

基于多传感器融合的四旋翼室内自主飞行系统研究

刘顺财¹
LIU Shunca

摘要

为提升四旋翼飞行器的飞行精确度,对硬件系统进行了全面升级。具体而言,将此前光流模块替换为了高性能的 RK3588S 计算机与 N10 激光雷达组合。实验表明,改进后的四旋翼飞行器的飞行精度实现了质的飞跃,相较于光流传感器误差值从 1.014 4 m 缩小到 0.129 2 m,相较于更换前的飞行精度,得到了较大的提升。同时,在四旋翼飞行器进行返回定点降落时,其精准度也得到了显著提升,从 2.394 m 降低到 0.054 m,从而极大地增强了其在室内环境中的飞行稳定性和可靠性。此次硬件升级为四旋翼飞行器的应用和发展注入了新的活力,为其在室内飞行领域的应用开辟了更广阔的空间。

关键词

多传感器融合; 动态建图; SLAM; 激光雷达

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.041

0 引言

目前无人机室外飞行技术已经日趋成熟,但在室内未知环境中,由于 GPS 信号容易受到干扰,无法提供准确的定位信息,导致无人机室内飞行受到了限制。因此设计一种基于多传感器融合的四旋翼室内飞行系统具有可行性^[1-2]。该系统利用激光雷达和 RK3588S 完成 SLAM 动态建图。使用改进后的四旋翼完成室内定位与建图,实现四旋翼飞行器室内自主飞行。

1 硬件模型

在室内高精度要求的场地中,发现基于单片机+光流传感器的四旋翼飞行器存在显著的误差问题。这主要是由于该传感器在室内定点飞行时,固有的漂移特性以及光照影响导致其定位精度大打折扣,与预设的定点位置存在较大的偏差。这种偏差不仅影响了飞行器的稳定性,也限制了其在室内高精度任务中的应用潜力。鉴于这一情况,设计一款多传感器融合的四旋翼室内飞行系统显得尤为重要。通过整合不同传感器的优势,可以有效弥补单一传感器的不足,从而提高飞行器的定位精度和稳定性,确保其在室内复杂环境中也能实现精准飞行。

1.1 改进的系统框架图

为了显著增强四旋翼飞行器的飞行精度,对硬件系统实施了升级。首先,摒弃了原先的光流传感器 LC302^[3-4],

其检测精度约为 0.1 m,转而引入了 RK3588S 高性能计算机与 N10 二维激光雷达的组合。N10 激光雷达凭借其高达 0.01 m 的检测精度,为飞行器提供了更为精确的定位信息,从而显著提升了飞行器的飞行精度。在硬件升级的同时,在 RK3588S 计算机上安装了先进的 ROS 框架,并编写了 SLAM 建图程序。ROS 程序选用了 ROS 开源社区中备受认可的 GMapping 算法^[5-6],该算法能够高效融合移动机器人的里程计数据与激光雷达数据,绘制出精准的二维栅格地图。通过 ROS 的导航与 SLAM 动态建图功能^[7-8],为飞行器提供了一个实时更新的动态地图,进一步增强了其环境感知与自主导航能力。最终实现了 TOFSense、OpenMv4 与 N10 激光等多传感器融合^[9],构建了一个功能强大的四旋翼室内飞行系统。这一多传感器融合策略提升了飞行器的飞行精度,还使其在复杂多变的室内环境中具备了更强的适应性和稳定性。改进系统框架如图 1 所示。

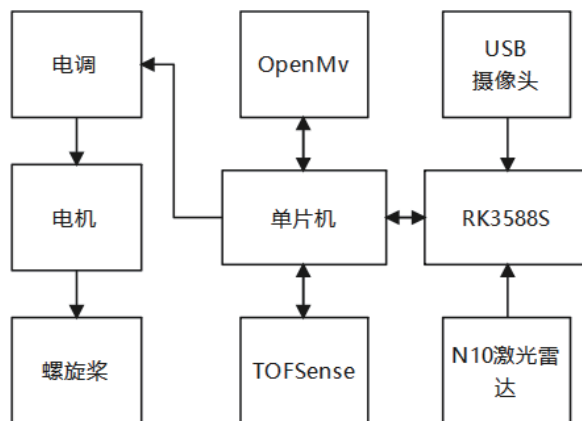


图 1 改进系统框架图

1. 福州理工学院电子工程学院 福建福州 350506

[基金项目] 2023 年度福建省中青年教育科研项目(科技类)-重点项目(JZ230068)

1.2 改进硬件模块

传统的 LC302 光流传感器设计简洁, 无需复杂配置, 上电即能迅速输出数据。该光流模块集成了光流主板与高精度光流摄像头, 其核心在于自主研发的光流芯片, 展现了卓越的技术实力。光流模块专为无人机水平位移监测而打造, 能够实时捕捉飞行过程中的水平移动信息, 并将这些数据精准传输至飞控系统。结合高度数据, 飞控能够综合判断, 有效控制无人机实现自动悬停。在无 GPS 信号的复杂环境中, 光流模块凭借摄像头拍摄的画面, 实时分析图像数据, 通过内置的高效能光流算法处理, 最终通过 UART 接口将精确的定位信息反馈给飞控, 确保无人机能够在水平方向上精准移动, 实现稳定悬停, 展现了其在无人机定位领域的卓越性能。

但是在实验过程中, LC302 光流传感器存在几方面不足。首先, 其定位精度和稳定性在极端条件下, 如光线剧烈变化或环境噪声大时, 可能受到影响, 导致无人机悬停或导航出现偏差。其次, 该传感器对环境条件敏感, 光线不足或纹理单一会影响其捕捉图像数据的能力, 进而降低定位精度和可靠性。此外, 长期使用 LC302 需要进行定期维护和校准, 以确保其性能, 这无疑增加了无人机的运维成本和时间成本。这些不足限制了 LC302 在某些复杂环境下的应用。

为了避免光线、环境以及定期校正的影响, 在系统中引入了 RK3588S 高性能计算机与 N10 二维激光雷达的组合。RK3588S 计算机可以安装 Ubuntu 系统, 在 Ubuntu 系统中安装 ROS 框架, 使用 Python 或者 C++ 进行编程, 在 ROS 程序中可以很好地融合 N10 二维激光雷达采集的数据。相较于 N10 激光雷达, LC302 光流传感器在定位精度与建图能力上显得有所不足。N10 激光雷达凭借先进的 TOF 测距技术和每秒 4 500 次的高速激光测距采样, 能在 25 m 范围内实现高精度建图, 而 LC302 在复杂光线或纹理单一环境中, 定位精度和稳定性易受影响, 难以达到如此高精度的平面点云地图信息。此外, N10 还具备强光抗干扰能力和快速建图的优势, 这些方面 LC302 均难以媲美, 限制了其在需要高精度定位与导航的复杂场景中的应用。

2 软件模型

系统测试是模拟 2021 年全国大学生电子设计大赛设计中植保飞行器^[10] 仿真环境, 能够对指定田块完成“撒药”作业来设计的, 场地如图 2 所示。系统的软件方面设计使用 C 和 Python 语言进行编程, 在单片机核心板中烧写进以编译好的代码进行运行, 在 RK3588S 中使用 Python 编写 SLAM 动态建图代码并运行。

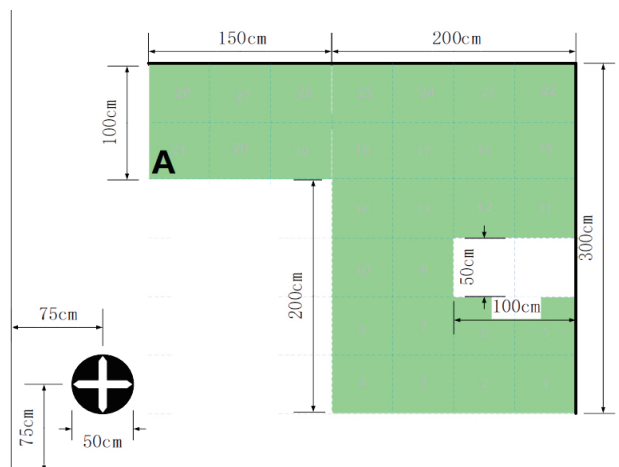


图 2 场地飞行图

2.1 巡航场地建模

为了更好地通过 ROS 编写程序实现四旋翼导航与 SLAM 动态建图, 需要对场地进行建模, 因为每个绿色方块尺寸都是 50 cm, 根据图 2 模拟场地尺寸分割设置巡航点在“十”字起飞点为原点 0(0,0), 计算得到每个巡航点为 1(7×50, 0×50)、2(6×50, 0×50)、3(5×50, 0×50)、4(4×50, 0×50)、5(7×50, 1×50)、6(7×50, 1×50)、7(7×50, 1×50)、8(7×50, 1×50)、No(7×50, 2×50)、No(6×50, 2×50)、9(5×50, 2×50)、10(4×50, 2×50)、11(7×50, 3×50)、12(6×50, 3×50)、13(5×50, 3×50)、14(4×50, 3×50)、15(7×50, 4×50)、16(6×50, 4×50)、17(5×50, 4×50)、18(4×50, 4×50)、19(3×50, 4×50)、20(2×50, 4×50)、21(1×50, 4×50)、22(7×50, 5×50)、23(6×50, 5×50)、24(8×50, 5×50)、25(4×50, 5×50)、26(3×50, 5×50)、27(2×50, 5×50)、28(1×50, 5×50), 总计 31 个点。因为每个巡航点都是 $n \times 50$, 所以根据特征提取不同位置的坐标值, 生成巡航点二维数组 `const int16_t cruise_point_tab[2][32] = {{0, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 4, 5, 6, 7, 7, 6, 5, 4, 4, 5, 6, 7, 7, 6, 5, 4, 4, 5, 6, 7, 7, 6, 5, 4, 0}, {0, 4, 5, 5, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0}}`, 至此建模完成。

2.2 软件流程图

在无人机送货系统中, 整个程序流程可以分为几个关键步骤, 共同实现快速、高效的“撒药”任务。

首先, 程序开始时进行初始化, 对无人机各项传感器以及单片机底层硬件进行校准, 确保数据准确性。完成初始化后, 无人机等待起飞按键指令。当接收到起飞指令后, 发布起始点巡航点 0(0, 0, height)。无人机起飞至预定巡航点高度 height, 判断是否在巡航点 0(0, 0, height) 上方, 是则发布起飞巡航点 21(1, 4, height)。

接下来无人机根据设定巡航点,依次发布巡航点 28(1, 5, height) → 27(2, 5, height) → 20(2, 4, height) → 19(3, 4, height) → 26(3, 5, height) → 25(4, 5, height) → 24(5, 5, height) → 23(6, 5, height) → 22(7, 5, height) → 15(7, 4, height) → 16(6, 4, height) → 17(6, 4, height) → 17(5, 4, height) → 18(4, 4, height) → 14(4, 3, height) → 13(5, 3, height) → 12(6, 3, height) → 11(7, 3, height) → No(7, 2, height) → No(6, 2, height) → 9(5, 2, height) → 10(4, 2, height) → 8(4, 1, height) → 7(5, 1, height) → 6(6, 1, height) → 7(7, 1, height) → 1(7, 0, height) → 2(6, 0, height) → 3(5, 0, height) → 4(4, 0, height) → 0(0, 0, height)。同时依次飞至上述巡航点高度 height 正上方。在位于巡航点上方时,无人机根据下面的 OpenMv4 摄像头判断下面是否有绿色方块,则通过发出激光笔指示灯操作完成“撒药”任务。

在全部“撒药”任务都完成后,无人机发布返回起飞巡航点位置信息,无人机飞至起飞巡航点。当无人机返回到起飞点上方时,执行定点降落操作,确保降落的准确性和稳定性。

整个程序流程中,无人机需要不断地检测自身位置发布下一个巡航点目标位置信息,实时调整飞行状态以适应任务要求。在“撒药”任务过程中,无人机需保持稳定的悬停,确保“撒药”任务操作的顺利进行。通过上述流程,无人机可在规定时间内完成“撒药”任务。最后无人机飞至起飞巡航点上方并降落结束本次任务。系统软件工作具体流程图如图 3 所示。

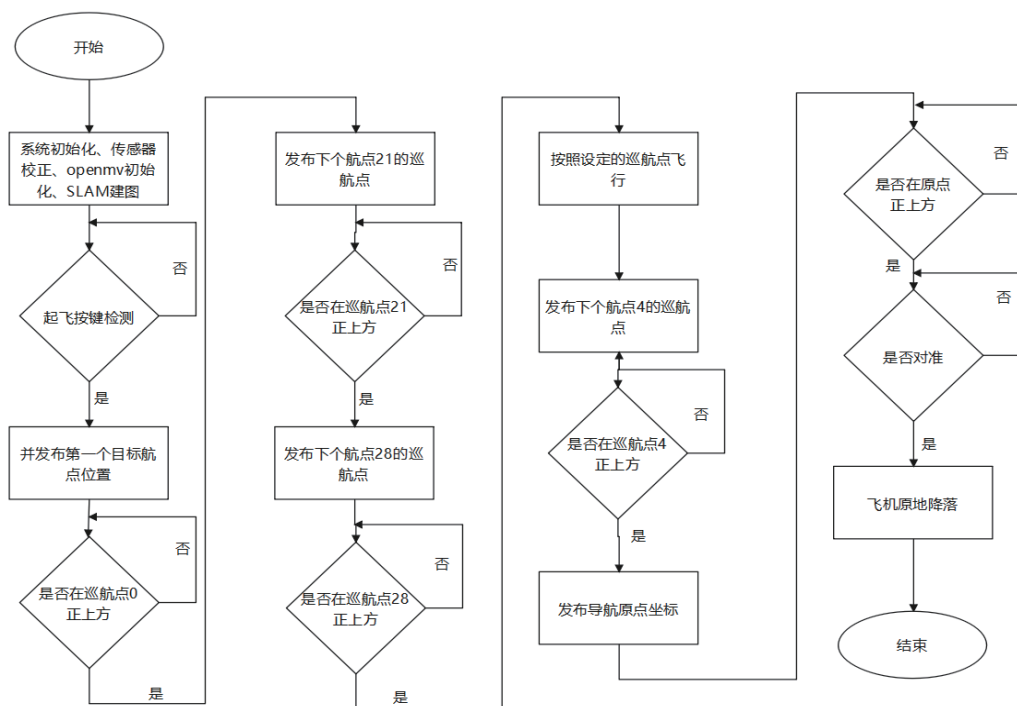


图3 系统软件工作具体流程图

3 实验分析

3.1 实验数据

基于多传感器融合的四旋翼室内自主飞行系统专注于研究在精确遍历预设的 32 个巡航点时的高效飞行策略。通过飞机实验记录并对比了 LC302 传感器 +OpenMv4 与激光雷达 +ROS+OpenMv4 融合下不同的飞行数据,展现了多传感器融合优越性。在测试阶段,飞行系统至每个巡航点上方,在飞机悬停后,能够记录指示出激光笔操作点的位置与测试场地当前巡航点的中心位置的偏离值。这一过程不仅验证了基于雷达下的系统对复杂室内环境的适应能力和高精度定位技术,还展示了其在自主导航与动态环境感知方面的卓越性能,为四旋翼无人机在室内环境中的广泛应用奠定了坚实基础。

该数据集旨在测试飞机在不同的硬件下检测环境数据对比,通过使用激光雷达 +ROS+OpenMv4 融合替换了光流传感器 +OpenMv4。这有助于研究人员开发更有效地使用多传感器融合技术,以适应复杂多变的实际交通环境。

3.2 实验结果分析

在系统中使用激光雷达 +ROS+OpenMv4 动态建图模型和光流传感器 +OpenMv4 模型进行验证比较。因为 32 个巡航点数据量太大,所以在实验过程中选取了具有代表性的实验巡航点,包括起飞巡航点原点 0、巡航点 21、巡航点 10、巡航点 4 和返回巡航点 0。为了确保测试结果的可靠性和一致性,

避免单次测试可能存在的特殊性或偶然性,进行 5 次测试。测试单位为 m。实验结果如表 1 所示。从表 1 的实验结果,可以清晰地观察到 N10 激光雷达 +ROS+OpenMv4 在飞行过程中数据测试上表现出色。相比 LC302+OpenMv4 传感器下总的误差平均值指标上为 1.014 4 m,而 N10 激光雷达 +ROS+OpenMv4 多传感器融合在总的误差平均值指标上为 0.129 2 m。这意味着 N10 激光雷达 +ROS+OpenMv4 硬件系统在飞行过程中距离误差方面具有更好的性能。

表 1 LC302+OpenMv4 与多传感器融合实验结果表

传感器	次数	起飞巡航点 原点	巡航点 21	巡航点 10	巡航点 4	返回巡航点 原点	返回巡航点 原点平均值	单次误差 平均值	总的误差 平均值
LC302 + OpenMv4	1	0.21	0.4	0.81	1.03	2.33		0.956	
	2	0.24	0.52	0.82	1.06	2.47		1.022	
	3	0.22	0.46	0.75	1.08	2.55	2.394	1.012	1.014 4
	4	0.35	0.56	0.83	1.12	2.84		1.140	
	5	0.31	0.58	0.88	1.16	1.78		0.942	
N10 激光雷达 + ROS + OpenMv4	1	0.05	0.08	0.20	0.22	0.06		0.122	
	2	0.06	0.10	0.23	0.24	0.07		0.140	
	3	0.05	0.08	0.21	0.22	0.05	0.054	0.122	0.129 2
	4	0.06	0.09	0.22	0.24	0.04		0.130	
	5	0.03	0.10	0.23	0.25	0.05		0.132	

从表 1 的实验结果，可以清晰地观察到 N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 在飞行过程中的数据测试上，在单次误差平均值（0.054 m）比 LC302+OpenMv4 硬件系统单次误差平均值低（2.394 m）。实验表明 N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 在多传感器融合的较好。

从表 1 的实验结果可以清晰地观察到，N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 在飞行过程中的数据测试上，在返回巡航点原点的误差平均值为 (0.06+0.07+0.05+0.04+0.05)/5=0.054 m。相比 LC302+OpenMv4 传感器下，返回巡航点的平均值为 (2.33+2.47+2.55+2.84+1.78)/5=2.394 m。原因是 OpenMv4 摄像头可以较好地修正，导致误差变小。相比 LC302+OpenMv4 传感器融合系统下，误差值越来越大，导致最终难以返回巡航点。实验表明 N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 在多传感器融合下，系统可以很好地返回巡航点，而 LC302+OpenMv4 传感器下返回巡航点误差较大。

综合比较总的误差平均值和单次误差平均值、返回巡航点原点 3 个指标，可以发现 N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 多传感器融合硬件系统性能上比 LC302+OpenMv4 传感器硬件系统上都有所提升。

4 结语

实验中把 LC302 + OpenMv4 更换成 N10 激光雷达+ROS+OpenMv4 硬件，在 RK3588S 编写 SLAM 动态建图代码并运行，SLAM 建图过程中本身就会实时发布地图信息，SLAM 已经发布了话题为 /map 的地图消息，且导航需要定位模块，SLAM 本身也是可以实现定位的，从而提升飞行过程中总的误差平均值和单次误差平均值、返回巡航点原点三个指标的飞行精度。

参考文献：

[1] 王国庆. 多传感器融合的四旋翼无人机室内自主飞行系统的研究与实现 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.

[2] 王典. 基于多传感器融合的无人机定位方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2024.

[3] 潘美琴. 基于深度学习的四轴无人机飞行姿态估计方法 [J]. 广州航海学院学报, 2023, 31(4): 48-54.

[4] 刘砚菊, 李景泉, 冯迎宾. 基于多级 MEKF 的微型无人机状态估计 [J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(7): 36-43.

[5] 勒伍杨, 喻俊松, 万生鹏. 基于 ROS 的激光 SLAM 地图优化技术研究 [J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2024, 38(4): 95-102.

[6] 贺顿. 基于 2D 激光雷达的室内移动机器人的建图和导航技术研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2024.

[7] 马啸龙. 面向送餐的移动机器人的 SLAM 与路径规划方法研究及应用 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.

[8] 勒伍杨, 喻俊松, 万生鹏. 基于 ROS 的激光 SLAM 地图优化技术研究 [J]. 南昌航空大学学报 (自然科学版), 2024, 38(4): 95-102.

[9] 张军. 多传感器融合算法的四旋翼无人机室内定位技术研究 [J]. 物联网技术, 2025, 15(1): 67-71.

[10] 胥鑫焱, 李世豪, 董丁铭, 等. 基于 STM32F407 的植保飞行器设计研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(11): 134-137.

【作者简介】

刘顺财（1986—），男，福建漳州人，硕士，副教授，研究方向：嵌入式。

（收稿日期：2025-02-05 修回日期：2025-06-06）