

无人机三维目标定位系统设计与实现

朱芝靖¹, 王继红^{2*}, 胡三宁²

(1. 郑州科技学院电子与电气工程学院, 河南 郑州 450064;

2. 河南科技大学应用工程学院, 河南 三门峡 472000)

摘要 随着无人机在应急救援、电力巡检、环境监测等领域的广泛应用, 高精度、实时化的三维目标定位成为关键技术需求。本文针对现有无人机定位系统在远距离、复杂环境下存在的硬件负载重、功耗高、环境适应性差等问题, 通过模块化集成与性能优化, 构建集环境感知、数据处理与无线传输于一体的无人机三维目标定位硬件系统, 重点阐述各核心硬件模块的电路设计及参数选型, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 无人机; 三维目标定位; 模块化设计; 低功耗

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.2097-3365.2025.30.002

0 引言

无人机产业作为国家战略性新兴产业, 在政策推动与技术迭代的双重驱动下实现快速发展。无人机凭借成本低、机动性强、无人员伤亡风险等优势, 已广泛应用于民用勘测、科学研究等领域。在民用方面, 如地质监测、气象观测、资源勘探和森林防灾防火等工作中价值显著; 在科学研究中, 高校和科研机构也将用于大气研究、核生化污染区取样与监控等任务^[1]。然而, 无人机在执行任务时面临复杂多变的环境与技术挑战, 定位和导航是实现其高效、安全运行的核心技术。在开阔地区, 无人机通常依赖全球定位系统 (GPS) 确定位置和航向, 但在城市峡谷、室内、地下或其他全球导航卫星系统 (GNSS) 信号受限的环境中, GPS 信号丢失或干扰会严重影响定位精度与操作安全^[2]。此外, 无人机拍摄时的倾斜角度及目标物在图像中的位置偏差, 导致二维目标定位无法满足立体位置高精度定位需求, 且人为信号干扰进一步对定位系统提出更高要求。本文针对无人机三维目标定位的技术痛点, 融合机器视觉、图像匹配校正、5G 通信等技术, 构建完整的无人机三维目标定位硬件系统。

1 硬件总体架构

在无人机三维目标定位系统的分层架构中, 机载端是无人机三维目标定位系统的核心前端感知单元, 可直接搭载于小型无人机平台, 其核心职责涵盖环境感知、设备状态监测及数据预处理, 通过多模块协同

工作, 为后续定位解算环节提供高精度数据支撑, 保障定位系统整体性能。

无人机三维目标定位系统机载端采用“异构集成+模块化”架构, 以 STM32H743VGT6 高性能微控制器为核心, 串联图像采集、惯性测量、无线通信与智能电源四大功能模块, 各模块通过标准化接口实现数据交互, 整体架构如图 1 所示。

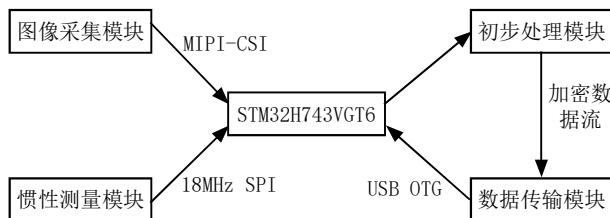


图 1 机载端系统架构图

接口采用工业级标准接口 (如 MIPI-CSI 用于图像传输、SPI 用于 IMU 数据读取、USB OTG 用于 5G 通信), 避免自定义接口导致的兼容性问题, 同时提升数据传输速率 (如 MIPI-CSI 速率达 5Gbps, 满足 2 000 万像素 60fps 图像传输需求)。关键模块 (如电源、通信) 采用冗余设计, 温度敏感部件 (如 IMU、相机镜头) 增加温度补偿电路, 接口处添加 ESD 防护 (± 8 kV 接触放电), 确保在 $-20 \sim +60$ °C 环境下稳定工作。同时, 通过芯片级集成、选用微型元器件、简化外围电路、硬件加速处理与动态功耗调节, 实现各功能模块的高效闭环, 其轻量化与实时性表现完全契合小型无人机的作业需求, 为系统整体定位精度提供前端保障。

*本文通信作者, E-mail: zkdywjh@126.com。

2 核心模块硬件设计与实现

2.1 主控模块

本设计选用 STM32H743VGT6 作为主控芯片, 该芯片可满足图像预处理(高斯滤波、CLAHE 增强)与特征提取(改进 SIFT 算法)的算力需求。在功能覆盖与数据交互层面, 该主控模块通过多类型异构接口的精细化配置, 实现了与各类机载设备的高效适配, 构建起全维度数据采集与传输链路。MIPI-CSI 接口专为机载相机设计, 支持最高 60fps 的 1920×1080 像素图像输入, 这一帧率可确保无人机在 10 m/s 飞行速度下, 每帧图像对应的地面覆盖范围重叠率超 80%, 为后续图像配准与特征匹配提供充足的场景信息; SPI 接口挂载 MPU9250 IMU 与气压计, 100 Hz 的姿态与高度数据采集频率, 可实时补偿无人机飞行中的姿态扰动, 使定位误差减少 15% 以上^[3]; I2C 接口扩展的温湿度传感器与电源监测芯片, 能实时反馈设备工作环境参数, 更可在电源电压波动超过 $\pm 5\%$ 时触发预警; PCIe 接口连接的 5G 模块, 支持最高 50 Mbps 的无线数据上传速率, 将定位结果、关键图像数据在 1 s 内传输至地面端, 满足实时决策需求。

2.2 图像采集模块

图像采集模块是无人机“视觉感知窗口”, 其核心需求是在 500 m 距离内清晰捕捉目标细节、输出高帧率图像、适应宽温环境($-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$), 同时满足轻量化与低延迟。图像采集模块选用 1/2.3 英寸 2 000 万像素 CMOS 传感器(KS2A418), 搭配 4 mm 定焦镜头, 视场角 78° , 支持 $-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 宽温工作。传感器通过 MIPI-CSI-2 接口与 STM32H743 直连, 传输速率 5 Gbps, 每帧 12 MB 图像数据无延迟传输, 60 fps 帧率确保动态目标连续捕捉^[4]。该模块可在复杂环境下稳定输出高分辨率、高帧率图像, 为后端改进 SIFT 特征提取算法提供高质量数据源, 满足远距离定位需求。

2.3 惯性测量模块

惯性测量模块(IMU)用于实时获取无人机姿态(俯仰角、横滚角、航向角)与运动参数(加速度、角速度), 为图像特征匹配的运动补偿、定位解算的相机位姿估计提供基础数据, 其核心需求是: 静态零漂小、动态测量精度高(加速度误差, 角速度误差、采样率高^[5])。电路设计针对传感器精度进行优化。SPI 总线串联匹配电阻, 减少信号反射, 保障数据稳定传输; 集成 NTC 热敏电阻(精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), 实时监测传感器温度, 通过 ADC 输入主控后动态修正陀螺仪零漂, $-20 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$

范围内补偿误差 $\leq 0.01^{\circ}/\text{s}$; 电源端并联陶瓷电容与钽电容, 滤除高频与低频噪声, 确保传感器供电稳定。模块采用金属屏蔽壳封装, 减少电磁干扰对测量精度的影响。该 IMU 模块可提供高精度姿态数据, 静态零漂与动态误差均满足设计要求, 能够有效补偿无人机飞行中的姿态扰动(如俯仰角 $\pm 5^{\circ}$ 、航向角 $\pm 10^{\circ}/\text{s}$), 为后端 PnP 定位解算提供可靠的相机位姿基准。

2.4 无线通信模块

无线通信模块是机载端与中继端/地面端的数据“桥梁”, 其核心需求是超视距传输(视距内 $\geq 5\text{ km}$)、低延迟($\leq 100\text{ ms}$)、高稳定性(丢包率 $\leq 1\%$), 同时支持动态调制(根据信道质量切换 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM)。此模块电路设计重点提升抗干扰能力。采用 28AWG 双绞差分线连接模块与主控, 长度 $\leq 150\text{ mm}$, 表层包覆接地屏蔽层, 阻抗匹配 $50\text{ }\Omega$, 抑制振动引发的信号串扰; 电源端采用 DC-DC 芯片供电, 并联陶瓷电容与电解电容, 滤除高频纹波^[6]; 集成射频开关 SKY 13352, 实现 5G 与 Wi-Fi 双模切换, 切换时间 $\leq 10\text{ ms}$, 满足不同场景通信需求^[7]。该通信模块可在超视距场景下实现稳定数据传输, 延迟与丢包率均满足设计要求, 能够保障图像特征数据、IMU 数据的实时回传, 为后端定位解算提供及时的数据支撑。

3 系统性能测试

为全面验证无人机三维目标定位系统的性能, 搭建了一套基于 MATLAB 与 Gazebo 的联合仿真平台。该平台以 ROS (Robot Operating System) 为通信中枢, 构建全链路验证体系, 实现了从算法设计、功能验证到性能评估的完整测试流程。测试平台采用了高性能的硬件组合, 并通过对计算资源的精细化调度以确保实时性。

系统软件架构以 ROS Noetic 为通信中枢, 无缝连接 Gazebo 11 仿真环境与 MATLAB R2022a 算法平台, 构建了跨平台数据闭环。在 Ubuntu 系统中部署 ROS 主节点, Gazebo 通过插件集成 PX4 无人机模型并发布相机与 IMU 传感器数据话题; MATLAB 则通过 ROS 工具箱订阅这些话题, 将传感器数据转换为内部矩阵格式进行处理, 最终将定位结果打包为 ROS 消息发布回仿真环境, 实现了从传感数据生成到算法结果反馈的自动化联动。

为全面验证算法性能, 仿真平台构建了城市场景、山区地形和农田环境三类异构测试场景, 以模拟真实应用中的遮挡、动态干扰、弱纹理及尺度变化等挑战。同时, 传感器模型引入了逼近真实的噪声特性: 相机添加了高斯噪声与运动模糊, IMU 则配置了精确的噪声

密度与零漂参数，并通过 Gazebo 插件实现误差注入，确保了仿真数据与物理世界数据特性的一致性，为算法测试提供了高逼真度的数据源。

3.1 测试环境与方案

模拟测试环境选取平原、山地、城市三种典型场景，目标距离 200 m、350 m、500 m，风速 0~13.8 m/s(0~6 级)，光照条件涵盖晴天(照度 $\geq 10\ 000\ \text{lux}$)、阴天(1 000~5 000 lux)与黄昏($\leq 500\ \text{lux}$)。测试设备包括本文设计的无人机系统、高精度 RTK(作为真值参考)、风速仪、照度计及数据记录仪。

测试方案分为静态定位、动态跟踪与环境适应性三类：

1. 静态定位：在不同场景设置固定目标，无人机悬停采集图像，解算定位结果，对比 RTK 真值，计算 RMSE。

2. 动态跟踪：无人机沿预设航迹飞行(速度 5 m/s)，跟踪移动目标(速度 2 m/s)，记录定位结果与轨迹偏差。

3. 环境适应性：在不同风速与光照条件下测试，统计定位误差增幅、通信中断率与续航时间变化。

3.2 测试结果分析

1. 静态定位精度。不同场景与距离下静态定位精度测试结果如表 1 所示。在平原场景 500 m 距离下，定位 RMSE 3.2 m，满足 $\leq 5\ \text{m}$ 设计要求；山地场景因地形遮挡，误差略增，500 m 时 RMSE 4.5 m；城市场景受建筑多路径干扰，500 m 时 RMSE 4.8 m，仍优于同类系统(误差 10~20 m)。

表 1 不同场景与距离下静态定位精度测试结果

场景类型	本系统 RMSE	大疆 Phantom 4 RTK 典型误差
平原	3.2 m	1 cm+1 ppm
山地	4.5 m	5~8 m
城市	4.8 m	8~10 m

2. 动态跟踪性能。在动态跟踪测试中，无人机飞行速度 5 m/s，目标移动速度 2 m/s，不同距离下轨迹偏差如表 2 所示。500 m 距离内轨迹偏差 $\leq 5.2\ \text{m}$ ，平均跟踪延迟 0.42 s，满足动态目标监测需求，偏差主要源于图像传输与解算延迟，通过算法优化可进一步降低。

表 2 不同距离下轨迹偏差

目标距离 (m)	轨迹偏差 (m)	跟踪延迟 (s)
200	2.1	0.38
350	3.8	0.40
500	5.2	0.42

3. 环境适应性。环境适应性测试结果如表 3 所示。6 级风力下，定位误差增幅 16%，通信中断率 0.8%，主要因无人机姿态扰动导致图像模糊，通过 IMU 动态补偿可缓解；黄昏低光照条件下，误差增幅 19%，通信无明显影响，可通过图像增强算法提升弱光成像质量；-20℃低温环境下，续航时间 2.1 h，衰减 9%，满足寒冷地区作业需求。

表 3 环境适应性测试结果

环境条件	定位误差增幅 (%)	通信中断率 (%)	续航时间 (h)
5 级无风晴天	0	0	2.3
6 级风晴天	16	0.8	2.3
无风黄昏	19	0	2.3
-20℃无风晴天	12	0	2.1

4 结论

本文设计了一套无人机三维目标定位系统机载端硬件，通过各个模块的协同优化，解决当前民用无人机机载设备高精度与轻量化冲突、复杂环境适应性差、实时性与低功耗失衡三大核心问题，系统通过多场景测试验证，定位精度、续航与环境适应性均优于同类产品，可应用于应急救援、电力巡检等领域。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 吴桐,李湛,郑晓龙等.基于纯方位测量信息的多无人机协同目标跟踪[J].飞控与探测,2024,07(04):17-25.
- [3] 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.
- [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] 高鑫阳.基于无人机视觉信息的移动目标跟踪技术研究[D].北京:北京化工大学,2025.
- [6] 李华耀,钟小勇,杨智能,等.结合孪生网络和 Transformer 的轻量级无人机目标跟踪算法[J].电光与控制,2025,32(06):31-37.
- [7] 刘芳,孙亚楠.基于自适应融合网络的无人机目标跟踪算法[J].航空学报,2022,43(07):366-376.