

基于 SLAM 的无人机三维实时建模关键技术 研究与应用

刘乔风¹, 廖静姝^{2*}, 李新建¹, 施艳磊¹, 李丽¹
1. 广西产研院时空信息技术研究所, 广西 南宁 530200
2. 广西产业技术研究院, 广西 南宁 530200
DOI: 10.61369/SSSD.2025070039

摘 要 : 无人机技术的飞速发展, 使其在众多领域得到广泛应用。在复杂环境中, 无人机需要具备自主导航与环境感知能力, 三维实时建模技术成为关键。同步定位与地图构建 (SLAM) 技术赋予无人机在未知环境中同时确定自身位置和构建环境地图的能力, 为三维实时建模提供了核心支持。通过 SLAM 技术, 无人机能够实时感知周围环境, 获取精确的位置信息, 并构建出高精度的三维地图, 这对于无人机在诸如救援、测绘、巡检等领域的高效作业至关重要, 极大地拓展了无人机的应用范围与效能。

关 键 词 : SLAM; 无人机; 三维实时建模; 技术; 应用

Research and Application of Key Technologies for UAV 3D Real-Time Modeling Based on SLAM

Liu Qiaofeng¹, Liao Jingshu^{2*}, Li Xinjian¹, Shi Yanlei¹, Li Li¹

1. Institute of Spatiotemporal Information Technology, Guangxi Academy of Industrial Technology, Nanning, Guangxi 530200

2. Guangxi Academy of Industrial Technology, Nanning, Guangxi 530200

Abstract : The rapid development of UAV technology has enabled its wide application in numerous fields. In complex environments, UAVs need to possess autonomous navigation and environmental perception capabilities, making 3D real-time modeling technology crucial. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology endows UAVs with the ability to determine their own positions and construct environmental maps in unknown environments, providing core support for 3D real-time modeling. Through SLAM technology, UAVs can perceive the surrounding environment in real-time, obtain accurate position information, and construct high-precision 3D maps. This is vital for the efficient operation of UAVs in fields such as rescue, surveying and mapping, and inspection, greatly expanding the application scope and effectiveness of UAVs.

Keywords : SLAM; UAV; 3D real-time modeling; technology; application

一、SLAM 技术基础

(一) SLAM 技术原理

SLAM 的目的是在没有地图的情况下让移动设备通过自己的传感器数据来定位和构建周围环境的地图, 这主要通过传感器观察环境特征来完成, 比如, 激光雷达可以发射激光并接收反射光, 从而获取周围物体的距离信息, 生成点云数据。^[1] 我们还可以用视觉传感器拍照, 从而提取图像中的特征点, 比如角点和边缘点。无人机在飞行过程中, 可以不断对比不同时间点的传感器数据中的环境特征, 而后用算法计算自己的位置变化, 通过不断优化逐步构建出准确的环境地图, 并精确确定自己在地图中的位置。

(二) SLAM 技术分类

1. 基于激光雷达的 SLAM

激光雷达 SLAM 利用激光雷达可以获取的高精度距离信息,

从而构建一个环境的点云地图, 其优势在于能够快速获取大量精确的距离数据, 生成的地图精度非常高, 还可以对环境的几何结构进行清晰表示。^[2] 在一些空旷或特征相对规则的环境中, 如大型仓库、建筑工地等, 激光雷达 SLAM 能够高效地工作, 更为准确地定位无人机并构建地图, 但在一些复杂的自然环境中, 激光雷达的光线可能会被遮挡, 从而导致其出现数据缺失的情况, 影响地图构建的完整性。

2. 基于视觉的 SLAM

视觉 SLAM 依靠摄像头采集的图像序列进行定位与建图, 它可以通过提取图像中的特征点, 并利用特征匹配算法跟踪这些点在不同图像中的位置变化, 从而计算无人机的运动轨迹和构建地图。视觉 SLAM 具有成本低、信息丰富等优点, 能够获取环境的纹理信息, 生成的地图更具直观性。^[3] 在一些光照条件良好、纹理特征丰富的环境中, 如城市街道, 视觉 SLAM 表现出色。但是,

基金项目: 应急管理联合创新科技攻关项目 (《基于无人机的实时三维建模关键技术研究与应用》(项目编号: 2024GXYJ053))。

视觉 SLAM 对光照变化敏感, 在一些低光照、强光直射或纹理匮乏的环境下特征提取和匹配会变得困难, 定位和建图精度会大幅下降。

3. 多传感器融合的 SLAM

多传感器融合 SLAM 结合了激光雷达、视觉传感器、惯性测量单元 (IMU) 等多种传感器的数据, IMU 能够提供无人机的加速度和角速度信息, 可以在短时间内具有较高的精度, 可用于弥补其他传感器在高频动态响应方面的不足。^[4] 通过融合不同传感器的优势, 多传感器融合 SLAM 能够在更广泛的环境中稳定工作, 从而大幅提高系统的精度。在室内外复杂环境切换时, 单一传感器可能会出现失效的情况, 而多传感器融合系统能够依靠其他正常工作的传感器继续维持定位和建图功能, 确保无人机的正常运行。

二、无人机三维实时建模中的 SLAM 关键技术

(一) 传感器数据处理

激光雷达数据处理主要包括点云滤波、特征提取和配准, 点云滤波用于去除噪声点和离群点, 这样可以大幅提高数据质量, 常用的滤波方法有统计滤波, 通过计算点云中每个点与其邻域点的统计信息, 如距离均值和方差, 去除偏离统计特征过大的点。^[5] 半径滤波则可以根据设定的半径范围保留或去除点云中的点, 特征提取是从点云中提取具有代表性的几何特征, 如平面、直线、角点等, 这些特征用于后续的定位和地图构建。点云配准是将不同时刻获取的点云数据对齐到同一坐标系下, 常用的配准算法有迭代最近点 (ICP) 算法, 通过不断迭代寻找两个点云之间的最优变换矩阵使它们尽可能重合。

视觉数据处理涵盖图像特征提取、匹配和姿态估计, 图像特征提取算法众多, 如尺度不变特征变换 (SIFT) 算法, 它通过构建图像的尺度空间, 检测具有尺度不变性的关键点, 并计算其描述子。加速稳健特征 (SURF) 算法则在 SIFT 的基础上进行改进, 并采用积分图像等技术提高计算效率, 特征匹配是将不同图像中的特征点进行对应, 常用的匹配方法有基于描述子的匹配, 通过计算特征点描述子之间的距离 (如欧氏距离、汉明距离) 来确定匹配关系。姿态估计是根据匹配的特征点对, 利用三角测量等方法计算相机 (无人机搭载) 的姿态, 如直接线性变换 (DLT) 算法通过求解线性方程组得到相机的旋转和平移参数。^[6] 多传感器数据融合处理旨在将不同传感器的数据进行有机结合, 以此获取更为准确、全面的信息。时间同步是融合的基础, 确保不同传感器在同一时刻采集的数据能够正确关联, 可通过硬件同步或软件时间戳对齐的方式实现, 数据关联则确定来自不同传感器的数据所对应的同一物理对象。

(二) 实时定位算法

在滤波的定位算法中, 卡尔曼滤波是经典代表, 卡尔曼滤波假设系统状态和观测噪声均服从高斯分布, 通过预测和更新两个步骤进行状态估计, 在预测步骤中, 我们可以根据系统的运动模型预测下一时刻的状态和协方差。在更新步骤中, 我们可以利用

观测模型将传感器观测数据与预测状态进行融合修正状态估计, 对于非线性系统, 可以尝试利用 EKF 对系统状态转移函数和观测函数进行一阶泰勒展开线性化, 然后应用卡尔曼滤波框架进行处理。无迹卡尔曼滤波 (UKF) 则采用确定性采样策略, 通过选择一组 Sigma 点来近似系统状态的概率分布, 避免了 EKF 的线性化误差, 在一些复杂非线性系统中表现更优。

基于优化的定位算法将定位问题转化为一个优化问题, 通过最小化误差函数来求解最优的位姿估计, 图优化是常用的方法, 它将无人机的位姿和环境特征点作为图中的节点, 将传感器观测数据形成的约束关系作为边。^[7] 例如, 激光雷达的点云配准约束、视觉特征点的匹配约束等。构建图模型后, 我们可以利用非线性优化算法对图进行优化, 不断调整节点的位置, 以此促是误差函数最小化, 从而得到精确的位姿估计。基于优化的定位算法能够充分利用全局信息, 在大规模场景下具有较高的定位精度和稳定性。

(三) 地图构建算法

点云地图构建是将激光雷达或视觉 SLAM 生成的点云数据整合为完整的地图, 在点云地图构建过程中, 需要对不同时刻、不同位置获取的点云进行拼接和融合。为此, 我们可以通过定位算法确定点云之间的相对位姿关系, 然后将点云转换到统一的坐标系下进行合并。为了减少地图数据量和提高地图的可读性, 通常会进行点云压缩和简化处理。点云地图能够精确地反映环境的几何形状, 适用于对环境精确建模要求较高的应用场景。在构建过程中, 根据传感器数据更新网格单元的状态。^[8] 对于激光雷达数据, 通过射线投射算法确定激光束经过的网格单元状态, 对于视觉数据, 可以利用深度估计结果来更新对应网格单元的高度等信息。网格地图具有简单直观、易于存储和处理的优点, 适合用于路径规划等应用, 在路径规划时, 我们可以直接在网格地图上搜索从起点到终点的可行路径, 计算效率较高。如此, 便可实现在无人机航拍过程中, 基于视觉 SLAM 算法, 根据无人机航拍路线, 实现“边飞-边传-边建”的三维实景模型实时构建。(如图一)



图1 无人机航拍实时三维场景构建

三、基于 SLAM 的无人机三维实时建模系统设计

(一) 硬件系统设计

无人机平台的选型需综合考虑多个因素。在飞行性能方面,

续航能力决定了无人机的作业时间，对于大面积的建模任务，我们需要选择续航时间长的无人机，载重能力会影响可搭载传感器的种类和数量，若要同时搭载激光雷达、高精度相机等设备，我们需确保无人机有足够的载重。飞行稳定性也至关重要，稳定的飞行能够减少传感器数据的噪声，提高建模精度。此外，机动性决定了无人机在复杂环境中的作业能力，例如在狭窄空间或障碍物较多的区域，需要无人机具备灵活的转向和避障能力。例如，多旋翼无人机具有垂直起降、悬停稳定的特点，适合在城市、室内等复杂环境中进行建模作业；固定翼无人机则具有速度快、续航长的优势，适用于大面积的地形测绘建模。在激光雷达方面，不同型号的激光雷达在测量范围、精度、分辨率等方面存在差异。^[9]对于远距离、大面积的环境建模，我们需要选择测量范围大、精度高的激光雷达。在对细节要求较高的室内建模场景，则可选用分辨率高的激光雷达，视觉传感器的选型要考虑相机的分辨率、帧率和动态范围，高分辨率相机能够获取更丰富的纹理信息，高帧率相机适合无人机高速飞行时的图像采集，大动态范围相机则能在光照变化较大的环境中正常工作。在集成过程中，我们要合理布局传感器，确保它们之间不会相互干扰，并且能够全面地感知周围环境。例如，将激光雷达安装在无人机底部，以获取地面的精确距离信息；将相机安装在不同角度，实现对周围环境的全方位视觉覆盖。

（二）软件系统设计

SLAM 算法实现需根据选用的传感器和硬件平台进行优化。在基于激光雷达的 SLAM 算法实现中，我们要高效处理激光雷达产生的大量点云数据。例如，我们可以采用并行计算技术，利用

GPU 加速点云滤波、特征提取和配准等操作，以此进一步提高算法运行速度。对于视觉 SLAM 算法，我们应优化特征提取和匹配的效率，积极采用快速的特征提取算法，并尝试结合机器学习方法进行特征筛选，减少不必要的计算量。在多传感器融合 SLAM 算法实现中，我们要确保不同传感器数据的准确融合，优化时间同步和数据关联算法，提高融合精度。同时，要实现算法的实时性，满足无人机在飞行过程中对定位和建图的实时需求。数据处理模块负责对传感器采集的数据进行预处理、融合和分析。^[10]为此，在预处理阶段，我们应对激光雷达数据进行去噪、滤波，对视觉图像进行增强、校正等操作。在融合阶段，我们可以将不同传感器的数据按照选定的融合算法进行合并，得到更准确的环境信息。在分析阶段，我们可以从融合后的数据中提取有用的特征，如环境的几何结构、语义信息等。数据管理模块负责数据的存储、检索和更新。采用合适的数据结构存储地图数据和传感器数据，例如使用八叉树结构存储点云地图，提高数据存储和检索效率。同时，要实时更新地图数据，反映环境的动态变化，确保地图的时效性和准确性。

人机交互界面为操作人员提供与无人机建模系统交互的接口。界面应具备实时显示功能，能够实时展示无人机的位置、姿态、传感器数据以及地图构建进度等信息，使操作人员能够直观地了解系统运行状态。操作控制功能要简洁易用，操作人员可以通过界面方便地对无人机进行起飞、降落、飞行轨迹规划等操作。此外，还应具备数据查询和分析功能，操作人员能够查询历史地图数据、传感器数据，并对数据进行分析，例如查看特定区域的地形变化、物体分布等信息，为决策提供支持。

参考文献

- [1] 王瑞龙, 孙世国, 王亨通, 等. 基于 GIS 和无人机摄影技术的边坡三维建模研究 [J]. 河北水利电力学院学报, 2024, 34(04): 61-65.
- [2] 尹娇. 基于无人机倾斜摄影技术的三维模型精细化分析 [J]. 黑龙江科学, 2024, 15(24): 156-158.
- [3] 陈超盛. 基于无人机倾斜摄影数据的地理信息实景三维建模研究 [J]. 江西建材, 2024, (12): 164-166.
- [4] 强琦秀, 何文芳, 张逸, 等. 基于无人机倾斜摄影的合院民居三维建模方法研究 [J]. 城市环境设计, 2024, (06): 311-313.
- [5] 李和旺, 郑先超, 蒙东林, 等. 无人机贴近摄影测量在古建筑三维建模中的应用研究 [J]. 智能城市, 2024, 10(12): 36-38.
- [6] 陈济爱. 基于无人机倾斜摄影的实景三维建模技术研究 [J]. 智能城市, 2024, 10(12): 48-50.
- [7] 曹凯, 李波, 马玉慧, 等. 基于三维建模技术的交流变电站无人机飞行安全策略 [J]. 机械与电子, 2024, 42(12): 55-60.
- [8] 胡群珍, 胡燕琴. 无人机倾斜摄影测绘技术在城市实景三维建模中的应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (12): 31-33.
- [9] 刘西东. 无人机倾斜摄影测量技术在大规模历史遗留矿山治理中的应用 [J]. 测绘技术装备, 2024, 26(04): 105-110. DOI: 10.20006/j.cnki.61-1363/P.2024.04.020.
- [10] 林喜. 无人机航测技术在 Revit 快速建模中的应用 [J]. 测绘技术装备, 2024, 26(04): 88-92.