

基于可见光通信的多传感器融合定位算法

章小强,刘泽林,张宏亮,潘 锋

(中广核数字科技有限公司,上海 201100)

摘要:针对核环境作业中多机器人协同定位的难题,提出一种基于可见光通信(VLC)的多传感器融合定位算法。算法通过调制发光二极管(LED)灯光频率并分配唯一标识(ID)编码,结合工业相机图像处理与里程计数据,实现高精度LED位置检测。实验基于TurtleBot3平台,在模拟核电站复杂光照(多光源干扰、高反射及遮挡)环境下进行验证。结果表明:算法平均定位误差为3.62 cm,90%测点误差小于5 cm,最大误差为9.04 cm,且通过RViz可视化平台证实了其在角落、狭窄通道等场景的鲁棒性。

关键词:核环境;多机器人系统;可见光通信;协同定位;自动化作业

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)06-0043-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.06.008

Multi-sensor fusion localization algorithm based on visible light communication

ZHANG Xiaoqiang, LIU Zelin, ZHANG Hongliang, PAN Feng

(China General Nuclear Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: To address the challenges of multi-robot collaborative positioning in nuclear environments, this paper proposes a multi-sensor fusion localization algorithm based on visible light communication (VLC). By modulating light-emitting diode (LED) light frequencies and assigning unique identification codes, combined with industrial camera image processing and odometer data, high-precision LED position detection is achieved. Experiments are conducted on the TurtleBot3 platform under simulated nuclear power plant conditions with complex lighting (multi-source interference, high reflectivity, and occlusion). Results demonstrate that the algorithm achieves an average positioning error of 3.62 cm, with 90% of measurement points exhibiting errors below 5 cm and a maximum error of only 9.04 cm. The robustness of the system in scenarios such as corners and narrow passages is verified through the RViz visualization platform.

Key words: nuclear environment, multi-robot system, visible light communication, cooperative localization, automated operations

0 引言

随着全球能源需求的持续增长,核能作为一种高效且低碳的能源形式,正受到越来越多国家的重视与广泛应用。然而,核电应用过程中伴随诸多挑战,尤

其在核环境中,如何确保作业人员安全、提升作业效率与精度,成为亟待解决的关键问题^[1]。

核电站运行环境恶劣,存在高辐射、高温、高湿等极端条件,对人员安全与健康构成严重威胁。此外,核电站的维护与操作任务复杂多样,需高精度操作与实时监控,而传统人力作业方式效率较低,且易因人为失误影响安全性。机器人技术被视为解决核电站作业难题的有效手段,其能够在高危环境中执行复杂操作,降低人员风险并提升效率。然而,现有机器人在核环境中的定位与导航技术尚未达到理想水平,亟需进一步优化。

收稿日期:2024-09-27。

作者简介:章小强(1982—),男,江西抚州人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为核电厂核安保系统设计、工程实施及新产品研发等。负责完成的项目获核工业部级优秀勘察设计奖4项,其中一等奖1项、二等奖2项、三等奖1项。



章小强,刘泽林,张宏亮,等:基于可见光通信的多传感器融合定位算法

可见光通信(VLC)作为一种新兴无线通信技术,早在21世纪初便已被提出,但基于VLC的室内定位技术直至近年才取得显著进展^[2]。MCKENDRY J D等人^[3]采用时隙分配与波长分配技术^[4]以降低定位干扰,但此类方法对收发端同步性要求较高,且需使用光学滤波器或多个接收器,增加了系统复杂度。CHEN Y R等人^[5]通过机器学习方法将基于光电检测器(PD)的可见光定位(VLP)系统精度提升至厘米级。文献[6]进一步提出仅需单颗发光二极管(LED)即可实现基于PD的三维定位。但上述方法实际性能易受光强波动与测角误差影响,导致精度下降。此外,现有基于PD的定位信道模型多为理想化模型,实际系统参数偏差会引入显著定位误差。

基于图像传感器的VLC定位系统通过捕捉可见光信号的二维图像来推算三维位置,克服了PD系统的部分局限。该技术具备多重优势:首先,它能利用空间分离技术有效区分不同LED信号与背景光,从而抑制多径效应与噪声干扰;其次,图像传感器可直接集成于智能手机等移动设备,更利于技术转化与应用推广,而PD系统通常需要外置传感器,这在很大程度上限制了其消费市场潜力。在机器人定位研究方面,文献[7]报道了首款基于可见光成像定位的移动机器人;文献[8]提出了多移动机器人协同定位方法;文献[9-10]则通过多传感器融合,在实现VLP的同时构建了三维地图与VLC信源地图。这些工作有力推动了VLP技术在机器人领域的发展。然而,上述文献仅探讨了方案可行性,未对定位精度及其它关键性能予以验证。

鉴于此,本文提出一种基于VLC的多机器人协同定位算法,旨在解决核环境作业中的定位和导航难题。

1 基于VLC的多传感器融合定位算法

针对核环境的特殊需求,本文结合VLP技术和多传感器,提出了一种高精度的协同定位算法,提升定位精度和鲁棒性,设计的算法框架流程如图1所示。算法基本原理如下:

首先,对LED灯光进行频率调制,使其以特定频率闪烁,并为每个LED分配唯一的标识(ID)编码,便于后续识别与定位。随后,调整电荷耦合器件(CCD)工业相机的摄像头坐标系,使其与机器人的前进方向保持一致。在数据采集阶段,工业相机捕捉调制后的LED灯光,通过图像处理技术提取LED的ID信息及其在图像中的中心像素坐标。同时,通过里程计获取机器

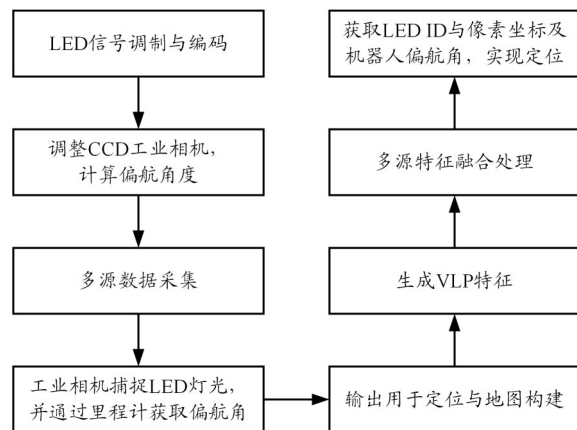


图1 基于VLC的定位算法原理框图

人的偏航角信息。机器人通过订阅 navigation 功能包中的 odometry 消息获取实时偏航角。将终端航向角、工业相机捕获的LED图像及ID信息进行特征化处理,提取每个位姿下的VLP特征,用于后续的定位与地图构建任务。

定位过程的数据处理具体实现步骤如下:

1) 基于ID的VLP特征分类: 对于同一时刻的位姿,系统获取LED灯体的ID信息,记为 I_t^{vp} 。在初始VLP地图点序列 $\{P_t^{\text{vp}}\}$ 中,首先按照ID序号对序列进行分类,得到若干子序列: $\{P_{t, \text{ID}1}^{\text{vp}}\}, \{P_{t, \text{ID}2}^{\text{vp}}\}, \dots, \{P_{t, \text{ID}n}^{\text{vp}}\}$ 。随后,对每个ID对应的子序列 $\{P_{t, \text{ID}n}^{\text{vp}}\}$ 进行遍历计算,估算出近似的灯具中心坐标,从而得到每个ID对应的初始灯具中心位置。

2) 深度相机位姿估计与坐标转换: 利用深度相机采集周围环境的RGB深度图像(RGB-D图像),并通过基于ORB特征点的即时定位与地图构建(SLAM)系统(ORB-SLAM2)^[11]算法的LoopClosing线程计算深度相机的位姿序列 $\{P_t^{\text{db}}\}$ 。基于CCD工业相机与深度相机之间的固定位置关系,通过坐标转换,将深度相机位姿转换为工业相机的位姿序列 $\{P_t^{\text{vp}}\}$ 。进一步地,通过坐标转换将深度相机位姿映射至LED灯光捕获装置的位姿,以便后续数据处理。

3) 时间戳匹配与VLP特征地图构建: 将深度相机获取的LED灯光捕获装置位姿与每个时刻的VLP特征进行时间戳匹配,构建初始VLP特征地图。

4) 灯具中心坐标优化与观测函数计算:

a) 对初始VLP特征地图按ID分类,并基于同一ID下的观测数据估算灯具中心的世界坐标初始值。

b) 设 $(m_x^{\text{vp}}, m_y^{\text{vp}})$ 为世界坐标系下灯具中心的坐标, $(x_t^{\text{vp}}, y_t^{\text{vp}})$ 为工业相机平面中心坐标, $(u_t^{\text{vp}}, v_t^{\text{vp}})$ 为像素平面坐标系下灯具中心的坐标。

c)在观测函数中,若检测到的ID与实际测量ID一致,则利用同一ID下的位姿序列对灯具中心的世界坐标进行优化,并采用高斯-牛顿法(GN法)求解,最终得到高精度的VLP结果。

2 实验及结果分析

2.1 实验设置介绍

为验证所提算法的有效性,本文基于TurtleBot3移动机器人平台搭建了VLP实验验证平台。系统硬件配置如下:

图像采集模块:采用MindVision UB-300工业相机垂直固定于机器人顶部,相机通过先验外部标定确保姿态准确性,图像数据通过Raspberry Pi 3 Model B传输至远程控制器。

环境布置:实验区域为办公室环境,天花板安装支持VLC通信的LED智能灯具,安装高度为2.20 m。

计算架构:受限于Raspberry Pi的算力,图像处理与定位算法部署于远程控制器,控制器运行Ubuntu 16.04桌面版系统,并通过ROS Kinetic框架与机器人(运行Ubuntu 16.04 MATE系统)通信,实现实时数据交互与系统性能展示。

2.2 定位误差结果

为评估VLP算法的定位性能,实验选取高度1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 m这5个水平面,共计225个测量点进行测试,测得每个测量点机器人真实位置与算法估算位置,得到本文所提VLC定位算法的误差直方图和误差累积分布函数(CDF)曲线分别如图2、图3所示。从图2可以看出,最大误差为9.04 cm,最小误差为0.87 cm,可计算出其平均定位误差为3.62 cm。由图3可知,超过90%的测试点定位误差可控制在5 cm以内。

本文通过绘制XY平面各位置点平均误差分布图,

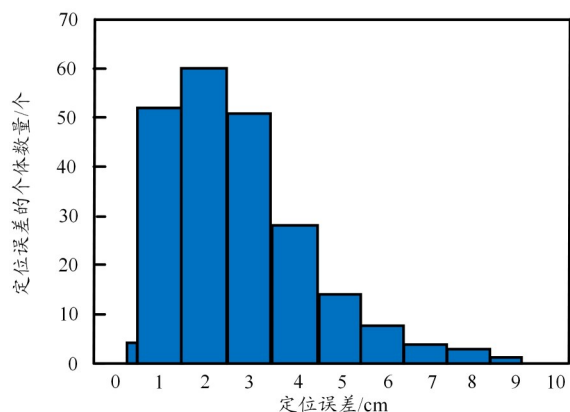


图2 定位误差直方图

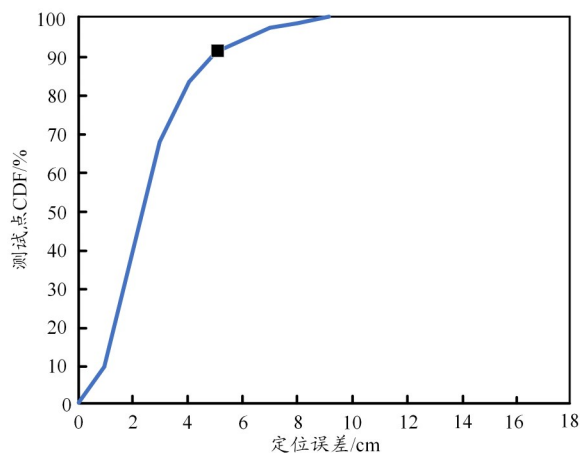


图3 定位误差的CDF曲线

发现多数测点的定位误差保持在较低水平,然而在接近墙角边缘区域时,误差显著增大。该现象的产生机制可归纳为以下三方面因素:首先,墙角几何结构易引发信号反射,光波在传播过程中产生多路径效应,导致接收端信号混叠,进而造成定位精度下降;其次,边缘区域常存在物理遮挡,引起光信号衰减及强度减弱,使得接收器难以获取稳定信号(中心区域的位置误差明显低于边缘区域,这主要源于信噪比的空间分布差异);最后,相较于中心区域,边缘地带的信噪比波动更为明显,这种不稳定性增加了定位算法的处理难度。

2.3 基于RViz可视化多机器人定位的结果

本文基于RViz开发了三维可视化平台,用于实时显示多源数据。为验证VLP系统的鲁棒性,实验设计充分考虑了实际应用场景中的干扰因素。除主LED信源外,实验环境还引入了传统灯管及其它LED等多光源干扰,以模拟核电站环境中常见的复杂光照条件。同时,在办公室特定位置设置了包含墙壁、家具等遮挡物和反射面的测试场景,用以评估系统在高反射和遮挡环境下的性能表现。

实验结果表明,本文所提出的VLP算法在不同场景下均表现出良好的定位性能,包括角落区域、狭窄通道及存在障碍物的复杂环境。通过对RViz可视化平台获取的定位数据进行分析,可得出以下结论:该系统不仅具备抗电磁干扰的固有优势,而且在多场景适应性、实时定位能力和环境鲁棒性等方面表现优异,特别适用于核电站及其它复杂工业环境。

3 结束语

本文针对核环境作业场景,提出了一种基于LED

章小强,刘泽林,张宏亮,等:基于可见光通信的多传感器融合定位算法

与工业相机几何关系的多机器人可见光协同定位算法。通过融合RGB-D相机、工业相机与轮式里程计的多源数据,本算法实现了无需精确解码LED-ID的LED位置检测,并通过系统的室内测试评估了LED地图构建的性能指标。测试数据表明,本算法可实现9 cm级的定位精度,性能优势显著。这一结果证实了所提算法在核环境多机器人协同定位应用中的有效性与可行性。

参考文献:

- [1] SHARMA U, MEDASETTI U S, DEEMYAD T, et al. Mobile robot for security applications in remotely operated advanced reactors[J]. Applied Sciences, 2024, 14(6): 2552-1-2552-33.
- [2] ZHANG S L, WATSON S, MCKENDRY J J D, et al. 1.5 Gbit/s multi-channel visible light communications using CMOS-controlled GaN-based LEDs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8): 1211-1216.
- [3] MCKENDRY J D, MASSOUBRE D, ZHANG S L, et al. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 30(1): 61-67.
- [4] ISLIM M S, FERREIRA R X, HE X Y, et al. Towards 10 Gb/s orthogonal frequency division multiplexing-based visible light communication using a GaN violet micro-LED[J]. Photonics Research, 2017(2): A35-A43.
- [5] CHEN Y R, GUAN W P, LI J Y, et al. Indoor real-time 3-D visible light positioning system using fingerprinting and extreme learning machine[J]. IEEE Access, 2019(8): 13875-13886.
- [6] WANG Z Y, LIANG Z H, LIU R, et al. Design and performance analysis for indoor visible light positioning with single-LED and single-tilted-rotatable-PD[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 5502414-1-5502414-14.
- [7] GUAN W P, CHEN S H, WEN S S, et al. High-accuracy robot indoor localization scheme based on robot operating system using visible light positioning[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-16.
- [8] YAN Z H, GUAN W P, WEN S S, et al. Multirobot cooperative localization based on visible light positioning and odometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-8.
- [9] HUANG J L, WEN S S, LIANG W L, et al. VWR-SLAM: tightly coupled SLAM system based on visible light positioning landmark, wheel odometer, and RGB-D camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 72: 1-12.
- [10] LIU C L, WANG J P, FENG L F, et al. Applying visible light communication co-location in nuclear power plant: architecture and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2022, 30(6): 144-151.
- [11] MUR-ARTAL R, JUAN D T. Orb-slam2: an open-source slam system for monocular, stereo, and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.