

小型固定翼无人机低空安全防撞技术

结题验收答辩

项目类别 : 创新训练项目
指导教师 : 吕洋
项目负责人 : 倪鑫哲
汇报答辩 : 孙浩然

应用背景

小型固定翼无人机凭借其长航时、高效率的特点，在农业植保、军事侦察、地理测绘等低空场景中应用广泛。然而，在高速飞行状态下 ($>15\text{m/s}$)，无人机对动态障碍物的感知与规避能力不足，碰撞风险显著增加。

技术瓶颈

传统避障方法（如动态窗口法、VFH）依赖高精度环境建模和实时路径优化，存在响应延迟 ($>200\text{ms}$)、算力需求高（需GPU加速）及传感器盲区（如电线、玻璃等低反射率障碍）等问题，难以满足复杂低空环境的安全需求。

项目意义

本项目提出一种**软硬件协同**的低空安全规避系统，通过多传感器融合（毫米波雷达+IMU）和轻量化轨迹优化算法，实现无人机在100~250m低空环境中的实时避障（响应时间 $<50\text{ms}$ ）与自主安全飞行，为城市物流、应急救援等场景提供关键技术支撑。

适用于小型固定翼无人机的低空防撞系统

总体方案

感知层：采用4D毫米波雷达（ARS548）与高精度IMU融合，解决单一视觉传感器在弱光、雾霾下的失效问题，感知范围覆盖前方 120° 、距离50m内的障碍物。

规划层：基于SLAM实时建图与B样条轨迹优化，生成动态可行的避障路径，满足固定翼无人机的最小转弯半径约束（ $\leq 30\text{m}$ ）。

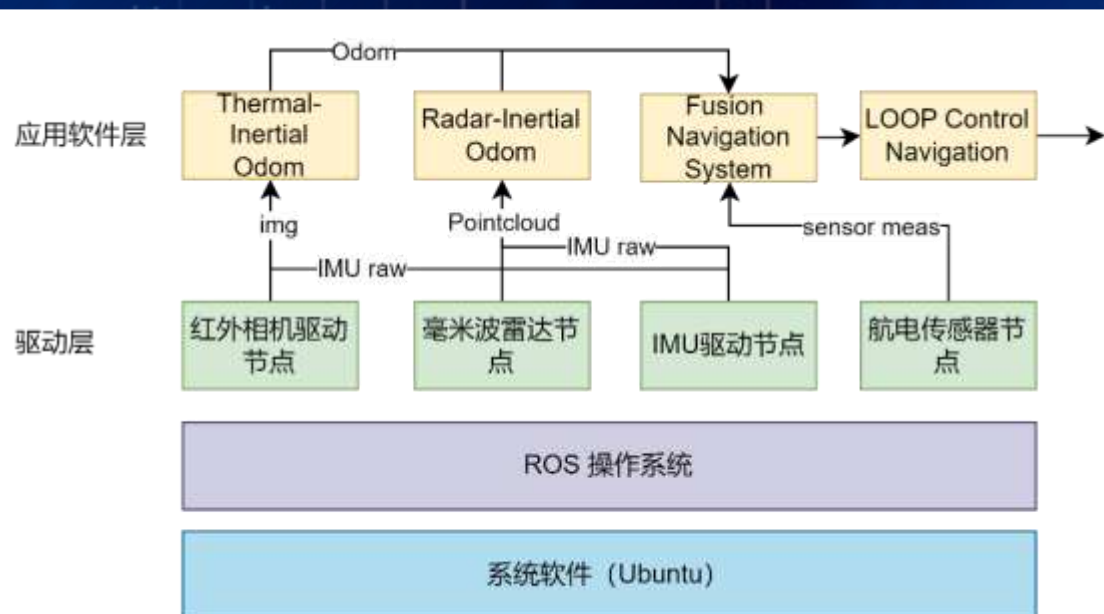
控制层：结合运动基元库的应急规避策略，通过速度指令与偏航角控制实现毫秒级反应，避免传统方法因在线求解导致的死锁问题。

系统总体方案分**硬件平台**集成方案和**功能算法软件**集成方案

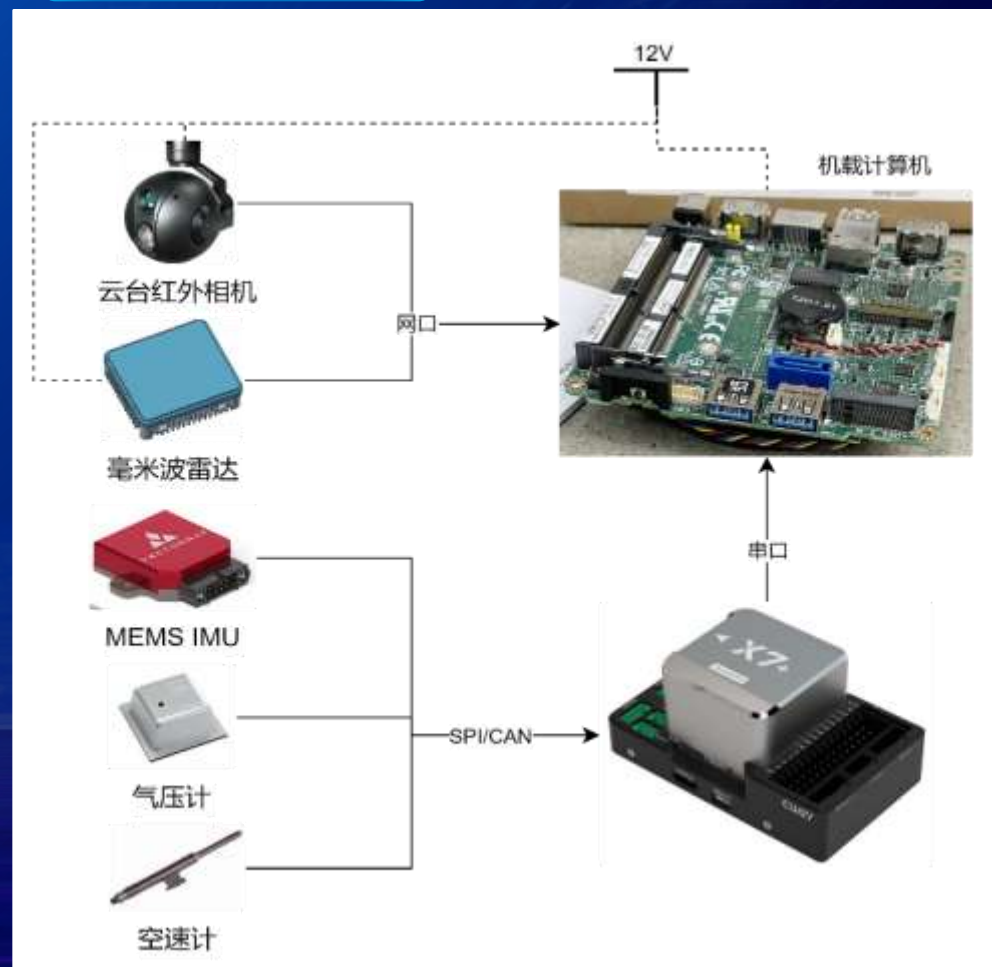
系统软件架构

输出：速度指令 + 偏航角控制

核心：障碍物建模模块 + 实时规避模块



系统硬件连接

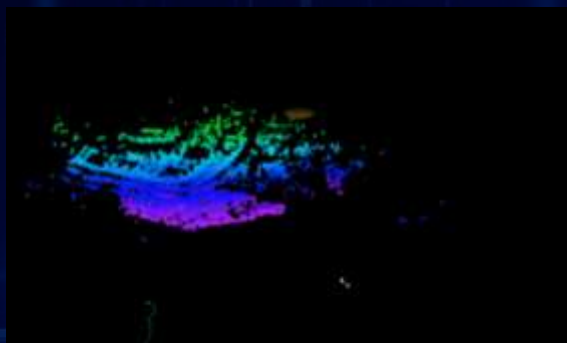
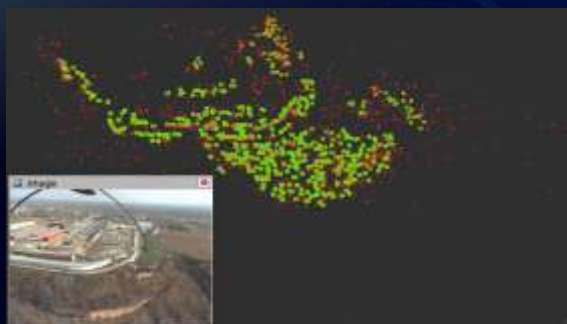
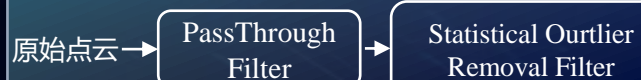


关键技术1 障碍物建模



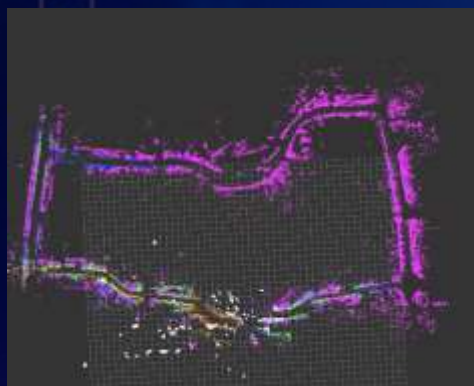
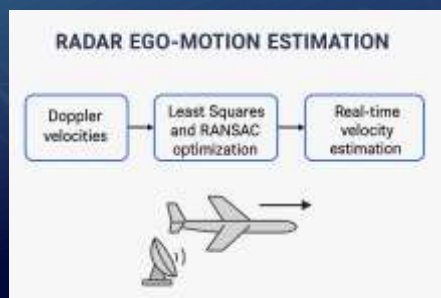
西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

点云预处理



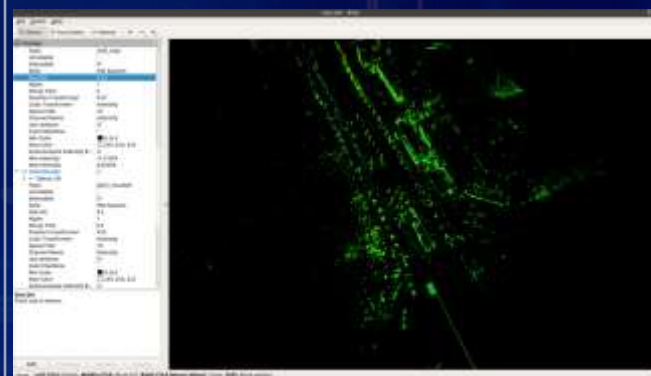
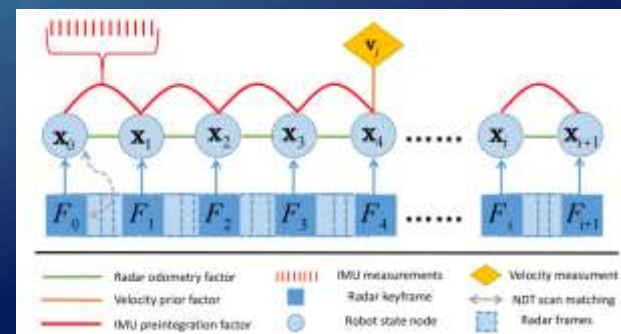
采用连通性与聚类算法去除异常值，使用鲁棒平滑算法保留结构特征。

雷达自运动估计



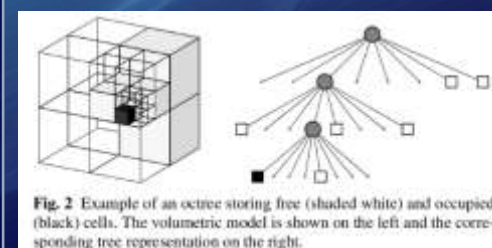
利用多普勒速度，通过最小二乘与RANSAC优化实时估计飞行器速度。

多传感器融合SLAM



融合IMU与雷达，构建因子图优化结构，实现高频率姿态估计与空间建图。

地图格式优化



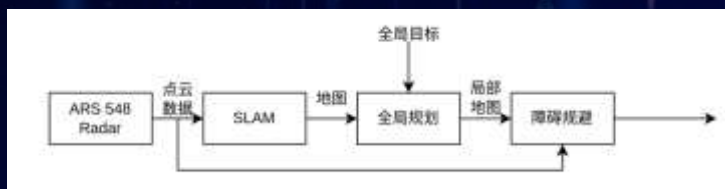
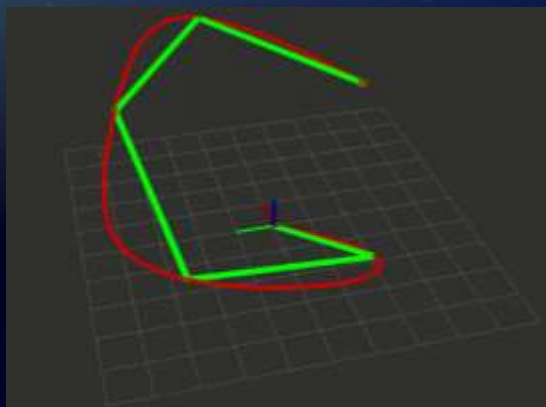
采用Octomap实现八叉树压缩建图，提升导航效率与地图利用率。

关键技术2 路径规避与运动基元



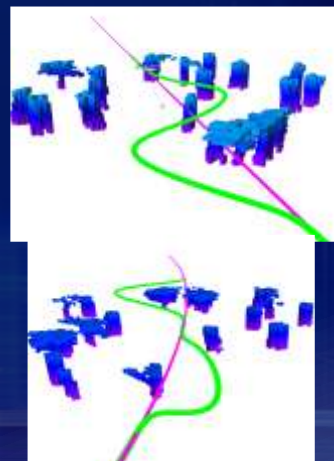
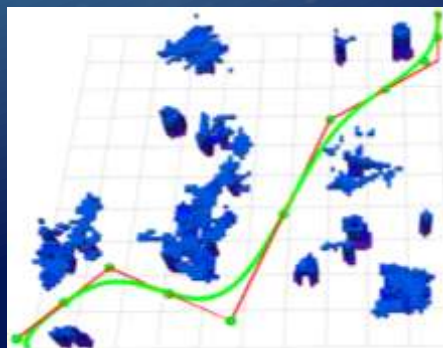
西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

全局路径规划



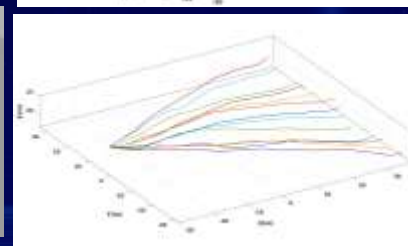
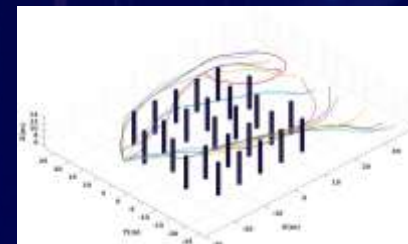
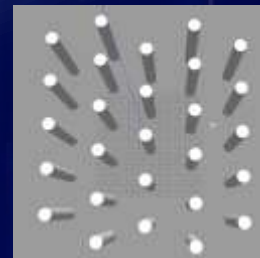
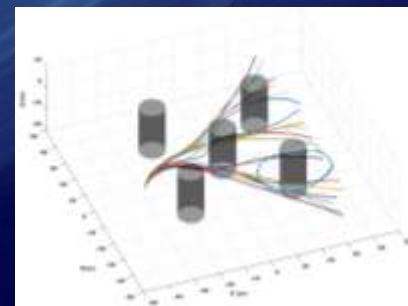
通过多项式轨迹规划，优化轨迹平滑度与物理可行性（最小snap）。

局部动态重规划



实时RRT*搜索局部路径，结合均匀B样条拟合，避免静态与新识别障碍。

应急规避策略



构建115个预定义运动基元，涵盖爬升、转弯、螺旋等常见操作，适配不同场景与飞行约束。

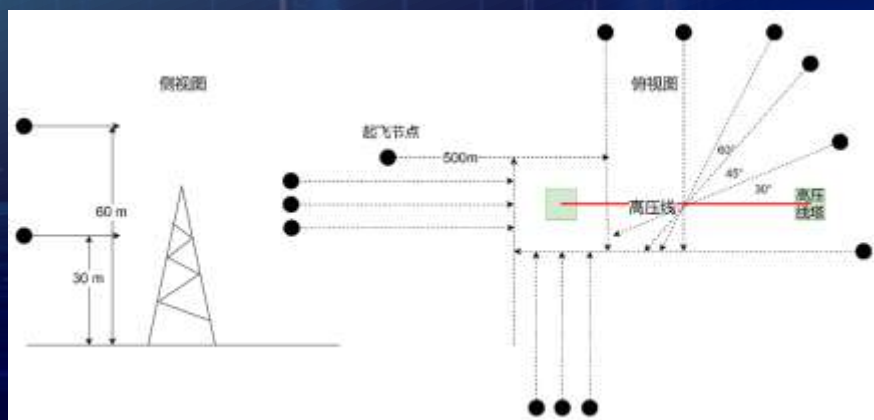
Inno3000固定翼无人机



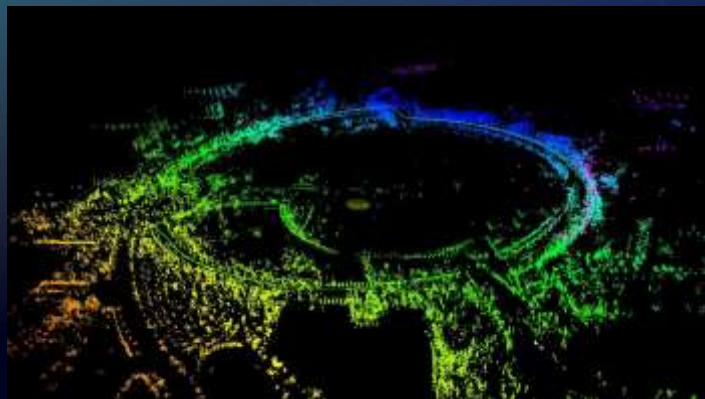
DJI M300旋翼无人机



低空稀疏与低空稠密场景

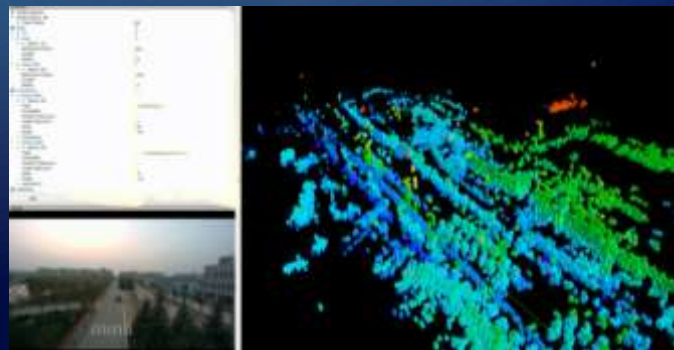


SLAM可视化结果



回环检测精确，地图连续性良好

点云建图



点云建图与八叉树地图构建效果显著，导航有效区域清晰

场景感知覆盖

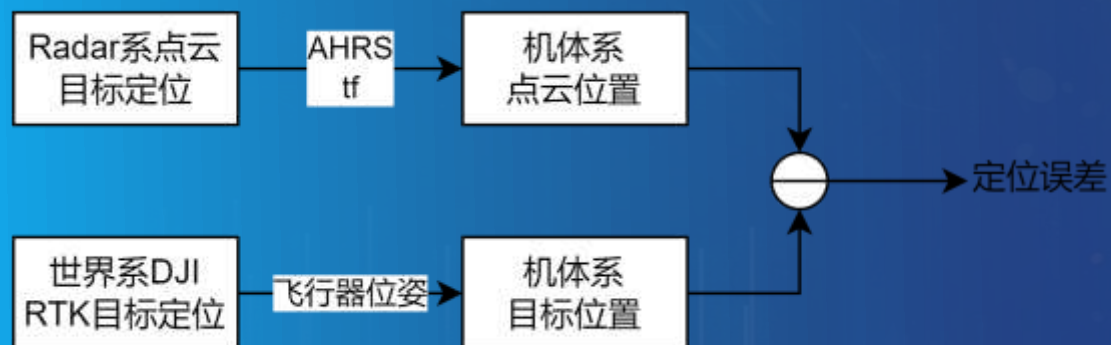


场景感知覆盖完整，毫米波雷达可远距离检测高压线等典型障碍

性能指标与验证分析

实验1. 障碍物探测定位 感知结果分析

定位误差



探测距离:

- 小目标>点云簇3
- 建筑>点云簇 20

感知延迟 $<0.05(\text{点云处理}) + 0.2(\text{地图构建}) + 0.03(\text{碰撞检测}) = 0.28s < 0.5m$

| 场景 | | 有效检测距离(m) | 定位精度(m) | 场景虚警 | 场景漏检(200米内) |
|-----|-----|-----------|---------|-------|-------------|
| 高压线 | 场景1 | 192 | 3.50 | 0.27% | 1.2% |
| | 场景2 | 268 | 2.25 | 0.11% | 0.26% |
| | 场景3 | 90° 221 | 4.67 | 0.18% | 0.1% |
| | | 60° 168 | 4.32 | 0.14% | 2.5% |
| | | 35° 40 | 4.81 | 0.5% | 60% |
| 建筑 | 1 | 245 | 1.84 | <0.2% | <0.5% |
| | 2 | 228 | 1.76 | <0.2% | <0.5% |
| | 3 | 267 | 1.92 | <0.2% | <0.5% |
| | 4 | 241 | 2.18 | <0.2% | <0.5% |
| | 5 | 199 | 2.24 | <0.2% | <0.5% |
| 树木 | 1 | >250 | 1.75 | 0.22% | <0.78% |
| | 2 | >250 | 1.74 | 0.27% | <0.70% |

性能指标与验证分析



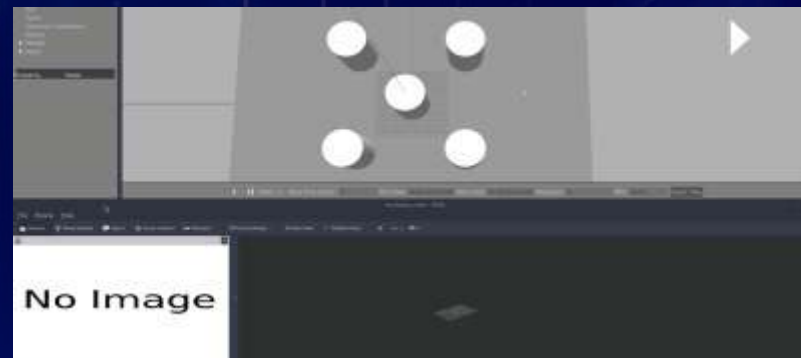
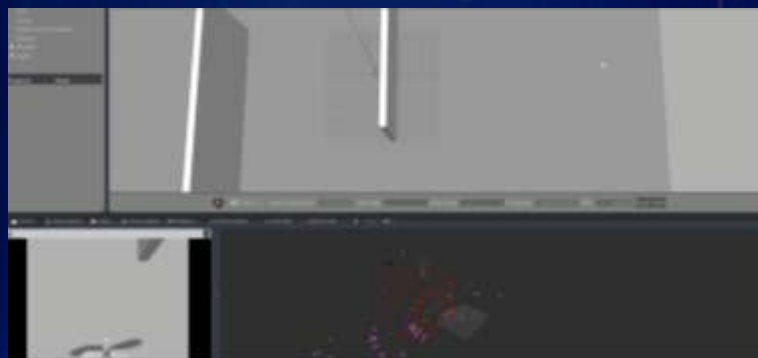
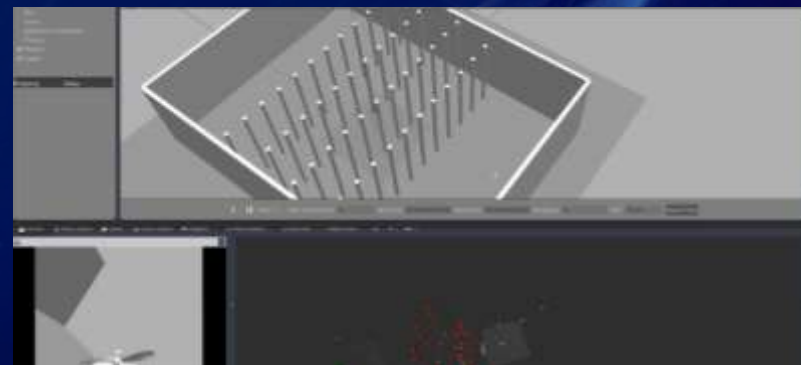
西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

实验2.实时避障运动规划

基于感知约束的路径规划研究

系统验证了:

- 不同尺度(0.01 ~ 25m)
- 不同密度 (5% ~ 15%)
- 不同速度 (15m/s ~ 25m/s)
- 不同传感器配置 (视场 70° ~ 90° , 探测距离50~ 150m) 下的障碍物规避成功率。



证明在飞机巡航速度 $<23\text{m/s}$ ，基于探测视场 70° ，探测距离 $>60\text{m}$ 的情况下，实现障碍物密度 $\leq 10\%$ ，尺度 $>0.1\text{m}$ 场景的100% 碰撞规避

性能指标与验证分析



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

实验2. 实时避障运动规划

复杂城市场景，包含建筑、
高压线塔、树木等



验证不同续航速度（15, 17,
19, 21m/s）下的障碍规避能力
在随机给定目标点情况下，避
障成功率100%。



性能指标与验证分析



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

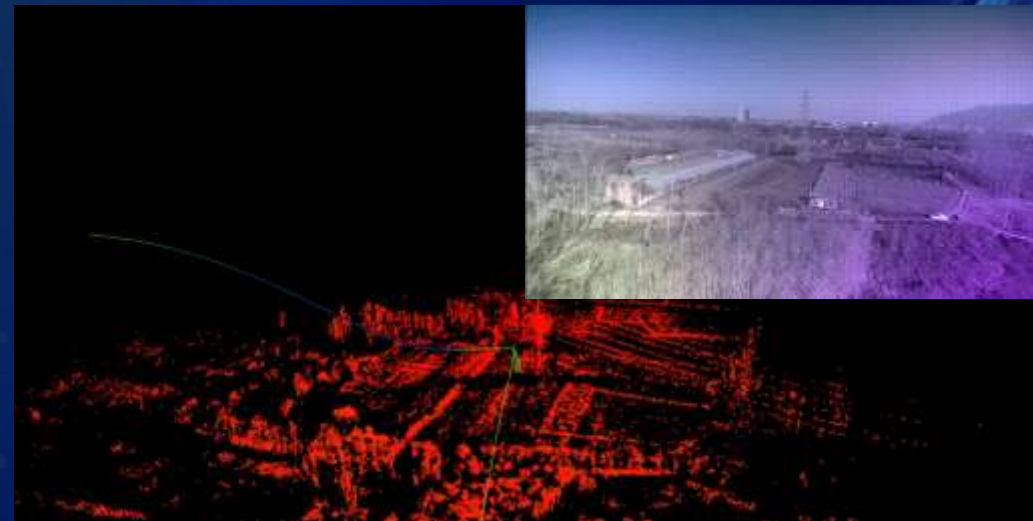
实验2. 实时避障运动规划

基于实时感知数据构建地图的避障路径规划验证

低空建筑



实现连续帧地图上的有效全局路径规划，更新频率5Hz，延迟小于0.2s，典型目标规避成功率>98.5%，200米内成功率100%.



高压线塔 (间隔<100m)

性能指标与验证分析

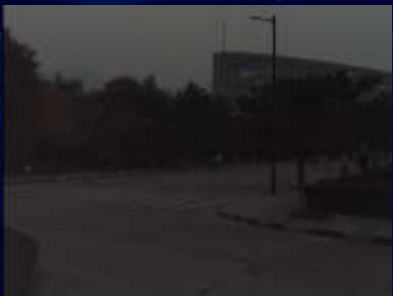
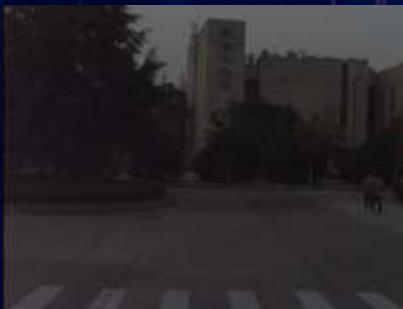
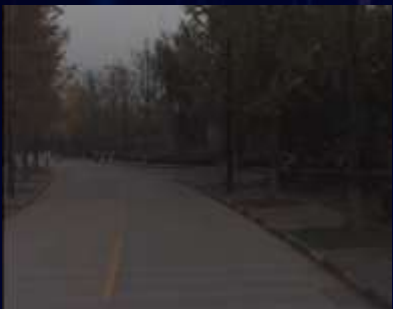


西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

实验3. 数据采集

车载导航数据:

- GPS/INS, 毫米波雷达, RTK GPS、事件相机
- 场景包含公路、校园等
- 共4组数据 150G



旋翼无人机数据:

- GPS/INS, 毫米波雷达, RTK GPS、事件相机
- 场景包含低空建筑、丛林高压线等

Scene1 (32+29+30G)



Scene2 (34+26G)



固定翼无人机数据:

- GPS/INS, 毫米波雷达, 机载导航信息
- 场景包含建筑、高压线等

Scene1 (40G+42G+58G)



Scene2 (16G+39G)



项目总结



| 序号 | 名称 | 主要指标 | 指标完成情况 |
|----|--------------------|---|---|
| 1 | 面向复杂低空环境的避障方案研究 | 1.满足无人机超低空飞行避障需求：在飞行速度20-50m/s，地表飞行高度15-30m，典型多障碍物复杂环境障碍规避； 2.平台安装集成条件：重量<1 kg，体积< 20cm X 20 cm X 20 cm，捷联安装。 3.主要机载计算单元： NUC / Jetson Xavier NX / Xavier AGX | 1. 完成低空环境避障方案研究，形成基于毫米波雷达的低空固定翼规避方案 2. 基于ARS548+NUC平台飞行器捷联安装，体积、重量达到安装要求。 |
| 2 | 面向运动规划约束的障碍物探测定位算法 | 具备对典型低空威胁障碍物的有效检测能力 1.定位误差小于空间距离的10%。 2.典型障碍物的碰撞检测告警延迟<0.5s； | 完成，见实验验证1. |
| 3 | 实时避障运动规划算法 | 1.满足障碍密集场景下的规避需求 a)山区场景下：信号线、塔（多个） 间隔100m； b)城区场景：楼房等障碍密度10%以内场景。 2.最小分离距离 10m， 10%障碍密度场景下成功率100%。 3.实现在线实时规避路径规划，规划响应<0.5s | 完成，见实验验证2. |
| 4 | 机载毫米波雷达集成 | 1.实现数据的点云、目标探测数据的收发、显示、传感器管理 2.实现障碍密集场景下的感知需求 a) 实现点云、目标级别的障碍物有效检测，有效检测距离200m， b) 数据处理更新频率>10Hz. 1. 实现毫米波雷达的机载系统集成（通讯、电气、机载系统安装等） 2. 实现毫米波雷达基于低空无人机系统的测试分析 | 1. 完成毫米波雷达数据的收发、显示、管理等 2. 实现了点云的有效检测，距离大于200m，更新频率20Hz 1. 完成毫米波雷达的机载系统集成（通讯、电气、安装） 2. 完成测试分析 |
| 5 | 实验验证 | 1.障碍物探测定位算法实验：搭载感知系统进行机载带飞实验，在应用场景下对多类典型障碍物（楼宇、高压线塔、高压线、树木），从不同入场角度、巡航飞行速度和飞行高度穿越观测，验证障碍物探测定位算法的准确性，确保无漏检或虚检现象； 2.实时避障运动规划算法：考虑飞行器的动力学特性和障碍物表征形式搭建基于Gazebo/ROS的仿真环境，模拟不同障碍密度的场景，对不同巡航飞行速度条件下实时避障运动规划算法的表现进行验证。 | 见实验验证。 |



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

小型固定翼无人机低空安全防撞技术 结题验收答辩

孙浩然
西北工业大学
自动化学院
2025/05/22