC 端利用三角测量算法估计光电二极管的 6 DoF 姿态。Yang 等<sup>[12]</sup>采用搭载有限数量光电二极管的微控制器(microcontroller unit, MCU)捕获激光信号,使用 WiFi 模块将光学数据发送至服务器端,在 PC 端使用双 LH 基站姿态解算算法,得到定位接收器的 6 DoF 姿态。

目前采用 LH 定位系统的研究中,都需要依靠两个以上的 LH 基站,系统运行之前还需要对 LH 基站的位置、距离进行校准测试,安装过程较复杂。此外,定位跟踪器的主控芯片大都采用 MCU,利用信号上升沿和下降沿触发中断服务例程(interrupt service routine, ISR),MCU 通过捕获激光信号,并利用无线模块传输至服务器端进行姿态解算,由于 LH 定位系统的精度与定位接收器上光电二极管的数量有关,如果光电二极管超过了临界数量,微控制器会由于中断过多无法正常工作。

基于以上原因,本文提出一种单 LH 基站的姿态解算算法,设计了一套基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的定位跟踪器。基于 FPGA 的定位跟踪器可以实现硬件并行计算,处理速度更快,硬件资源丰富,可以搭载更多的光电二极管,且不会影响系统的性能。同时,将定位算法部署在 FPGA 中的姿态解算模块中,利用光学信息解算出高精度定位坐标。整个定位系统集成度更高,处理速度更快,使 LH 室内定位技术可以应用在其他领域。

## 1 Lighthouse 定位系统

### 1.1 系统架构

定位跟踪系统主要分为两个部分:LH 单基站、一个(或多个)基于 FPGA 模块的定位跟踪器。

LH 基站由一个发光二极管(light emitting diode, LED)阵列和两个安装在电机转子上的激光发射器组成,其中两个电机相互垂直摆放,基站的功能是提供编码控制和同步控制。同步控制信号由 LED 阵列产生,同步信号的宽度可以区分水平激光扫描和垂直激光扫描,如表 1 所示,X 轴、Y 轴分别代表水平激光器和垂直激光器。在每个扫描

周期的开始,基站上的 LED 阵列闪烁,发送同步信号,X 轴激光器工作,扫描整个空间,此时 Y 轴激光器不工作;随后,Y 轴激光器扫描整个空间,X 轴激光器不工作。

表 1 同步脉冲宽度与激光器轴向

轴向	同步脉冲宽度/ $\mu\text{s}$
X 轴	62.5
Y 轴	72.9
X 轴	83.3
Y 轴	93.8
X 轴	104
Y 轴	115

定位跟踪器包含多个相对位置固定的光电二极管,光电二极管接收到来自 LH 基站的激光扫描信号后,会产生一个短暂的脉冲信号。前端电路对接收到的脉冲信号进行预放大、滤波和量化。Yang 等<sup>[12]</sup>采用 MCU 对接收到的量化信号进行解码,信号的跳变沿可以触发 ISR,但是这只适用于部署数量有限的传感器,如果传感器的数量过多,微控制器会产生过多的中断,进而导致系统无法正常工作。因此,本文采用 FPGA 对接收到的量化信号进行捕获,FPGA 因其低延时、高并发等特点,可以搭载更多的光电二极管。在 FPGA 中共设计了 4 个功能模块,分别是信号接收模块、信号处理模块、数据解析模块、姿态解算模块。整个定位系统的工作流程如图 1 所示。

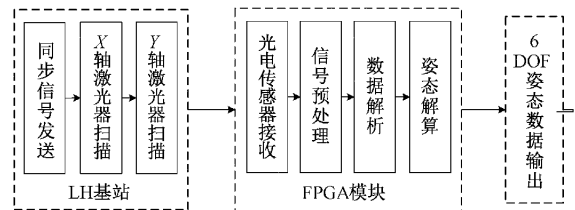


图 1 定位系统的工作流程

### 1.2 姿态解算算法

基于激光扫描的定位跟踪系统相较于传统的视觉跟踪系统,无论是速度还是成本方面,都有很大的优势。为更好地满足定位精度和速度要求,本文提出一种快速姿态解算算法,该算法可适用于具有单个 LH 基站的定位系统。

LH 基站扫描信号的时序如图 2 所示,在每个扫描周期开始时,基站内置的红外 LED 阵列会发出同步闪烁脉冲信号。首先,垂直激光器将在空间水平方向扫描 180 度,当二极管被扫描信号击中后,将产生一个短暂的脉冲,FPGA 可以记录下  $x$  方向扫描信号与起始信号之间的时间差  $t_1$ 。随后,红外 LED 阵列再次发出同步闪烁脉冲信号,待接收器接收后,水平激光器开始工作,接收器可记录下  $y$  方向扫描信号与第二帧的起始信号之间的时间差  $t_2$ 。激光器扫描频率固定为 120 Hz,扫描角度为 180°。两个激光器在同步信号发出后到接收器接收到扫描信号所转过的

角度  $\theta$ 、 $\varphi$  可表示为:

$$\theta = \frac{t_1 - 8\ 333/2}{8\ 333} \times \pi \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{t_2 - 8\ 333/2}{8\ 333} \times \pi \quad (2)$$

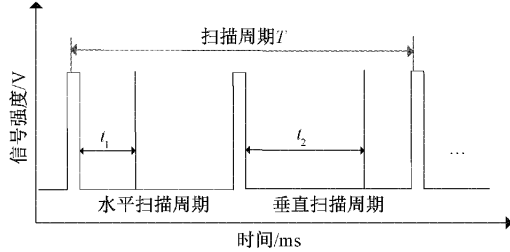


图 2 光电二极管接收的脉冲序列

以 LH 基站为坐标系原点,光电二极管在基站坐标系下的空间角度类似于相机图像的行坐标和列坐标,如图 3 所示,假定二维图像坐标系与基站坐标系  $OXY$  平面距离固定为  $f$ ,则光电二极管在基站坐标系下的空间角度  $\theta$ 、 $\varphi$  映射到图像坐标系下的坐标为  $u(x, y)$ 。光电二极管与 LH 基站之间的数学模型与针孔相机的数学模型类似,因此在逻辑层面可以将 LH 基站近似看作针孔相机。

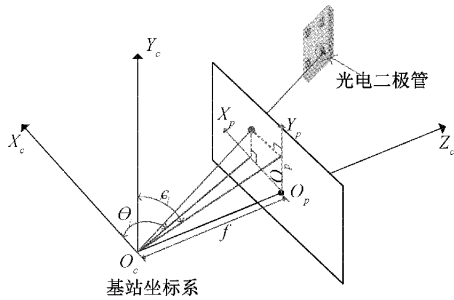


图 3 LH 基站与光电二极管之间数学模型

针孔相机成像模型如图 4 所示,其中  $O_c$  表示摄像机的光心,图 4 共有 3 种坐标系,  $O_c - X_c Y_c Z_c$  为相机坐标系;  $O_w - X_w Y_w Z_w$  为世界坐标系;  $X_p Y_p$  为图像坐标系,是以成像平面中心为原点的二维坐标系。

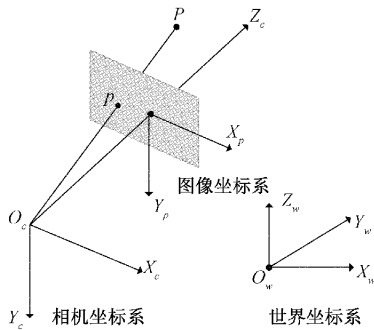


图 4 针孔相机成像模型

定位跟踪器上的光电二极管在图像坐标系下的图像坐标  $(x, y)$  与空间角度之间的关系如式(3)、(4)所示。

$$x = \frac{1}{\tan\theta} \quad (3)$$

$$y = \frac{1}{\tan\varphi} \quad (4)$$

设每个光电二极管的世界坐标的齐次形式为  $\mathbf{XW} = [X_w, Y_w, Z_w, 1]$ , 其与二极管在基站(相机)坐标系下的三维坐标  $\mathbf{Xc} = [X_c, Y_c, Z_c]$  变换关系满足式(5):

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{T}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

以定位跟踪器的中心为原点坐标,建立载体坐标系,光电二极管在载体坐标系下的三维坐标  $\mathbf{Xb} = [X_b, Y_b, Z_b]$  与世界坐标系之间的关系满足式(6):

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

从基站(相机)坐标系到图像坐标系,属于透视投影关系,从 3D 转换到 2D,两者之间的关系满足式(7):

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

对每个光电二极管而言,其机体坐标和图像坐标  $(x, y)$  直接变换关系满足式(8):

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{T}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $f$  表示相机的焦距,假定基站模型中  $f=1$ ,且  $f$  不失真;  $\mathbf{R}_c$  和  $\mathbf{T}_c$  表示基站坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移矩阵,可由标定测得;  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  分别表示刚体在世界坐标系的旋转矩阵和平移矩阵,即定位跟踪器的 6 DOF 位姿矩阵表示形式。

如上所述,将 LH 基站模型看作针孔相机模型,光电二极管在基站(相机)坐标系下的坐标为  $\mathbf{p}_i^c (i = 1, 2, 3, 4)$ 。在此引入虚拟控制点的概念<sup>[13-14]</sup>,任何一个光电二极管在世界坐标系下的坐标  $\mathbf{p}_i^w (i = 1, 2, 3, 4)$  可以表示为四个控制点  $c_i$  的线性组合,如式(9)表示:

$$\mathbf{p}_i^w = \sum_{j=1}^4 a_{ij} \mathbf{c}_j^w, \sum_{j=1}^4 a_{ij} = 1 \quad (9)$$

其中,  $a_{ij}$  是齐次重心坐标。

控制点在相机(基站)坐标系下的坐标为:

$$\mathbf{C}_j^c = \mathbf{R}_c | \mathbf{T}_c \begin{bmatrix} \mathbf{C}_j^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

光电二极管在相机(基站)坐标系下的坐标可表示为式(11):

$$p_i^c = R | T \begin{bmatrix} p_{ji}^w \\ 1 \end{bmatrix} = R | T \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^4 a_{ij} c_{ij}^w \\ \sum_{j=1}^4 a_{ij} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(10)代入针孔相机投影模型中,如式(12)所示。

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f & 0 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 a_{ij} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)展开,化简整理后可得式(13):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 (a_{ij} f (x_j^c - x z_j^c)) = 0 \\ \sum_{j=1}^4 (a_{ij} (y_j^c - y z_j^c)) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $a_{ij}$ 、摄相机内参  $f$  以及 2D 图像坐标  $(x, y)$  为已知量,控制点在相机坐标系下的坐标为未知量,方程组共有 12 个未知参数,将  $N$  个光电二极管的坐标信息(包括机体坐标、图像坐标)代入上式,构成  $2N$  个线性方程,在约束方程式(14)下可以表示为最小二乘问题,则每个二极管的 4 个控制点在基站(相机)坐标系下的坐标则可求解得到。

$$\|C_i^c - C_j^c\|^2 = \|C_i^w - C_j^w\|^2 \quad (14)$$

根据控制点在基站(相机)坐标系下的坐标  $c_j$ , 可求出每个二极管在基站(相机)坐标系下的坐标,则二极管在载体坐标系和基站(相机)坐标系下的 3D-3D 坐标关系可由式(15)表示,利用迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法即可求出定位跟踪器的位姿<sup>[15]</sup>。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c & T_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,  $R$  是旋转矩阵,反映了载体坐标系相对世界坐标系的旋转变量;  $T$  是偏移向量,反映了两个坐标系之间的位置关系。

### 1.3 硬件构建

本文开发的定位跟踪器由两个电路模块构成,分别是前端预处理电路、FPGA 主控电路,如图 5、6 所示,两者之间通过 1.25 mm 的插件进行连接,每一个部分可以独立评估。

前端预处理电路由光电二极管和信号转换芯片组成,用于激光信号的滤波和放大。本文设计的激光接收器采用 BPW34S 光电二极管和 TS4231 信号转换芯片,其中 TS4231 芯片是 Traid Semiconductor 公司生产的用于光学位置跟踪的专用芯片,封装尺寸小(1.6 mm×1.6 mm),该信号转换器具有抗可见光干扰、高光谱灵敏度和低响应时

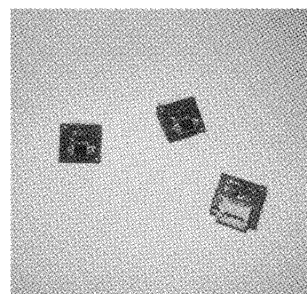


图 5 前端预处理电路

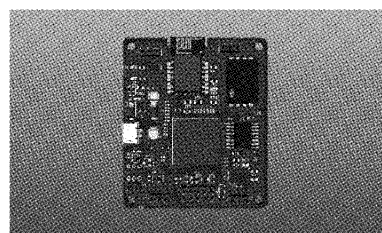


图 6 FPGA 主控电路

间等优点,响应波长集中在 790~1 050 nm 之间,这与基站发射的激光有很大重叠。

FPGA 主控电路采用傲格芯微电子有限公司生产的 FPGA 芯片 AG16KF256,这是一种低成本的国产芯片,可以并行处理多个光电二极管,处理速度远快于 MCU。此外主控电路还集成了惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)芯片、HC04 Bluetooth 芯片和电源管理芯片等。

定位跟踪器供电方式有两种:USB 供电和锂电池供电。当接入 USB 时,可为系统供电并且可以对锂电池充电。系统的最大功耗约为 80 mA,采用 300 mAh 的锂电池可使定位跟踪器自主工作 2 h。本文构建的定位跟踪器如图 7 所示。

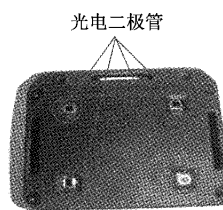


图 7 定位跟踪器外观展示

## 2 实验与结果分析

为了验证本文提出的单基站下定位算法的有效性,利用本文开发的定位跟踪器与 HTC VIVE 定位基站搭建实验场景,基站与定位跟踪器的相对位置如图 8 所示。定位跟踪器放置在 1 200 mm×900 mm 的标定桌上,使用“杜克”高精度激光测距仪对标定桌进行标定,测距仪的精度在 1 mm 左右。标定点共有 12 个,分别标记为编号 1,编号 2, ..., 编号 12,均匀分布在标定桌上,相邻编号之间的距离是固定且已知的。

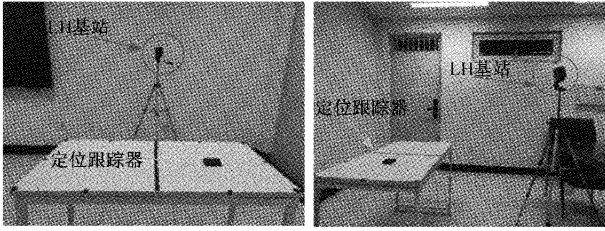


图 8 系统精度测试环境

该实验场景主要对系统帧率、定位精度和角度精度、系统抖动、定位轨迹等多层面进行测量分析,并且在三维空间中进行展示,如图 9 所示。经测试,整个定位系统的刷新率为 30 Hz,其他指标的测量也在图 8 所示的环境中完成。

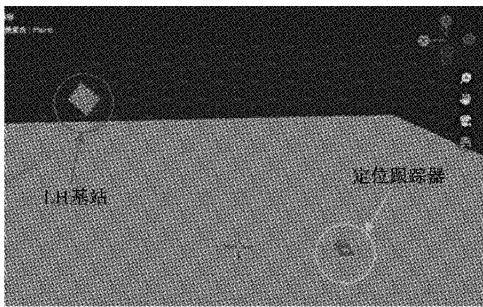


图 9 定位跟踪器移动时的三维表示

2.1 精度测量

1) 定位精度

为了测试基站到定位跟踪器的不同距离对定位精度的影响,设置了距离基站 1 m, 2 m, 3 m 三种实验情况,测试世界坐标下不同方向(x 轴、y 轴、z 轴)的定位精度。已知标定点共有 12 个,分别为编号 1, 编号 2, ..., 编号 12, 均匀分布在标定桌,将定位跟踪器固定在每个标定点后,采集 500 组有效的定位跟踪器中心坐标,最终将得到 12×500 组数据集。通过两组相邻的位置数据可以获得位移距离,而相邻标定点之间的位置是固定的,因此定义  $|X_n - \bar{X}_n|$  为绝对误差,  $\bar{X}_n$  为常数,单位为 mm。

为了测试评估单基站下的定位精度,在单基站和双基站的条件下进行精度测试对照试验,实验结果如图 10、11 所示,纵轴表示绝对误差,单位为 mm,横轴表示 12 个标定点的相邻位置,如图所示,整体数据较稳定。定位跟踪器在双基站下的平均定位精度约为 5.964 mm,在单基站下的平均定位精度约为 6.2 mm,双基站下与单基站下的定位精度相似,但单基站定位系统复杂度大幅降低。定位噪声主要来源于基站的镜头偏心、相位偏移、扫描平面存在一定曲率等;环境因素、基站固定的位置也可能造成误差,最大误差 13 mm,在可控范围内。

2) 角度精度

角度精度的测量需要将姿态解算后的旋转矩阵转化为欧拉角表示,进而测量定位跟踪器的角度精度。将定位跟

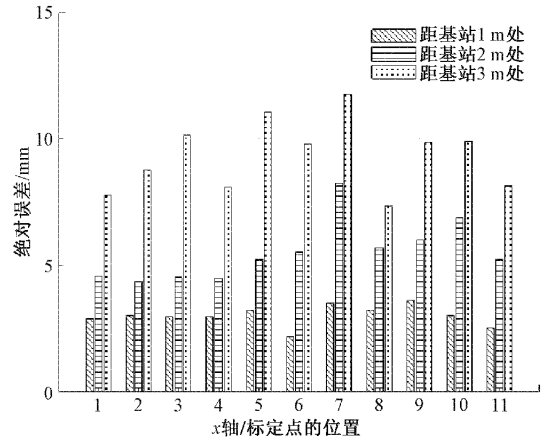


图 10 不同距离下的绝对误差分布(单基站)

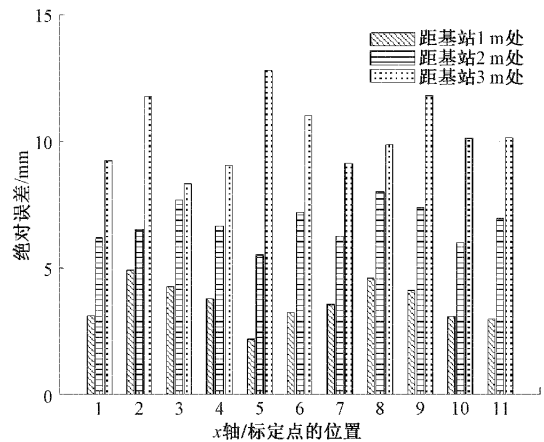


图 11 不同距离下的绝对误差分布(双基站)

踪器固定在三轴转台上,并保证定位跟踪器的轴水平,依次在每个轴上进行旋转测试,实验环境如图 12 所示。将定位跟踪器放置在转台 0° 时,记为原点,角度范围为 -45° ~ 45°,步长为 5°,共设置 19 个采样点,每个采样点处采集 200 组数据。通过计算角度的平均误差来评估角度精度,实验结果如表 2 所示。

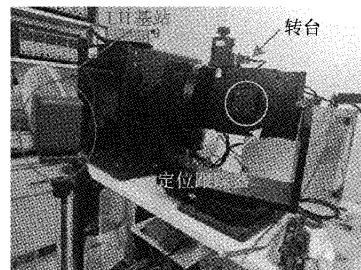


图 12 角度测量装置

表 2 距离基站 2m 时定位跟踪器欧拉角的误差

欧拉角	平均角度误/(°)	最大角度误/(°)
Pitch	0.376 8	0.673 6
Roll	0.231 5	0.536 7
Yaw	0.602 3	0.701 6

受到实验环境的限制,角度精度仅测量距离单基站 2 m 的实验情况。从表 2 中可以看出,本文构建的定位系统的三轴的平均角度精度约为  $0.4035^\circ$ ,最大误差为  $0.7016^\circ$ 。角度误差受到基站摆放位置和初始标定的影响,随着基站与定位跟踪器之间距离的增大,系统误差也将增大。不过基站与跟踪定位器之间的位置在 2 m 的距离以内,角度测量的整体精度较高,数据也相对稳定。

### 2.2 定位抖动测量

为了测试单基站的定位系统在静止状态下定位数据的离散程度,采集各个标定点的定位数据。抖动测试的数据集获取方式与精度测试数据集相同,但处理方式不同。将采集的  $12 \times 500$  组数据,去除异常值(小于 0.3%)后,在 MATLAB 中对每个点的坐标进行绘制,部分绘制结果如图 13 所示,图中的深色区域弥散斑的大小代表了定位跟踪器静止状态下的抖动程度。表 3 详细的展示了不同距离下,定位跟踪器在世界坐标系下  $x, y, z$  三轴的抖动性。

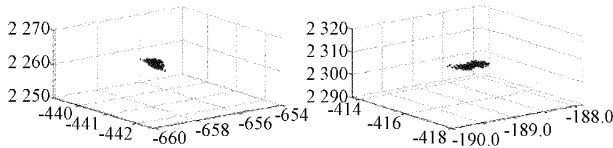


图 13 定位跟踪器静止状态下的坐标点分布情况

表 3 不同距离下,定位跟踪器的抖动偏差

轴向	距基站距离/m	抖动偏差/%
X 轴	1	0.070 3
	2	0.247 5
	3	0.808 1
Y 轴	1	0.264 5
	2	0.461 9
	3	0.648 5
Z 轴	1	1.290 2
	2	3.764 5
	3	4.250 4

由表 3 所示,当距离基站 1 m 时,系统的抖动偏差在 1.3% 以内,距离为 2 m 时的抖动偏差在 3.8% 以内,当基站与定位跟踪器相距 3 m 时的抖动在 4.5% 以内。结果表明,基站与被追踪物体的距离越远,由于传感器接收信号不稳定,这些抖动偏差会更加明显,当基站与定位跟踪器中的光电二极管之间夹角过大时,姿态解算的结果可能会偏移或丢失。但整体抖动偏差控制在 4.5% 以内,系统的稳定性相对较高。

### 2.3 定位轨迹

为进一步直观展示定位跟踪效果,分别在单基站与双基站下绘制定位跟踪器在移动过程中的轨迹,并与参考轨迹进行对比。实验人员沿着指定路径匀速移动定位跟踪器,并实时采集运动过程中的定位数据,去除采集数据中的

异常值(小于 0.5%)后,对定位轨迹数据进行 5 倍采样,并在 Matlab 中绘制定位跟踪器的运动轨迹。实验结果如图 14~16 所示,依次表明定位跟踪器沿着不同路径运动的结果。

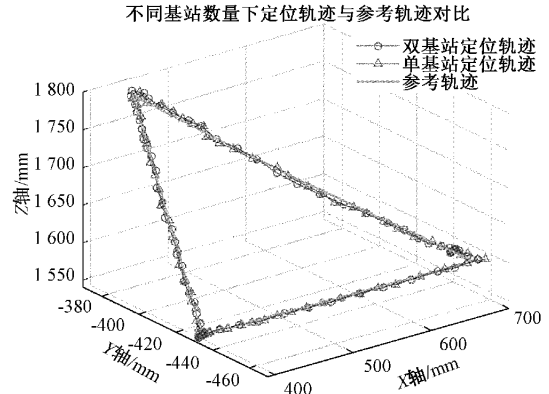


图 14 定位跟踪器三角形路径运动的轨迹

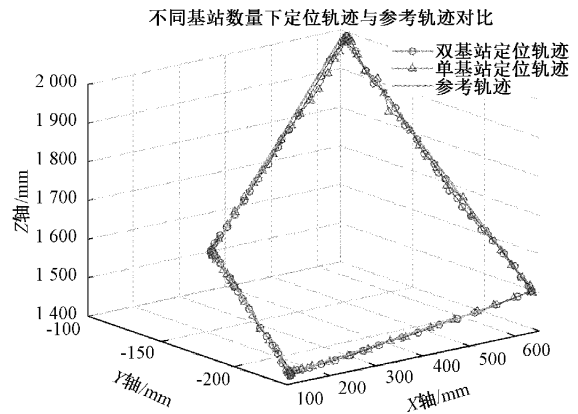


图 15 定位跟踪器梯形路径运动的轨迹

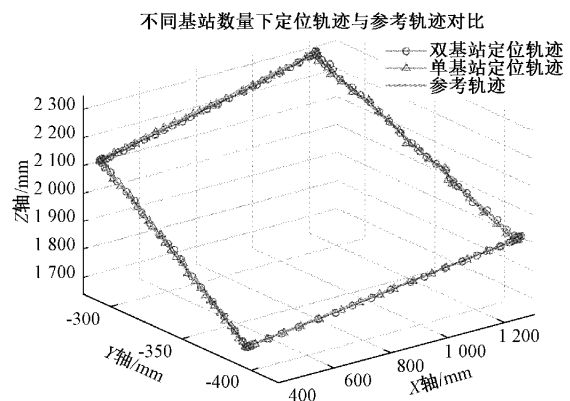


图 16 定位跟踪器方形路径运动的轨迹

图 14、15 是定位跟踪器相距基站 2 m 时的运动轨迹,整体运动范围较小,实验结果表明单基站下的运动轨迹与双基站下的运动轨迹基本重合,且运动轨迹在参考轨迹上略有波动,抖动偏差小于 4%,且在运动过程中没有出现明显偏移的现象。图 16 中的直线表示定位跟踪器在运动过

程中的参考轨迹,‘圆形线’表示双基站下定位跟踪器在运动过程中的定位轨迹,‘三角形线’表示单基站下定位跟踪器在运动过程中的定位轨迹,方形路径的运动范围较大,实验结果表明当定位跟踪器与基站之间距离较小时,单基站下的运动轨迹与双基站下的运动轨迹基本重合,运动轨迹与参考轨迹之间有微小波动,随着距离增大时,运动轨迹与参考轨迹之间有明显的偏移现象,定位误差也逐渐增大。除此之外,单基站下的定位轨迹相较于双基站下抖动更加明显,整体抖动偏差幅度是在 4.5% 内,抖动噪声主要是由于匀速运动过程中人为因素以及运动距离的不断增大等因素导致。

### 3 结 论

本文提出了一种基于 LH 单基站的姿态解算算法,并设计了基于 FPGA 的低成本、轻量化、可扩展的定位跟踪器。本文算法的优点在于仅使用单个基站即可对被跟踪物体进行高精度定位,定位跟踪器是以 FPGA 为硬件基础,可以根据需求自定义扩展光电二极管的数量,以适应不同的定位需求,提高定位跟踪器在复杂环境下的定位精度。

本文开发的定位系统精度较高,姿态解算算法部署在国产 FPGA 中,芯片资源利用较多,且芯片体积较大,还有进一步的改进空间。未来研究的重点是优化算法、时序约束,采用流水线技术来完成姿态解算算法,降低资源利用率,减小设备体积,进一步提高算法的执行效率以及系统的集成度。

### 参考文献

- [1] 许春生, 初明. 基于射频识别技术室内定位系统综述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(29): 134-135.
- [2] 刘明伟, 刘太君, 叶焱, 等. 基于低功耗蓝牙技术的室内定位应用研究[J]. 无线通信技术, 2015, 24(3): 19-23.
- [3] 裴凌, 刘东辉, 钱久超. 室内定位技术与应用综述[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 1-10.
- [4] MARKUS W, NILS G, MICHAEL M, et al. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems—exemplified on the Vicon-460 system [J]. Journal of Biomechanics, 2008, 41(12): 2776-2780.
- [5] 赵威, 李毅. 基于 Kinect 的人体姿态估计优化和动画生成[J]. 计算机应用, 2022, 9(3): 1-9.
- [6] MOHAMED S I, VISHAL R, MATTEO Z, et al. Dynamic pose tracking performance evaluation of HTC vive virtual reality system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 3798-3815.
- [7] SLETTEN K. Automated testing of industrial robots using HTC vive for motion tracking[D]. Vanger city: University of Stavanger, 2017.
- [8] 周字辉, 朱晓强, 曾丹. 基于计算机视觉的室内定位系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 43-47.
- [9] ADRIAN K, LEITH K, HENRY Y, et al. A low-cost lighthouse-based virtual reality head tracking system [C]. 2017 International Conference on 3D Immersion(IC3D), IEEE, 2017.
- [10] ARNAUD T, ROUSSELOT B, DANIELSSON J, et al. Lighthouse positioning system: Dataset, accuracy, and precision for UAV research[J]. Arxiv Preprint, 2021, ArXiv:2104.11523.
- [11] DARIO R, COLOMER. HIVE Tracker: A tiny, low-cost, and scalable device for sub-millimetric 3D positioning [C]. Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference, 2018: 1-8.
- [12] YANG Y, WENG D, LI D, et al. An improved method of pose estimation for lighthouse base station extension[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2411.
- [13] 陈鹏, 王晨晓. IEPnP: 一种基于 EPnP 的相机位姿迭代估计算法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 138-144.
- [14] LEPETIT V, MORENO F, PASCAL F. EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [15] 杨现辉, 王惠南. ICP 算法在 3D 点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 235-238.

### 作者简介

王晓, 硕士研究生, 主要研究方向为定位导航、机器人控制等。

E-mail: iwx1223@student.cumtb.edu.cn

蒋磊, 博士, 副教授, 主要研究方向为机器学习, 自适应控制, 外骨骼机器人等。

E-mail: leijiang@cumtb.edu.cn