

SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模研究

陈 琚

(瓮福<集团>有限责任公司 贵州 福泉 550500)

【摘要】本文探讨了如何利用同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术,通过无人机在井下复杂环境中进行高精度的三维激光扫描与建模。SLAM 技术是一种机器人技术,使得设备能够在未知环境中构建地图的同时进行自我定位,从而提高环境感知和导航能力。在井下空区,由于环境复杂且充满未知因素,传统的测绘技术面临极大的挑战,因此采用 SLAM 技术配合无人机操作可提供一种新的有效解决方案。本文系统阐述了 SLAM 技术在无人机井下三维激光扫描中的应用,包括无人机的设计、数据收集与分析方法、集成设计及三维建模结果的优化,并通过实地测试验证了该技术的实用性与效果。

【关键词】定位与地图构建(SLAM)技术;无人机井下空区;三维激光扫描与建模

【中图分类号】TP237

【文献标识码】A

【文章编号】1009-5624(2024)12-0218-03

0 引言

在地下空间工程中,深部矿井和其他类似环境的结构与动态分析日益受到关注,其中三维激光扫描技术以其高精度与高效率在空间几何信息获取中扮演着重要角色。特别是结合了同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术的无人机平台,能够对人员及传统机械设备不宜进入的区域进行高效的数据采集和建模工作。SLAM 技术作为一种允许无人机在未知环境中进行实时定位和地图构建技术,已被广泛应用于自动驾驶、机器人导航及复杂环境的地图创建中。将此技术应用于无人机,进一步结合井下特有的环境特征,可以在不增加人员风险和成本的前提下,显著提高井下空区的数据采集质量和效率。

1 SLAM 技术的基本原理与发展历史

SLAM 技术自 20 世纪 80 年代末首次被提出以来,已逐步成为计算机视觉和机器人领域的核心研究主题。SLAM 的基本原理是使机器人或无人机在任何先验地图未知的环境中,通过对环境的感知设备,如激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)或立体摄像头收集的数据进行处理,实现在地图构建的同时进行自我定位。这一技术的开发和完善对自动化和智能化系统的实用性提升具有重要意义,尤其是在全球定位系统(global position system, GPS)信号无法覆盖的井下空区等复杂环境中。SLAM 技术发展的最初阶段主要关注基于扩展卡尔曼滤波的方法,该方法虽能够提供实时的定位和地图构建服务,但计算量大,对计算资源的需求高,且难以处理大规模数据。

2 SLAM 技术在井下复杂环境中的适应性和优化方法

在井下复杂环境中,SLAM 技术为无人机提供了在缺少 GPS 支持和视觉参考不足情况下进行空间定位和导航

的能力。由于井下环境特有的空间限制、低照明条件以及高粉尘含量,传统的导航方法常常失效,这使得 SLAM 技术在无人机井下三维激光扫描与建模中显得尤为关键。为了提升 SLAM 系统在此类环境下的适应性和精度,研究者开发了多种优化方法,包括改进的传感器融合策略、环境特征增强技术以及算法效率的优化。传感器融合策略是提升井下 SLAM 应用适应性的重要途径。通过整合 LiDAR、惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU),并配备光学摄像头,无人机能够在多种传感器数据的协助下,增强对环境的感知能力,降低单一传感器失效带来的风险。例如,激光雷达提供精确的距离测量信息,而惯性测量单元则补充了速度和方向的动态数据,这种数据融合使得 SLAM 系统即便在视线受限或光照不足的条件下也能有效工作。针对井下环境特有的特征稀缺问题,环境特征增强技术通过人工增加环境标记或使用高级算法,如深度学习来识别和跟踪环境中的自然特征,从而提升 SLAM 算法的定位精度。

3 基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模

3.1 无人机的设计要求和功能特点

在基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模研究中,无人机的设计要求和功能特点是确保任务成功执行的关键因素。设计上,无人机必须具备高度的环境适应性,能够在光照不足、空间狭窄,并且可能存在高湿和多尘的井下稳定运行。无人机需要配备高精度的传感器,如 LiDAR、IMU 和高分辨率摄像机,以支持 SLAM 算法精确地执行实时位置定位和环境映射。这些传感器不仅需要准确捕捉环境数据,还需能在动态变化的井下环境中快速响应,图 1 为无人机主要设计要求。为满足这些要求,无人机在设计时强调了模块化和轻量化。模块化允许快速更换或升级设备上的各个组件,如传感器和电源单元,以适应特定的任务需求或应对设备故障。轻量化则是确保无人机能够在井下复杂的空间中灵活操作,同时延长

作者简介:陈琚(1997—),男,湖南娄底,本科,助理工程师,研究方向:测绘技术。

飞行时长,减少能耗^[1]。

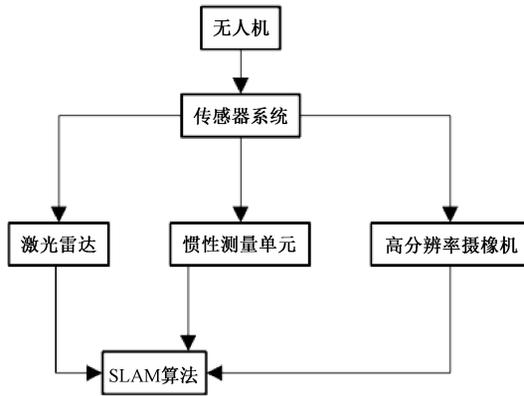


图 1 无人机的设计要求

3.2 数据收集与分析

在基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模研究中,数据收集与分析是实现高精度模型构建的核心环节。此过程涉及无人机配备的多种传感器,包括 LiDAR、IMU,以及可能的立体视觉系统,它们协同工作以捕获井下环境的详细几何信息。无人机在执行 SLAM 算法过程中,通过 LiDAR 进行环境的扫描,生成高密度的点云数据。这些点云数据不仅包含了空间的三维坐标信息,还能通过反射强度提供关于材料属性的线索。IMU 则辅助提供无人机的精确位置和姿态数据,增强定位的准确性,尤其是在 GPS 信号无法到达的地下环境。数据分析阶段,主要利用 SLAM 算法对收集到的数据进行处理,以建立精确的地图模型^[2]。

3.3 无人机的集成设计

在基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模研究中,无人机的集成设计是确保数据采集与处理效率及精度的关键。此设计涉及高度优化的硬件配置和算法集成,以适应井下复杂的环境条件和实现高精度的三维建模。核心组成部分包括 LiDAR、IMU、处理器单元以及高度定制的软件,这些部件的集成采用了特定的算法优化,尤其是在实时路径规划和数据处理方面。

对于实时监测和路径规划,采用了基于图优化的 SLAM 算法,可表示为式(1)的数学公式。

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t) + w_t \quad (1)$$

式中: x_t 代表无人机在时间 t 的状态; u_t 是控制输入; w_t 是过程噪声;函数 f 描述了状态转移。

地图构建与位置更新可由式(2)观测模型描述。

$$z_{t+1} = h(x_{t+1}, m) + v_{t+1} \quad (2)$$

式中: z_{t+1} 是在时间 $t + 1$ 的观测数据; m 代表环境地图;而 v_{t+1} 是观测噪声,函数 h 描述了如何从状态和地图中生成观测数据。

优化问题则通过式(3)的目标函数进行求解。

$$\min_x \sum_{t=1}^T (z_t - h(x_t, m))^2 \quad (3)$$

该目标函数旨在最小化实际观测与模型预测之间的

差异,从而精确估计无人机的轨迹和环境地图。

在无人机的集成设计中,上述算法使得无人机能够在接收到来自激光雷达和 IMU 的数据后,实时更新其位置和环境地图,同时优化其飞行路径以避免潜在的障碍。该设计不仅提高了无人机在井下环境的操作安全性,也增强了数据收集的全面性和精度。通过实时处理激光雷达和 IMU 数据,无人机能够快速响应环境变化,及时调整飞行策略,确保数据采集的连续性和高效性^[3]。此设计核心在于实现高度自动化的飞行控制与数据处理,为井下三维激光扫描提供强大的技术支持,确保了项目的成功执行和高质量的数据输出。

3.4 三维建模结果优化

在基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模研究中,三维建模结果的优化是确保高精度模型质量的关键步骤。该过程涉及对从 SLAM 系统获得的点云数据进行复杂的后处理,以提高模型的准确性和实用性。本研究采用基于图优化的方法来优化三维建模结果,通过精确调整点云数据中各点的位置,最小化全局误差,从而获得更加稳定和精确的三维模型^[4]。

定义点云中每个点的位置 p_i 和相应的观测数据 z_i 之间的误差为 e_i , 见式(4)。

$$e_i = z_i - h(p_i) \quad (4)$$

式中: $h(p_i)$ 表示根据模型预测的观测数据。优化目标是 minimized 所有观测误差的平方和,即优化函数 $F(p)$, 见式(5)。

$$F(p) = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5)$$

通过求解上述优化问题,可以调整每个点的位置,以达到误差最小化。

为了有效解决这一优化问题,采用了非线性最小二乘方法来迭代调整点位。设置初始估计 $p^{(0)}$, 通过雅克比矩阵 J 和海森矩阵 H 迭代更新点位,见式(6)。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial p_1} & \frac{\partial e_2}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial e_n}{\partial p_n} \end{bmatrix}^T$$

$$H = J^T J$$

$$\Delta p = -H^{-1} J^T e \quad (6)$$

每次迭代更新 p 的估计,见式(7)。

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} + \alpha \Delta p \quad (7)$$

式中: α 是步长,选择合适的 α 可确保收敛性和更新的效率。

在无人机井下空区的三维建模中,此优化算法的应用显著提高了模型的精度和可靠性。通过减少点云数据中的噪声和误差,优化后的模型更能真实反映井下空间的几何特征。此外,优化过程也增强了模型的稳定性,使得模型在多次测量和不同条件下都能保持较高的一致性和重复性。通过此算法,三维建模不仅在技术上得到了进步,更在实际应用中展现了较大的潜力,为地下空间的勘探和

评估提供了更可靠的数据支持。

4 技术应用测试

在本研究中,为全面评估基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模系统的性能,需在井下空区进行实验,确保所有安全协议得到严格遵守,包括但不限于确保无人机操作的安全性、实验区域的稳定性及通风条件。此外,考虑到井下环境的特殊性,无人机应配备适应低光照和高湿度环境的传感器和相机,以便准确收集数据。无人机的飞行路径应事先规划,以避免可能出现的障碍和干扰,确保数据的连续性和完整性。实验数据的收集应围绕无人机的操作性能、传感器数据的准确性和环境对无人机性能的影响进行。可以考虑使用多种传感器,如温湿度传感器、光学和热成像相机等,以全方位评估无人机在模拟井下环境中的响应情况。

在本研究中,收集的所有数据均用于系统功能的测试,没有进行任何模型的训练。这是因为研究的主要目的是验证和优化现有的 SLAM 算法及其在特定硬件上的实现效果,而非开发新的预测模型。数据集共包含 5 个独立的实验数据,每次实验都生成一组完整的测试结果,表 1 为测试数据。在本研究中,为了确保对基于 SLAM 技术的无人机井下空区三维激光扫描与建模系统进行全面的功能测试,研究人员进行了五次独立的实验,每次实验均在相同的控制环境下进行以保证数据的一致性。这五次实验未进行特别的分组,因为每次实验的目的都是为了测试整个系统在相同条件下的表现,以便直接比较不同实验之间的数据变化。这样的安排能够直观地观察到任何性能波动或显著的改进,而无须担心由于分组导致的变量控制问题。

表 1 测试数据

实验编号	定位精度/m	地图精度/%	处理时间/s	系统稳定性/%
001	0.12	97.35	120.45	98.45
002	0.15	96.25	118.55	99.12
003	0.13	95.89	115.65	97.55
004	0.14	97.00	119.85	98.67
005	0.11	96.78	116.75	96.89

从表 1 可以看出,各项指标在不同实验中表现出较小的波动,表明系统具有较高的可靠性和一致性。定位精度保持在 0.11~0.15 m,说明无人机在井下环境中具有良好的定位能力。地图精度在 95.89%~97.35%,显示了 SLAM 技术在建立准确的地图模型方面的有效性。处理时间在 115.65~120.45 s,这表明系统能够在合理的时间内完成数据处理和地图构建。系统稳定性的百分比接近或高于 97%,证明了系统在实验条件下的稳定运行。这些结果不仅证明了系统设计的合理性,也显示了技术实现的成熟度,为系统的进一步的应用和开发提供了坚实的基础。

5 结语

本文的研究价值在于通过精确建模井下空区,为矿山安全监控、后续开发及灾害预防提供决策支持。传统的地图绘制方法在时间和成本上往往无法满足现代矿业对效率和安全性的重要要求。而基于 SLAM 的无人机三维激光扫描技术不仅提高了数据采集的效率,其生成的高质量三维地图还可以实时更新,为矿区的动态管理提供了可能。该技术的进一步发展,将使得无人机能够在更广泛的地下环境中自主导航和执行复杂任务,如裂缝检测、环境监测等,这些都是提高矿山工作环境安全与效率不可或缺的部分。

【参考文献】

- [1] 林善志. 基于 SLAM 技术移动式三维激光扫描仪在矿山井下测量中的应用 [J]. 价值工程, 2022, 41(26): 115-117.
- [2] 芦竹茂, 武娜, 赵亚宁, 等. 基于激光雷达的无人机在杆塔附近的定位研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 28-36.
- [3] 王宇翔, 沈月千. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别方法 [J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-19 [2024-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20240111.0837.020.html>.
- [4] 吴栋浩. 基于无人机航测与三维激光扫描的工程地形测绘技术研究 [J]. 贵州地质, 2022, 39(3): 300-304.