

基于多传感器融合的无人机精准自主飞行控制方法

王大帅¹ LIU Xiaoguang² 李伟¹ 张俊雄¹ 袁挺¹ 张春龙¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 加利福尼亚大学戴维斯分校工程学院, 戴维斯 CA 95616)

摘要:为解决我国植保无人机实际作业过程中普遍存在的由空间位置定位精度不足和飞行参数不稳定造成的雾滴分布不均匀、重喷、漏喷等问题,以多旋翼无人机系统为平台,基于 ROS(Robot operating system)和 MAVROS 构建了由协同计算机与开源飞行控制器组成的二级控制系统,结合基于 RTK-GPS 的绝对位置测量和基于激光雷达的相对距离探测方法,融合外部传感器与飞行控制器板载传感器数据对无人机状态估计进行修正,提高了无人机飞行参数和飞行轨迹的稳定性。为进一步提高植保无人机自主作业性能,基于 ROS 设计了飞行任务管理系统,实现了无人机精准自主任务点之间的直线飞行。真实飞行试验结果表明:无人机自主飞行过程中水平方向平均定位误差为 0.145 m,垂直方向平均定位误差为 0.053 m。

关键词: 无人机; 自主飞行; 信息融合; ROS

中图分类号: S252⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0098-09

Precision Autonomous Flight Control Method of UAV Based on Multi-sensor Integration

WANG Dashuai¹ LIU Xiaoguang² LI Wei¹ ZHANG Junxiong¹ YUAN Ting¹ ZHANG Chunlong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, University of California at Davis, Davis CA 95616, USA)

Abstract: In the wake of development of China's agricultural aviation technology, the application of micro-plant protection unmanned aerial vehicles (UAVs) in the domain of crop pest and diseases management is becoming more and more extensive. There is no doubt that the UAVs have some significant advantages comparing with the traditional spraying methods because of its features of flexibility, environmental adaptability and high operational efficiency, particularly when working under complex scenarios that are inaccessible for conventional plant protection equipment. However, in practical applications, there are still some notable issues such as unsatisfactory application quality, low automation, and high safety risks which are limiting UAV's working performance. Precision spraying technology and UAV autonomous control technology are the key factors in terms of ensuring the spraying quality, improving working efficiency and safeguarding flight safety. For the sake of endowing the UAV with some extent of autonomous flight capability, a multi-layer control system was introduced, which consisted of a companion computer and an open-source flight controller that can communicate with each other via ROS and MAVROS. Meanwhile, an integrated method of external sensors (RTK-GPS and LiDAR sensor) and flight controller onboard sensors was proposed. This method can significantly improve the spatial position and control accuracy of the plant protection UAV. In order to further enhance the UAV's autonomous flight ability, the task control system was designed and proposed, which enabled UAV autonomously flight between multiple task points with the horizontal and vertical location error of 0.145 m and 0.053 m, respectively. The research result effectively improved the plant protection UAV's position accuracy and self-operating performance, and provided some reference for the future development of precision spraying technology.

Key words: unmanned aerial vehicle; autonomous flight; information fusion; ROS

收稿日期: 2019-04-29 修回日期: 2019-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700)和国家留学基金管理委员会国家建设高水平大学公派研究生项目

作者简介: 王大帅(1990—),男,博士生,主要从事农业机器人及植保无人机精准施药研究,E-mail: wdshe@cau.edu.cn

通信作者: 张俊雄(1979—),男,副教授,博士,主要从事计算机视觉技术及农业机器人研究,E-mail: cau2007@cau.edu.cn

0 引言

在全世界范围内,农业航空技术在农作物生长状态监测^[1]、病虫害害信息获取^[2]、植物保护^[3]和产量评估^[4]等方面的研究和应用越来越广泛^[5-6]。随着我国农业航空技术的发展,微型植保无人机逐渐应用于农作物病虫害防治^[7]、棉花落叶剂喷洒^[8]和无人机辅助授粉^[9]等方面。特别是,植保无人机在小麦、玉米及水稻等大田作物农药喷洒^[10-14]和果园、茶园等经济作物病虫害防治^[15-17]中应用前景广阔。相较于传统施药方法,尽管植保无人机具有地形适应性强、田间通过性好、农药利用率高等优势,但在农田复杂环境作业过程中仍普遍存在施药效果不理想、自主作业性能差、安全风险高等问题^[18-19]。目前,由于植保无人机结构复杂、控制精度要求高,在实际飞防作业时仍以手动操作为主,受限于飞行员操作技能水平,目视距离和环境参数变化,无人机真实飞行参数控制精度无法满足实际需求,对其施药效果造成不利影响。为进一步改善植保无人机施药效果,提高其复杂环境下自主作业性能,无人机精准空间位置定位和自主飞行技术^[20-23]成为研究热点。

植保无人机作为精准农业的重要组成部分,其室外环境空间位置定位精度对施药效果产生直接影响。国内外研究学者基于不同机型、针对不同作业对象研究了下洗气流分布^[24]、施药参数^[25-26]、飞行参数^[27]和环境参数^[28]变化对施药效果的影响规律,取得了一定的成果,但缺乏对无人机精准自主飞行控制方法的研究。目前植保无人机多采用单点 GPS 进行水平方向空间定位,采用气压计、超声波传感器、激光雷达、毫米波雷达等传感器进行垂直方向定位,在一定程度上提高了其空间位置定位精度。然而,由于单点 GPS 和气压计等传感器定位精度普遍较低,故无法保证无人机飞行参数的稳定性。因此,基于 RTK-GPS 的绝对位置定位与基于激光雷达等传感器的相对距离探测的结合定位方法成为保证无人机空间位置定位精度的首选。此外,受限于商业飞行控制器的封装性,植保无人机普遍存在施药系统和飞行控制系统相互独立的现象,严重限制了精准施药技术的发展。随着机器人操作系统(Robot operating system,ROS)在机器人领域的广泛应用和开源飞行控制器的日渐成熟,二者的结合为实现植保无人机自主飞行提供了解决方案。

本文针对植保无人机实际作业过程中普遍存在的空间位置定位精度低和飞行参数不稳定等问题进行研究,旨在提高无人机空间位置定位精度的同时

实现自主飞行,为无人机精准施药技术的发展提供参考。

1 无人机自主飞行控制整体方案

以四旋翼微型无人机为平台,构建由协同计算机和开源飞行控制器组成的二级控制系统,采用 RTK-GPS 和激光雷达作为空间位置探测传感器,基于 ROS、MAVROS 和 MAVLink 通信协议提出了如图 1 所示的无人机精准自主飞行控制方法整体方案。整个系统分为 3 部分:地面站、无人机系统和飞行员。其中,地面站包括 Piksi Multi RTK-GPS 基准站、RFD900+ 型无线电台地面端和便携式计算机;无人机系统包括四旋翼无人机平台、Pixhawk 开源飞行控制器、RTK-GPS 移动站、无线电台机载端、激光雷达、协同计算机及其他配件;飞行员通过 QGroundControl 控制软件实时监测无人机飞行参数并发送必要控制指令,此外飞行员手中应持有遥控器,以便无人机在自主飞行过程中遇到紧急情况时切换为手动操作模式。

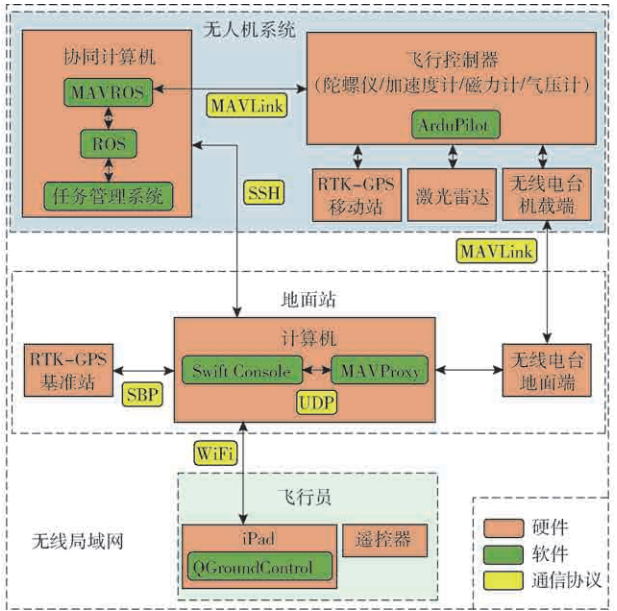


图 1 无人机精准自主飞行控制方法整体方案
Fig.1 Overall solution for precision autonomous flight control method of UAV

采用无线路由器建立局域网环境以便对协同计算机进行远程控制,并实现飞行参数在不同硬件中通过 UDP 协议进行路由。RTK-GPS 系统硬件架设完成后,首先使用地面站 Swift Console 软件对基准站所处当前位置的准确经纬度和海拔信息进行设置,随后使用 Swift Console 将基准站绝对位置信息和载波相位观测值以 5 Hz 的频率通过 UDP 路由到 IP 地址 127.0.0.1,端口为 13320。MAVProxy 将来自 RTK-GPS 基准站的位置信息和差分修正值“注

人”到 MAVLink 通信数据流中,无线电台机载端将包含地面站远程控制指令、RTK - GPS 基准站位置信息和差分信号的数据流发送至飞行控制器,并实时接收飞行控制器反馈的无人机当前飞行参数。RFD900 + 型无线电台用于建立地面站和飞行控制器之间长距离双向数据传输,分为地面端和机载端,支持 MAVLink 通信协议,工作频率范围为 902 ~ 928 MHz,户外空旷环境下通信距离可达 40 km。

2 无人机系统组成

无人机系统组成部件如图 2 所示,四旋翼无人机平台以 3S 锂电池作为动力源;采用开源飞行控制器 Pixhawk 作为无人机控制核心;搭载 Swift Piksi Multi RTK - GPS 接收模块和天线用于无人机空间位置精准定位;采用 Garmin LiDAR Lite V3 激光雷达对离地高度进行测量;同时选用树莓派 (Raspberry Pi3)作为协同计算机执行用户高级控制程序;搭载无线电台和遥控接收器建立无人机与地面站、飞行员之间的无线通信。

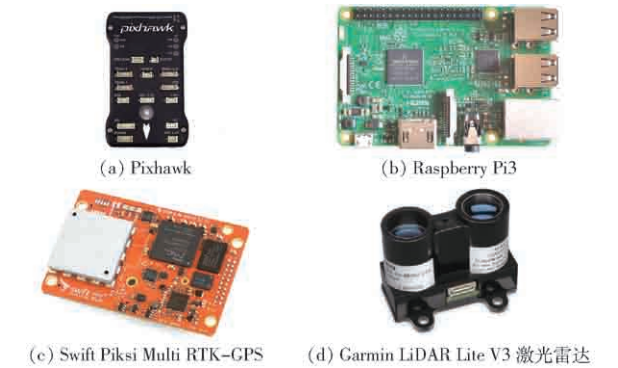


图 2 无人机系统关键部件

Fig.2 Key components of UAV's control system

Pixhawk 内部集成板载主处理器、协处理器及多种高精度传感器,同时兼容开源飞控固件 PX4 和 ArduPilot,支持多种外设扩展接口。Pixhawk 飞行控制器通过无线电台与地面站进行双向通信,接收地面站控制指令和 RTK - GPS 基准站位置信息及差分信号修正值,并向地面站实时反馈当前飞行参数。Pixhawk 融合 IMU 数据及 RTK - GPS 和激光雷达等外接传感器数据对无人机当前状态进行估计,接收协同计算机控制指令后对无人机姿态和位置进行控制。

Raspberry Pi3 作为协同计算机,运行 Ubuntu Mate 16.04 操作系统并安装 ROS Kinetic 和 MAVROS,通过 MAVLink 通信协议与飞行控制器 Pixhawk 进行通信。Raspberry Pi3 运行基于 ROS 的任务管理系统,通过 ROS 话题和服务机制获取无人机当前位置与姿态并发送控制指令和位置信息,实

现无人机自主起降、任务点飞行、悬停等动作。

Piksi Multi 是美国 Swift Navigation 公司推出的一款多频段多星系的廉价 GNSS 接收机,具有体积小、质量轻、收敛速度快、鲁棒性强等特点,易于集成到多种应用程序中,其主要性能指标见表 1。

表 1 Swift Piksi Multi GNSS 接收机技术参数

Tab.1 Specifications of Swift Piksi Multi GNSS module

参数	数值/名称
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	48 × 71 × 12. 4
质量/g	26
输入电压/V	5 ~ 15 (DC)
功率/W	2. 9
GNSS 信号	GPS/GLONASS L1/L2
通信协议	SBP/NMEA - 0183
RTK 水平精度/mm	10 + 10 ⁻⁶ D (移动站 与基准站之间的距离)
RTK 垂直精度/mm	15 + 10 ⁻⁶ D
RTK 数据最大输出频率/Hz	10

采用脉冲式激光雷达 Garmin LiDAR Lite V3 检测无人机与地面之间的相对距离以提高无人机仿地飞行能力,其详细性能参数见表 2。

表 2 Garmin LiDAR Lite V3 激光雷达技术参数

Tab.2 Specifications of Garmin LiDAR Lite V3

参数	数值/类型
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	20 × 48 × 40
质量/g	22
输入电压/V	5 (DC)
最大探测距离/m	40
分辨率/cm	± 1
近距离精度 (< 5 m)/cm	± 1. 0
远距离精度 (≥ 5 m)/cm	± 2. 5
波长/nm	905
接口类型	I ² C/PWM

3 无人机自主飞行控制方法

3.1 开源飞控 ArduPilot

ArduPilot 开源飞行控制程序负责 Pixhawk 板载和外设传感器驱动、数据滤波与融合及无人机位置与姿态控制,其中无人机位置与姿态控制是 ArduPilot 控制算法的核心,且姿态控制是实现位置控制的基础。位置控制输入量为目标位置与当前位置之间的偏差,根据设定飞行速度进行 PID 控制,输出目标俯仰角或横滚角到姿态控制环。姿态控制环以目标俯仰角、横滚角和油门值与当前真实角度的偏差作为输出,进而计算所需目标角速度与实际角速度偏差,通过 PID 控制各个电机转速进而控制无人机姿态,最终实现位置控制。

3.2 任务管理系统设计及控制流程

无人机自主飞行控制方法有两种：一种是修改 ArduPilot 源代码,添加自定义飞行任务控制程序,该方法不需要引入 ROS 和协同计算机,虽然可减少系统复杂程度,但会降低飞行控制系统稳定性,并且飞行任务改变后,飞行控制程序需要重新修改、编译和烧录,不利于系统的移植和扩展;另一种控制方法采用运行 ROS 的协同计算机作为主控制器,ArduPilot 作为子控制器,其中主控制器负责执行高层次控制程序,可根据需求扩展多种传感器,为无人机飞行控制提供决策依据,子系统作为独立飞行控制器,只需执行主系统决策结果,不需跟随系统的扩展做代码层次的修改,该方法可提升整个系统的扩展灵活性和运行稳定性。

为提高控制方法的普适性和代码复用率,本文采用第 2 种控制方法,基于 Python 编程语言设计了任务管理系统(Task control system, TCS),其文件系统结构如图 3 所示。TCS 依赖于 ROS 进行无人机飞行任务管理,包含多个 Python 文件,其中 Main.py 是主文件,其一方面负责 ROS 节点建立、无人机起飞前状态检测、飞行模式选择和无人机自主起降控制,另一方面通过解析 Task_List.txt 文件提取所有飞行任务并顺序调用相应文件进行无人机飞行控制,同时监测飞行任务执行进度;TCS_Utility.py 文件负责维持协同计算机与飞行控制器之间的连接,并监测每条飞行任务执行进程;Task_List.txt 文件内容每一行代表一个飞行任务,以目标点与起飞位置的相对坐标和悬停时间为参数;Task_Local_Goto.py 负责按照当前任务参数控制无人机以设定速度从当前位置直线飞行到目标位置;Task_Simple_Hover.py 负责根据当前任务参数控制无人机精准悬停在当前位置并保持指定时间;用户可依据上述方法对任务管理系统功能进行扩展,并通过改变任务列表参数制定特定飞行任务。

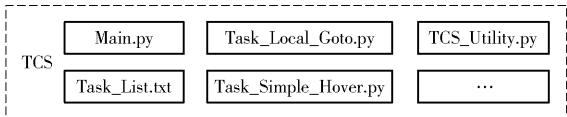


图 3 任务管理系统组成示意图

Fig. 3 Structure diagram of task control system

无人机自主飞行控制系统由飞行控制器 Pixhawk 和协同计算机 Raspberry Pi3 组成,二者之间通过 MAVLink 通信协议进行信息交互。协同计算机运行 ROS 后通过话题和服务机制与子系统通信,采用 MAVROS 进行 ROS 消息和 MAVLink 消息之间的转换。基于 ROS 的任务管理系统消息传递机制如图 4 所示。

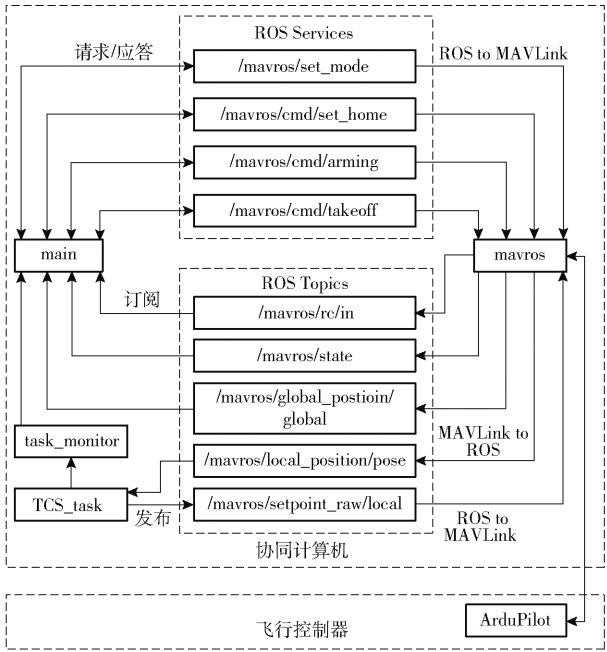


图 4 基于 ROS 的任务管理系统消息传递机制

Fig. 4 ROS based message delivery mechanism of TCS

系统中包含 mavros、main、task_monitor 和 TCS_task 共 4 个节点,其中 mavros 负责将 ArduPilot 输出的包含无人机当前状态、姿态及位置信息的 MAVLink 消息转换成具有特定格式和标识符的 ROS 话题以供任务管理系统进行订阅;另外 mavros 节点还负责将任务控制器发布的包含无人机控制指令的话题和服务转换成 MAVLink 消息格式并发送到飞行控制器。main 节点负责任务管理系统 ROS 节点初始化,通过订阅/mavros/state 话题查看无人机当前的飞行模式等状态信息,同时订阅/mavros/rc/in 话题,根据遥控器开关位置决定是否进入无人机自主飞行模式。另外 main 节点通过发送服务请求控制无人机飞行模式并自主起飞到指定高度后悬停,准备进入任务点飞行模式,当所有任务执行完毕后,main 节点负责控制无人机返航,自主降落在起飞位置。TCS_task 节点负责执行具体飞行任务,通过订阅和发布相应话题控制无人机按任务列表中预设参数进行定点飞行和悬停。task_monitor 负责监测各项任务具体执行进度,并将监测结果反馈给 main 节点。无人机自主飞行控制流程如图 5 所示。

4 RTK - GPS 和激光雷达静态性能测试

4.1 RTK - GPS

在美国加利福尼亚大学戴维斯分校草坪上对 RTK - GPS 系统的静态绝对位置和相对位置定位精度分别进行了测试。Piksi Multi RTK - GPS 系统组成如图 6a 所示。基准站和移动站使用两套完全相同的 Pixsi Multi GNSS 模块,二者通过设置相关参数

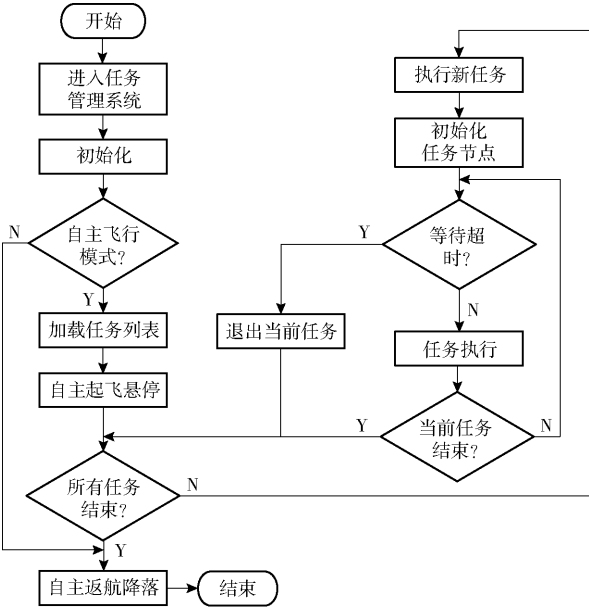


图 5 无人机自主飞行控制流程图

Fig. 5 Flow chart of autonomous control method

进行区分。使用 Swift Console 设置基准站当前位置精准坐标 (121. 759 631 179°W, 38. 539 943 746 6°N, 海拔 - 14. 111 845 839 4 m) 后, 使能基准站广播机制。移动站固定在基准站正北方向 10. 0 m 位置, 如图 6b 所示。基准站根据当前观测值和精准坐标计算修正值, 并通过无线电台将修正值和精准坐标值发送到移动站, 移动站接收基准站上传数据后对自身观测位置进行修正以得到精准绝对位置信息, 同时计算与基准站之间的基准线获得相对位置信息。

基准站 Piksi Multi 绝对位置经纬度定位精度如图 7a 所示, 经度方向相对于精准坐标变化区间为 (- 0. 7 m, 0. 7 m), 纬度方向变化区间为 (- 0. 7 m, 0. 9 m), 海拔变化较大且不固定, 通常为米级误差。

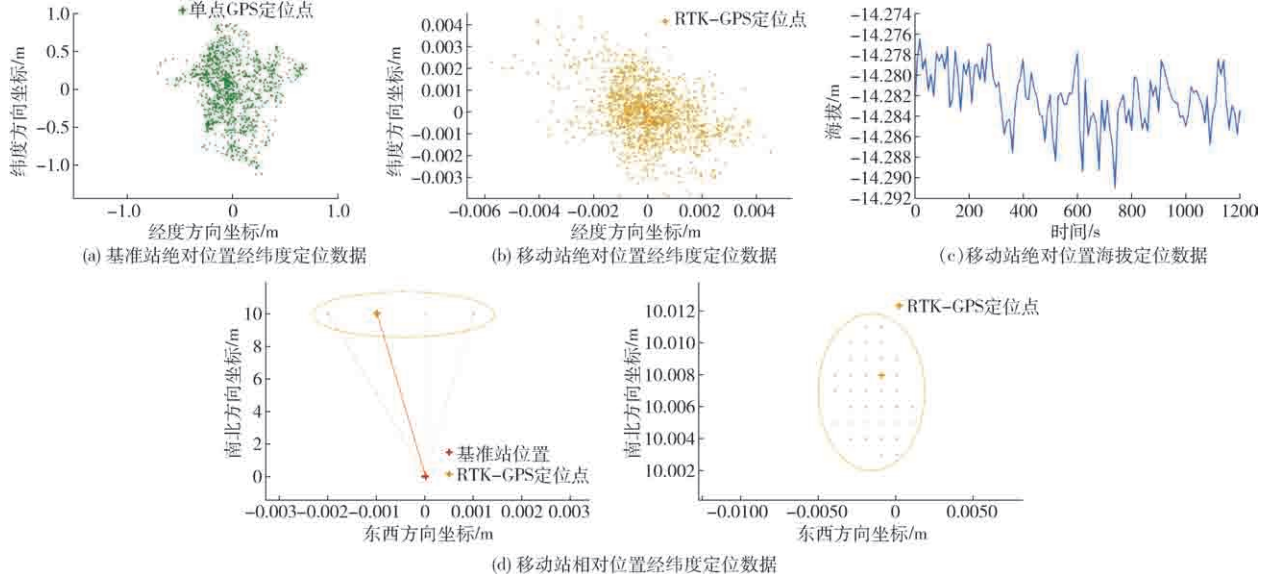


图 7 Swift Multi RTK - GPS 静态精度测试结果

Fig. 7 Static accuracy test result of Swift Multi RTK - GPS

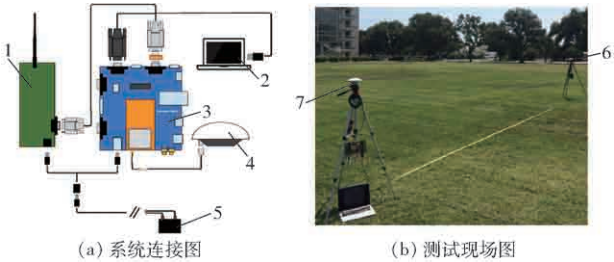


图 6 Swift Multi RTK - GPS 静态精度测试

Fig. 6 Static accuracy test of Swift Multi RTK - GPS

- 1. 无线电台 2. Swift Console 3. Piksi Multi GNSS 接收机
- 4. GNSS 天线 5. 电源 6. 基准站 7. 移动站

移动站 Piksi Multi 采用 RTK 差分技术得到的绝对位置定位精度相对于基准站有显著提高, 其中经纬度定位精度如图 7b 所示, 经度方向变化范围为 (- 0. 005 m, 0. 005 m), 纬度方向变化范围为 (- 0. 004 m, 0. 004 m); 海拔定位精度如图 7c 所示, 变化范围为 (- 14. 292 m, - 14. 276 m)。Piksi Multi RTK - GPS 移动站与基准站之间相对位置测试结果如图 7d 所示, 基准站以红色 “ + ” 字表示, 其位置设为原点 (0 m, 0 m), 移动站位置以橙色 “ + ” 字表示, 理想值为 (10. 000 m, 10. 000 m)。结果显示: 移动站观测值东西方向变化范围为 (- 0. 005 m, 0. 002 5 m), 南北方向变化范围为 (10. 002 m, 10. 012 m)。

4. 2 激光雷达

RTK - GPS 垂直方向相对定位误差通常大于水平方向, 且测量值只能反映移动站与基准站的垂直方向相对位置, 而非移动站与地面之间的相对距离。为提高无人机仿地飞行能力, 本文采用激光雷达实时测量无人机与地面之间的相对距离。激光雷达垂直向下固定在无人机正下方, 由于无人机在飞行过程中通常伴随着飞行姿态 (俯仰和横滚) 的变化, 导

致激光雷达实际探测方向通常与垂直方向存在一定空间角度,具体情形分析如图 8 所示。

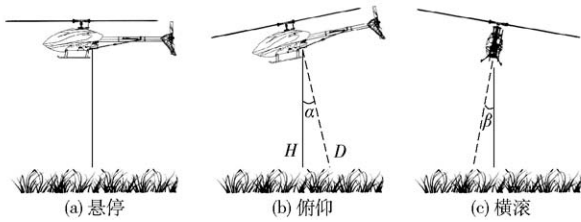


图 8 激光雷达测量距离误差示意图

Fig. 8 Diagram of measurement error of LiDAR sensor

协同计算机可通过订阅相应 ROS 话题实时获取无人机当前姿态下的俯仰角 α 、横滚角 β 及激光雷达探测距离 D ,根据几何关系推导可得到无人机实际距离地面高度 H 和激光雷达探测距离之间的修正公式

$$H = \frac{D}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}} \tag{1}$$

无人机自主飞行测试过程中,任务管理系统可根据无人机当前姿态对激光雷达测量值进行及时修正,以保证飞行高度的稳定性。以水泥地面为探测对象对无人机悬停状态下激光雷达测距精度进行测试,测试时天气晴朗且风速可忽略不计。首先将飞机起飞并悬停在距离地面 1.5 m 处,通过地面站确定无人机飞行状态正常后,将无人机升高到 2.5 m 处并切换到位置保持模式,此时无人机依赖 RTK-GPS 保持水平位置,依赖激光雷达保持高度位置,测试时间约 9 min,测试结果如图 9 所示,结果表明:激光雷达测量值波动区间为(2.3 m,3.0 m),平均误差为 0.2 m。由于无人机会在测试过程中受环境因素影响产生飘移,其位置和姿态调整过程会对激光雷达测量值产生一定影响。另外,随着时间的推移,无人机动力电池电量逐渐降低,也会对其机动性能产生负面影响。

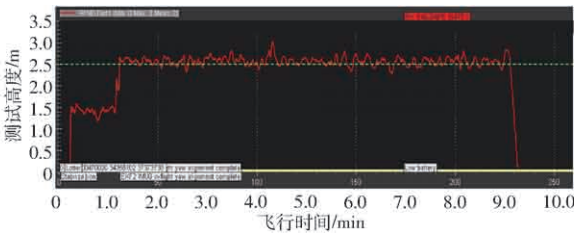


图 9 LiDAR Lite V3 定位精度测试结果

Fig. 9 Position accuracy test result of LiDAR Lite V3

植保无人机作业高度的稳定性对施药品质和飞行安全有直接影响。当作业对象为小麦、水稻等时,其冠层浓密且植株高度相对均匀,通过对单点激光雷达测量数据进行均值滤波处理即可获得较为准确的相对高度信息;当作业对象为果树时,其冠层形态

变化较大且植株相对稀疏,采用单点激光雷达测量相对高度时数据波动明显,因此存在一定局限性。本文将研究对象设定为小麦、水稻等密植型粮食作物。

5 试验结果与分析

为验证基于 Piksi Multi RTK-GPS、激光雷达和任务管理系统的四旋翼无人机动态定位精度及自主飞行性能,综合考虑具体试验条件和植保无人机实际使用需求,设计的无人机自主飞行试验方案如图 10 所示。

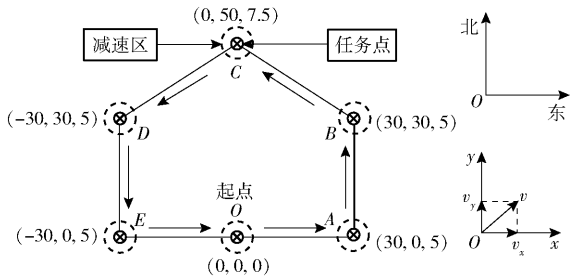


图 10 无人机自主飞行试验方案示意图

Fig. 10 Diagram of autonomous flight test scheme

该试验方案由 O 、 A 、 B 、 C 、 D 、 E 总计 6 个任务点组成封闭的五边形飞行航迹, O 点设定为起点和终点,其坐标定义为(0,0,0),其余任务点与起点之间的相对坐标如图 10 所示。为方便观察 RTK-GPS 和激光雷达实际定位精度,无人机到达任务点后均会悬停当前位置 30 s 后飞向下一个任务点。无人机在任务点之间直线飞行,飞行速度设为 2 m/s。以任务点为圆心,设置半径为 5 m 的减速区,当无人机进入减速区后,飞行速度与当前位置和任务点之间的距离成正比,即无人机越靠近任务点,速度越慢。无人机靠近任务点过程中,机头始终朝向任务点,只有当前位置坐标与任务点坐标在 X 、 Y 、 Z 方向上的误差绝对值同时小于 0.1 m 时,认为无人机准确到达任务点,若无人机进入减速区后 30 s 内始终无法到达任务点,则放弃寻找,进入悬停任务,之后飞向下任务点,因此任何一条任务执行失败并不影响整体任务执行进度。当前任务点高度小于下一任务点时,无人机首先在当前位置爬升高度后再飞向下任务点;当前任务点高度大于下一任务点时,无人机先以当前高度飞向下任务点,然后再降低高度。试验之前将飞行任务点坐标及悬停时间按特定格式提前写入到任务管理系统中的 Task_List.txt 文件。试验开始后,无人机自主起飞并按任务点顺序执行,待全部任务结束后自主降落在起点位置,并退出自主飞行模式和任务管理系统。无人机飞行过程中的位置信息、姿态信息及速度信息均会自动保

存在飞行控制器内置的 SD 卡中。试验场地选在美国加利福尼亚大学戴维斯分校草坪,RTK - GPS 基准站以三脚架固定并尽量远离树木和建筑,避免信号遮挡。试验当天天气晴朗,微风或无风,试验现场如图 11 所示。

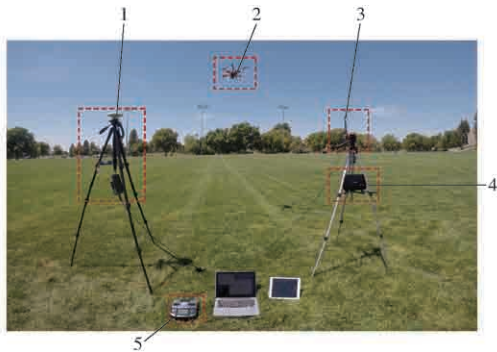


图 11 无人机自主飞行试验现场图

Fig. 11 Field test picture of autonomous flight

1. RTK-GPS 基准站 2. 四旋翼无人机 3. 无线电台地面端 4. 无线路由器 5. 遥控器

试验结束后通过地面站程序对无人机飞行日志进行重放,获得如图 12 所示的真实飞行轨迹。整个试验过程中,运行任务管理系统的协同计算机可按照试验方案控制无人机自主起降并进行多任务点间直线飞行,所有任务均按预期执行,无异常情况出现。

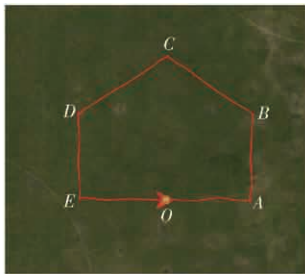


图 12 无人机自主飞行真实轨迹

Fig. 12 Real path of autonomous flight

为分析无人机自主飞行过程中三维空间位置定位精度,进一步解析飞行日志并绘制 RTK - GPS 经纬度和激光雷达测量值变化曲线,如图 13 所示。无

人机由 O 点起飞,垂直爬升 2.0 m 到达 O' 位置后开始执行飞行任务,继续爬升至 5.0 m 后飞向 A 点,准确到达 A 点后进入悬停状态, 30 s 后将当前位置标记为 A' ,随后顺序执行飞行任务,当所有任务执行完毕后自主降落在 O 点。图 13 中任务点水平位置以经纬度表示,空间两点之间的水平距离计算式为

$$d = \arccos(\sin N_A \sin N_B + \cos N_A \cos N_B \cos(W_A - W_B))R \quad (2)$$

式中 d ——空间两点之间的水平距离, m

N_A ——A 点纬度, ($^{\circ}$) W_A ——A 点经度, ($^{\circ}$)

N_B —— B 点纬度, ($^{\circ}$) W_B —— B 点经度, ($^{\circ}$)

R ——地球半径,取常数 6 371 004 m

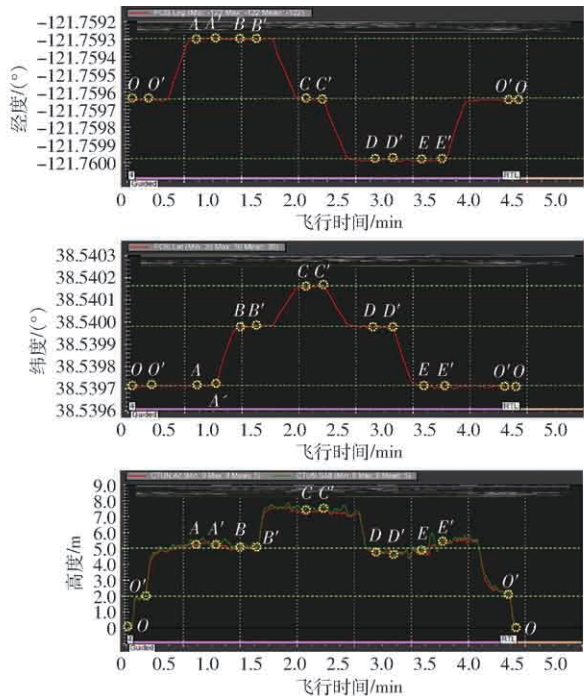


图 13 无人机自主飞行空间位置变化曲线

Fig. 13 Curves of UAV's spatial position during autonomous flight test

表3 无人机自主飞行试验结果

Tab.3 Test result of UAV's position accuracy during autonomous flight

[illegible]

向定位误差平均值为 0.145 m;通过分析无人机距离地面实际高度与试验方案预设值之间的误差可知,无人机采用激光雷达能够较为准确地保持飞行高度的稳定性,垂直误差平均值为 0.053 m。通过观察无人机在到达任务点后执行悬停任务结果可发现其能较为准确保持水平和垂直位置。

6 结论

(1) 采用 Pixhawk 作为飞行控制器运行 ArduPilot 控制程序,以 Raspberry Pi3 为协同计算机,融合飞行控制器板载传感器及外部传感器对无人机状态估计进行修正,构建了具有二级控制系统

和高精度定位能力的四旋翼微型无人机系统。

(2) 基于 ROS 和 MAVROS 设计开发了任务管理系统,将无人机飞行过程拆分成不同子任务,并以任务列表的形式快速形成飞行任务。协同计算机与飞行控制器通过 MAVLink 通信协议进行数据交互,前者运行任务管理系统、控制执行飞行任务,后者接收任务参数、执行无人机位置和姿态控制。

(3) 为测试无人机空间位置定位精度和自主飞行性能,设计相应试验方案,进行飞行试验。试验结果表明:无人机能按照预定飞行路线在多任务点之间自主直线飞行,飞行过程中水平方向平均定位误差为 0.145 m,垂直方向平均定位误差为 0.053 m。

参 考 文 献

- [1] CHANG A, JUNG J, MAEDA M M, et al. Crop height monitoring with digital imagery from unmanned aerial system (UAS) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 232 – 237.
- [2] SU J, LIU C, COOMBES M, et al. Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 157 – 166.
- [3] HE X, BONDS J, HERBST A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 18 – 30.
- [4] YANG Q, SHI L, HAN J, et al. Deep convolutional neural networks for rice grain yield estimation at the ripening stage using UAV-based remotely sensed images [J]. Field Crops Research, 2019, 235: 142 – 153.
- [5] MAES W H, STEPPE K. Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture [J]. Trends in Plant Science, 2019, 24(2): 152 – 164.
- [6] MOGILI U R, DEEPAK B B V L. Review on application of drone systems in precision agriculture [J]. Procedia Computer Science, 2018, 133: 502 – 509.
- [7] QIN W, XUE X, ZHANG S, et al. Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 27 – 32.
- [8] LIAO J, ZANG Y, LUO X, et al. Optimization of variables for maximizing efficacy and efficiency in aerial spray application to cotton using unmanned aerial systems [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(2): 10 – 17.
- [9] 李继宇,周志艳,兰玉彬,等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 77 – 86.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, LAN Yubin, et al. Distribution of canopy wind field produced by rotor unmanned aerial vehicle pollination operation [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 77 – 86. (in Chinese)
- [10] 张海艳,兰玉彬,文晟,等. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 116 – 124.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 116 – 124. (in Chinese)
- [11] 王大帅,张俊雄,李伟,等. 植保无人机动态变量施药系统设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86 – 93.
WANG Dashuai, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86 – 93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170510&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.010. (in Chinese)
- [12] 陈盛德,兰玉彬,BRADLEY K F,等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105 – 113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105 – 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170811&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)
- [13] QIN W, QIU B, XUE X, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers [J]. Crop Protection, 2016, 85: 79 – 88.
- [14] XUE X, LAN Y, SUN Z, et al. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 58 – 66.
- [15] TANG Y, HOU C, LUO S, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1 – 7.

- [16] ZHANG P, DENG L, LYU Q, et al. Effects of citrus tree-shape and spraying height of small unmanned aerial vehicle on droplet distribution[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 45–52.
- [17] 陈盛德, 兰玉彬, 周志艳, 等. 小型植保无人机喷雾参数对橘树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 97–102.
CHEN Shengde, LAN Yubin, ZHOU Zhiyan, et al. Effects of spraying parameters of small plant protection UAV on droplets deposition distribution in citrus canopy[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(5): 97–102. (in Chinese)
- [18] 兰玉彬, 王林琳, 张亚莉. 农用无人机避障技术的应用现状及展望[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 104–113.
LAN Yubin, WANG Linlin, ZHANG Yali. Application and prospect on obstacle avoidance technology for agricultural UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 104–113. (in Chinese)
- [19] 周志艳, 明锐, 臧禹, 等. 中国农业航空发展现状及对策建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 1–13.
ZHOU Zhiyan, MING Rui, ZANG Yu, et al. Development status and countermeasures of agricultural aviation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 1–13. (in Chinese)
- [20] FAIÇAL B S, FREITAS H, GOMES P H, et al. An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 138: 210–223.
- [21] 吴开华, 孙学超, 张竞成, 等. 基于高度融合的植保无人机仿地飞行方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 17–23.
WU Kaihua, SUN Xuechao, ZHANG Jingcheng, et al. Following method of plant protection UAV based on height fusion[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 17–23. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180602&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.002. (in Chinese)
- [22] 文恬, 高嵩, 邹海春. 基于激光测距的无人机地形匹配飞行方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9): 3209–3212.
WEN Tian, GAO Song, ZOU Haichun. Based on laser ranging method research of UAV terrain matching flight[J]. Computer Measurement and Control, 2015, 23(9): 3209–3212. (in Chinese)
- [23] 廖懿华, 张铁民, 兰玉彬. 农田信息采集用多旋翼无人机姿态稳定控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 88–98.
LIAO Yihua, ZHANG Tiemin, LAN Yubin. Design and test of attitude stabilization control system of multi-rotor unmanned aerial vehicle applied in farmland information acquisition[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 88–98. (in Chinese)
- [24] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104–118.
LI Jiyu, LAN Yubin, SHI Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 104–118. (in Chinese)
- [25] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 40–46.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 40–46. (in Chinese)
- [26] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 等. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50–56.
QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 50–56. (in Chinese)
- [27] 邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 25–32.
QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 25–32. (in Chinese)
- [28] WANG L, CHEN D, YAO Z, et al. Research on the prediction model and its influencing factors of droplet deposition area in the wind tunnel environment based on UAV spraying[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 274–279.