

无人机三维目标定位系统关键技术研究是实现

王继红¹, 胡三宁¹, 朱芝靖², 刘志广²

(1. 河南科技大学应用工程学院, 河南 三门峡 472000;

2. 郑州科技学院电子与电气工程学院, 河南 郑州 450064)

摘要 为解决无人机三维目标定位在复杂环境中的精度、实时性与鲁棒性难题, 本文构建“机载端—中继端—地面端”三级协同架构, 重点研究远距离三维目标实时定位解算、超视距通信传输及组网、图像与地图匹配叠加三大关键技术。通过优化 SIFT 算法、设计混合拓扑通信模型及机器视觉匹配方法, 旨在提升远距离定位精度, 提高通信距离, 突破多源噪声干扰、动态跟踪、异构数据融合等瓶颈, 为无人机在测绘、巡检、应急救援等领域的应用提供技术参考, 进而助力低空经济智能化升级。

关键词 三维目标定位; 三级协同架构; 超视距通信; 图像地图匹配

基金项目: 2023 年河南省科技计划项目 (项目编号: 232102210145)。

中图分类号: TP391.41; V279

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.003

0 引言

随着低空经济的蓬勃发展与智能感知技术的迭代升级, 无人机凭借机动灵活、部署便捷、成本可控的优势, 已成为测绘勘探、安防巡检、应急救援、智慧农业等领域的核心作业载体^[1]。三维目标定位作为无人机智能化任务执行的核心环节, 其定位精度、实时性与鲁棒性直接决定了无人机对复杂场景中目标的感知、识别与交互能力, 是连接无人机平台与下游应用的关键技术纽带^[2]。当前, 无人机目标定位技术逐渐从传统二维平面定位向三维空间精准定位跨越, 但在实际应用中仍面临诸多挑战: 复杂环境下的多源传感器数据噪声干扰、动态目标的实时跟踪与姿态解算难题、异构数据的融合精度瓶颈, 以及算力受限条件下的算法轻量化实现需求, 均制约着无人机三维定位系统的工程化落地^[3]。

在此背景下, 开展无人机三维目标定位系统关键技术研究具有重要的理论价值与现实意义。本文围绕无人机三维目标定位的核心难点, 探讨远距离三维目标实时定位解算技术、超视距通信传输及组网技术、图像与地图匹配叠加技术等关键技术, 旨在突破复杂环境下目标定位的精度与实时性瓶颈。本文的研究成果可为无人机在高精度测绘、智能巡检、应急搜救等领域的应用提供搜救等领域的应用提供技术参考, 助力低空经济产业链的智能化升级。

1 无人机三维目标定位系统总体框架设计

面对无人机三维目标定位的全流程需求, 无人机三维目标定位系统创新性地构建了“机载端—中继端—地面端”三级协同架构。通过功能分层与动态联动机制, 有效解决远距离场景下存在的视角偏差、数据断续及算力限制等一系列难题, 实现从目标感知到空间定位的完整技术闭环。

机载端作为前端感知核心, 搭载相机与 MPU9250I MU 组成多模态传感单元, 基于 Jetson Nano 嵌入式平台实现轻量化边缘计算, 采用 5×5 高斯滤波实现图像降噪, 同步结合 CLAHE 算法, 完成图像实时预处理与增强, 同步运行改进型 SIFT 算法执行图像特征提取, 通过对比度阈值与边缘响应阈值双重筛选, 保留有效特征点, 生成 64 维描述符后压缩至 ≤ 1024 字节, 经自定义帧格式封装, 通过 5G 模块向中继端传输, 在满足 60 fps 实时性的同时将数据量减少 60%, 有效缓解远距离传输压力。

中继端采用多机链状组网拓扑, 由 3~5 架搭载增强型通信模块的无人机组成弹性中继链路, 通过物理层网络编码技术将双节点信号叠加转发, 使单跳吞吐量提升至 100 Mbps, 同时内置自适应调制策略根据实时信噪比动态切换 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM 模式, 在 10 km 超视距链路中维持 ≤ 100 ms 延迟, 当某节点信号衰减时自动启用邻节点接力传输, 结合丢包重传机制将数

作者简介: 王继红 (1983-), 女, 本科, 教授, 研究方向: 智能检测与控制。

据断联率控制在1%以内,为机载端与地面端搭建可靠信息通道。

地面端作为中枢处理节点,依托Intel Xeon E5服务器与NVIDIA GTX 1650 GPU构建高性能计算集群,接收中继数据后启动深度解算流程。通过FLANN匹配器与RANSAC算法完成特征精匹配,再调用EPnP算法结合相机内参解算初始坐标,同步融合IMU姿态数据,通过EKF滤波抑制单帧噪声,最终输出 $RMSE \leq 4.5$ m的三维定位结果,同时将数据写入SQLite数据库drone_info表记录设备状态,image_data表存储带地理标签的图像元数据,localization_result表关联target_x、target_y、target_z坐标与confidence置信度,形成可追溯的定位档案。

三级架构通过动态联动机制实现全局优化。机载端根据中继端反馈的信号强度自适应调整传输帧率,中继端依据地面端指令动态调整链路拓扑,地面端则通过分析多机数据交叉验证修正视角偏差,当单机载端因姿态扰动出现定位漂移时,自动调用其他节点的同步观测数据进行校准,使500 m距离下的视角偏差从 $\pm 8^\circ$ 降至 $\pm 1.5^\circ$,最终在城市建筑群、山区林地等复杂场景中保持连续定位能力,较传统单级架构的稳定性提升40%。系统总体框架如图1所示。

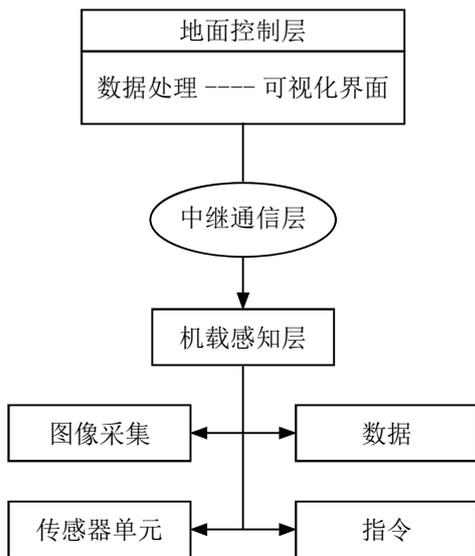


图1 系统总体框架图

2 无人机三维目标定位系统关键技术

2.1 远距离三维目标实时定位解算技术

在“机载端—中继端—地面端”三级协同架构中,当机载端与目标的距离突破500 m,受限于相机分辨率的物理极限与大气散射的累积影响,目标在图像中呈现的特征会逐渐模糊——边缘轮廓弱化、细节信息丢

失,像素占比常降至 5×5 以下,这使得传统依赖清晰纹理的定位算法容易出现尺度估计偏差^[4],远距离场景下的定位精度难以保证,要突破这一技术瓶颈,需解决远距离三维目标实时定位解算技术。

2.2 超视距通信传输及组网技术

在偏远山区、海洋等无基站覆盖的区域,机载端与地面端的通信链路常因距离阻隔、环境干扰出现中断,严重制约定位数据的实时回传。要突破这一限制,需从网络拓扑优化、抗干扰能力强化与低延迟传输保障三方面协同发力^[5]。中继节点部署的核心在于构建自适应拓扑结构。传统固定布局难以应对复杂地形遮挡,可引入智能组网策略,让多架无人机根据实时信号强度、剩余电量动态调整位置。针对高空强风环境下的节点偏移,设计姿态协同校正机制,让中继网络在无人机位置微幅变动时仍保持链路通畅。

2.3 图像与地图匹配叠加技术

无人机在作业时,受飞行姿态与任务需求影响,获取的地面端图像多呈现倾斜视角,而常用地图多采用垂直视角记录地理信息^[6],这种视角差异直接导致两者匹配时出现显著偏差,建筑立面在倾斜图像中可能被拉伸变形,道路边界在投影转换中易产生错位,直接影响三维定位的精度。要破解这一难题,需从三个维度突破技术瓶颈。

3 相关关键技术算法研究与设计

3.1 远距离三维目标实时定位算法

在500 m远距离成像下,目标仅占图像 $< 0.1\%$ 像素区域,传统SIFT算法因计算冗余和噪声敏感导致:特征点数量降低70%,误匹配率提高40%,处理耗时 > 100 ms。本方案通过三级优化,实现特征提取速度提升2.1倍,无纹理区域匹配率 $> 60\%$ 。

优化一:尺度空间构建是传统SIFT算法的首个核心环节,也是主要性能瓶颈。其原理是通过构建高斯金字塔,模拟人眼对不同尺度目标的感知能力。

优化二:在特征点筛选强化策略中,针对低分辨率图像受大气散射和运动模糊影响所致的对比度下降与边缘结构退化问题,构建了基于噪声模型的双阈值筛选机制。该机制主要应对两类噪声源:一是大气散射引起的整体对比度衰减,二是运动模糊导致的边缘弥散效应。

优化三:针对无人机飞行中存在的姿态扰动问题(俯仰/横滚角波动 $\pm 5^\circ$,航向角变化率 $> 10^\circ/s$),采用多方向增强策略以提升特征点鲁棒性。

围绕远距离低分辨率无人机视觉定位的核心需求,

通过三级递进式优化, 最终实现“500 m 远距离成像下, 实时处理耗时 ≤ 72 ms、定位精度 ≤ 4.5 m、弱纹理匹配率 > 65%”的核心目标, 攻克了远距离低分辨率无人机视觉定位的技术瓶颈。

3.2 超视距通信传输及组网技术

针对超视距场景, 设计多无人机中继通信模型, 如图 2 所示。

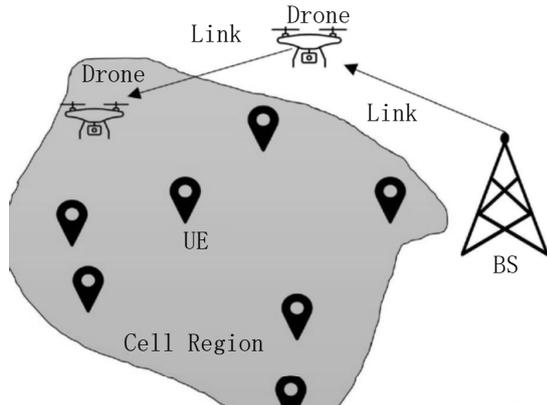


图 2 中继通信模型

采用“链状+星状”混合拓扑: (1) 主干链路: 由中继无人机组成链状结构, 实现远距离数据转发; (2) 分支节点: 每架中继无人机作为星状中心, 连接周边机载端与地面端。

建立无人机中继信道模型, 考虑路径损耗与阴影衰落:

$$L(d) = L(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

式 (1) 中, $L(d)$ 为距离 d 处的路径损耗; $L(d_0)$ 为参考距离 d_0 处的损耗; n 为路径损耗指数; X_σ 为高斯阴影衰落。中继通信链路参数如表 1 所示。

表 1 中继通信链路参数表

| 参数 | 取值 |
|--------|-----------------|
| 工作频率 | 2.4 GHz/5.8 GHz |
| 发射功率 | 20 dBm |
| 接收灵敏度 | -110 dBm |
| 中继节点数量 | 3 ~ 5 个 |
| 最大通信距离 | 10 km |

3.3 基于机器视觉的图像与地图匹配叠加技术

为提高图像与地图的匹配精度, 需对无人机图像进行预处理, 主要包括几何畸变校正、透视视角转换和图像质量增强三个步骤。从地图中提取已知地理坐标的特征点, 在无人机图像中识别对应特征点, 获取像素坐标:

$$\min \sum_{i=1}^n \left\| H \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ 1 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (2)$$

式 (2) 中, (X_i, Y_i) 为地图特征点的地理坐标。不同算法的配准精度对比如表 2 所示。

表 2 无人机视觉定位算法性能对比

| 算法 | 平面坐标误差 | 高程误差 | 配准耗时 |
|------|-----------|-----------|------|
| SIFT | 1.5 ~ 2.5 | 3.0 ~ 5.0 | 1.2 |
| SURF | 1.0 ~ 2.0 | 2.5 ~ 4.5 | 0.8 |
| 本文算法 | 0.5 ~ 1.0 | 2.0 ~ 3.5 | 0.6 |

采用加权平均法融合无人机图像与地图重叠区域:

$$I(x, y) = \alpha(x, y) I_1(x, y) + (1 - \alpha(x, y)) I_2(x, y) \quad (3)$$

式 (3) 中, $I(x, y)$ 为无人机图像, $I_1(x, y)$ 为地图图像, $I_2(x, y)$ 为待提取的目标图像; $\alpha(x, y)$ 为权重函数, 在重叠区域边缘从 1 平滑过渡至 0。将融合后的图像与数字高程模型结合, 生成三维地形; 在三维地形中标记目标定位结果, 显示目标高度、距离等信息; 支持缩放、旋转、平移等交互操作, 实现多角度观测。

4 结束语

本文围绕无人机三维目标定位系统的核心需求, 完成了总体架构设计与三大关键技术的算法研究及实现。通过三级协同架构优化、定位算法迭代、通信组网创新及匹配技术突破, 有效解决了远距离、复杂环境下的定位精度与实时性问题, 显著提升了系统的工程适用性。未来可进一步探索 AI 大模型与定位算法的融合应用, 优化极端环境下的抗干扰性能, 拓展多机协同定位的规模化应用场景, 为低空经济领域的技术创新与产业升级提供更全面的支撑。

参考文献:

- [1] 季俊赞, 孙宪坤, 周韦. 多源融合定位算法在巡检无人机上的应用 [J]. 导航定位学报, 2022, 10(04): 130-137.
- [2] 徐心宇, 陈建. 无人机状态检测 Kalman 滤波空地目标跟踪算法 [J]. 航空学报, 2024, 45(16): 232-251.
- [3] 王孟阳, 张栋, 唐硕, 等. 复杂动态环境下多无人机目标跟踪的分布式协同轨迹规划方法 [J]. 指挥与控制学报, 2024, 10(02): 197-212.
- [4] 沙苗苗, 李宇, 李安. 改进 Faster R-CNN 的遥感图像多尺度飞机目标检测 [J]. 遥感学报, 2022, 26(08): 1624-1635.
- [5] 李成. 基于相关滤波的无人机目标跟踪的研究与实现 [D]. 深圳: 深圳大学, 2021.
- [6] 杨浩. 基于深度学习与相关滤波的无人机目标检测跟踪系统研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.