

# 自主作业的农业低空遥感平台设计与实践

李 丹<sup>1,2</sup>, 滕小华<sup>3</sup>, 唐 友<sup>1,2\*</sup>

(1. 吉林农业科技学院, 吉林 吉林 132101; 2. 吉林省智慧农业工程研究中心, 吉林 吉林 132101; 3. 东北农业大学, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 该研究依托吉林省智慧农业工程研究中心, 深入研究了农业低空遥感平台关键技术。提出了遥感平台的整体框架结构, 分析了硬件平台的动力系统和控制系统, 以及软件平台的闭环控制程序和通信程序, 阐述了平台调试方案。结果表明, 系统平台运行稳定, 为现代农业的精细化作业提供了参考方案。

**关键词:** 低空遥感; 闭环控制; 四旋翼飞行器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2021)03-0121-05

## Design and Practice of Agricultural Low Altitude Remote Sensing Platform for Automatic Operation

LI Dan<sup>1,2</sup>, TENG Xiaohua<sup>3</sup>, TANG You<sup>1,2\*</sup>

(1. Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101; 2. Jilin Province Intelligent Agricultural Engineering Research Center, Jilin 132101; 3. Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Relying on the Intelligent Agricultural Engineering Research Center of Jilin Province, the key technologies of agricultural low altitude remote sensing platform were studied in depth. The whole frame structure of the remote sensing platform is proposed, the power system and control system of the hardware platform are analyzed, and the closed-loop control program and communication program of the software platform are analyzed. The results show that the system platform runs stably and provides a reference scheme for modern agriculture.

**Key words:** Low altitude remote sensing; Closed-loop control; Quadrotor aircraft

### 1 背景及意义

在传统农业向现代农业转型升级进程中, 遥感技术在农作物长势检测、病虫害诊断预警、田地保险评估等领域发挥着突出作用<sup>[1]</sup>。卫星高空遥感技术有访问周期长、受云层影响大的不足, 无人机低空遥感可以在这些方面补充<sup>[2]</sup>。由于固定翼无人机需要滑行轨道, 单旋翼机械设计复杂, 因此流行趋势是选择多旋翼无人机作为农业微型低空遥感的载体。本研究依托吉林省智慧农业工程研究中心科研团队和吉林省数字农业重点学科成员, 针对农业微型低空遥感关键技术进行深入研究<sup>[3]</sup>。

### 2 整体系统设计

低空遥感平台具有一定刚性的机械系统, 可以承载一定重量的负载, 如: 视觉识别等传感器硬件模块; 具有一个强劲的动力系统, 可以驱动平台在农作物栽培环境的三维空间任意移动与偏转; 具有一套精准的控制系統, 可以指挥平台在农作物栽培田地边缘或指定路径运动与识别作物生长状况、病虫害情况。当执行低空遥感任务的数据分析处理任务较重时, 可以在指挥控制系统中增加地面站平台、RC 遥控设备。低空遥感平台将采集的数据无线传输到地面站平台之后, 地面站服务器进行数据分析处理<sup>[4]</sup>。系统整体结构如图 1 所示。

低空遥感平台机械系统包括悬挂视觉模块等负载的机体主架、固定产生空气动力螺旋桨的机体机臂、空中降落时用来缓冲减震的机体脚架。低空遥感平台动力系统是电能转换为机械动能的系统。电子调速模块调节电池组模块的电能输出

收稿日期: 2020-01-16

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJ-KH20190974KJ)

作者简介: 李 丹(1980-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向: 计算机应用技术。

通讯作者: 唐 友, 男, 博士, 教授, E-mail: tangyou@neau.edu.cn

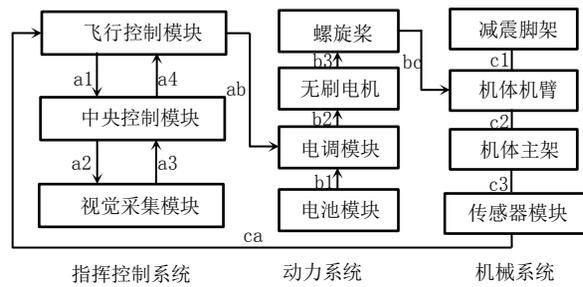


图1 系统结构示意图

强弱,并传输给无刷电机,无刷电机将电能转换为螺旋桨的机械动能。指挥控制系统包括飞行控制模块、中央控制模块、视觉采集模块和机载传感器模块<sup>[5]</sup>。

在系统整体结构框架图中,有向线条ca、ab、b2、b3、bc构成的闭合回路蕴含着二层闭环PID控制。机载传感器模块将当前低空遥感平台的高度、俯仰、横滚、偏航等姿态信息实时反馈给机载飞行控制模块;飞行控制模块进行姿态解算和姿态控制决策,并将控制信号发送给电调模块;电调模块控制动力系统实时调整遥感平台的飞行姿态。在这个姿态PID控制回路中,包含控制姿态速度的内层闭环控制和控制姿态位置的外层闭环控制。图1中,低空遥感平台指挥控制系统蕴含着三层闭环PID控制,即有向线条a1、a2、a3、a4、ab、b2、b3、bc、ca构成第三层闭环PID控制,由视觉采集模块和中央控制模块联合决策平台在作物栽培三维空间的具体位置。

### 3 硬件系统设计

#### 3.1 动力系统设计

低空遥感平台的机械系统包括机架主体、机架臂杆、缓冲支架、航拍云台。其中机架主体选择四轴碳纤维机架,机架斜对角的电机轴间距选取360 mm。低空遥感平台的动力系统包括电池组、电子调速器、无刷直流电机和螺旋桨。电池组模块选择3S-11.1V-25C-2200mAh型号的Lion电池组,电子调速器选择Flycolor的F20A型号,电机选择DJI的2212KV920型号,螺旋桨选择DJI的Turning slow fly 9450型号。

低空遥感平台动力系统的机械动能是由电能转换得到。电池组模块输出电能,输送电能的强弱由电调模块调节。电能传输给无刷电机,电机模块将电能转换为机械能,提供了遥感平台横滚、俯仰、升降运动的力和平台偏航的转矩。

为了衡量上述选型模块组成的低空遥感系统

平台动力系统性能,需要计算平台在定点悬停时的最大悬空时间、悬停时油门百分比、电调电流等参数。包含指挥控制系统物理模块在内的整体平台重量预计为1.05 kg。飞行海拔高度220 m,空气温度25 °C。具体计算过程中,螺旋桨(propeller)相关的变量用下标p区分、无刷电机(motor)相关的变量用下标m区分、电调用下标e、电池用下标b。假定平台当前处于定高悬停状态,那么平台整体重力G等于四个螺旋桨的拉力之和;由螺旋桨的动力数学模型可以计算出螺旋桨的转速N与转矩M。计算公式如下:

$$N = f_N(G) \approx 60 \left[ \rho D_p^4 \pi^3 \lambda \zeta^2 B_p K_0 \frac{\varepsilon \arctan \frac{H_p}{\pi D_p} - \alpha_0}{\pi A + K_0} \right]^{-\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}}$$

$$M = f_m(N) \approx \left( \frac{1}{28800A} \rho D_p^5 \pi^2 C_d \zeta^2 \lambda B_p^2 \right) N^2$$

公式中的G代表平台整体重力, $\rho$ 代表空气密度, $D_p$ 代表螺旋桨直径, $\lambda$ 代表叶片面积修正系数, $B_p$ 代表叶片数量, $K_0$ 代表升力曲线斜率, $\varepsilon$ 代表向下运动校正因子,A代表横纵比, $H_p$ 代表螺旋桨几何螺距, $\alpha_0$ 代表零升力角, $C_d$ 代表阻力系数。

螺旋桨的转矩与无刷电机的电磁转矩相等;由无刷电机的数学模型可以计算出无刷电机的输入电压 $U_m$ ,输入电流 $I_m$ ,即为电调的输出电流与电压。计算公式如下:

$$\begin{aligned} U_m &= f_{U_m}(M, N) \\ &\approx R_m \left( \frac{K_v U_{m_0}}{9.55(U_{m_0} - I_{m_0} R_m)} M + I_{m_0} \right) + \frac{U_{m_0} - I_{m_0} R_m}{K_v U_{m_0}} N \\ &= 4.1(\text{V}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_m &= f_{I_m}(M) \\ &\approx \frac{K_v U_{m_0}}{9.55(U_{m_0} - I_{m_0} R_m)} M + I_{m_0} \\ &= 4.1(\text{A}) \end{aligned}$$

其中,常数数值参考网站www.flyeval.com得到,公式中的 $K_v$ 代表标称电动机额定常数, $U_{m_0}$ 代表电动机额定空载电压, $I_{m_0}$ 代表实际电动机额定空载电流, $R_m$ 代表电动机电阻。

由电池电压和电调输出电压可以计算出悬停时油门百分比 $\sigma$ 、电池组输出电流 $I_b$ 和放电时间 $T_b$ ,电池组放电时间即为平台悬停时间。计算公式如下:

$$\sigma \approx \frac{U_m + I_m R_c}{U_b} = 51.8\%$$

$$I_b \approx 4(\sigma I_m) + I_{control} = 9.4(\text{A})$$

$$T_b \approx \frac{C_b - C_{\min}}{I_b} \frac{60}{1000} = \frac{2200 - 2200 \times 15\%}{9.4} \frac{60}{1000} = 11.9(\text{min})$$

公式中的  $R_e$  代表电调电阻,  $U_b$  代表电池电压,  $I_{\text{control}}$  代表飞行控制电流,  $C_b$  代表电池电容量,  $C_{\min}$  代表电池最小电容量,  $I_b$  代表电池电流。

上述参考模型由文献[1]中公式变换得到,低空遥控平台在定高悬停状态时,电调输入油门百分比是 51.8%,结果比较合理。一般的动力系统设计中,合理的油门在 50% 左右,也就是油门处于中间位置,上下控制余量都充足,系统恰好处于悬停状态。

### 3.2 控制系统设计

低空遥感平台的指挥控制系统负责根据预定飞行路径或农作物田地边缘情况,发出命令控制平台按照预定轨迹飞行,并且及时调整平台飞行姿态。指挥控制系统分为以下四个模块。

**视觉采集模块:**负责识别农作物地域边界情况。图像采集单元 OV7725 将视频图像以像素矩阵的形式提供给数据处理单元 STM32F103,数据处理单元将图像矩阵转化为黑白图像矩阵,从而分析出飞行路径的平面坐标,并且通过 STM32 的串行口将数据采集结果发送到中央控制模块。同时添加旋转编码开关和按键,可以调整 OV7725 的焦距和图像处理二值化阈值。

**中央控制模块:**完成指挥控制系统的核心任务,依据视觉采集模块得到的路径信息指挥飞行控制模块,驱动动力系统实现低空遥感平台的飞行路径闭环控制。中央控制模块的 STM32F03 串行口 UART1 与视觉采集模块交互信息,得到飞行路径信息。中央控制模块的 STM32F03 串行口 UART2 与飞行控制模块交互信息,发送飞行控制命令和接收飞行姿态信息。STM32F03 串行口 UART3 提供开发调试端口。同时添加旋转编码开关和按键,可以切换在遥感不同农作物时的执行代码。

**飞行控制模块:**pixhawk 负责飞行姿态解算与闭环控制决策,实现遥感平台飞行的姿态速度和姿态位置双层闭环 PID 控制。主处理器单元 STM32F427 完成姿态解算与闭环控制决策,辅助处理器单元 STM32F100 完成驱动 PWM 控制信号输出与传感器信息接收。

**传感器组模块:**负责采集平台飞行时的十个维度的姿态信息,包含 pixhawk 模块内置传感器组和外置传感器组。为了得到准确的实时信息,采用传感器冗余结构设计。三轴陀螺仪由 MPU6000

和 L3GD20 实现,三轴加速度计由 MPU6000 和 LSM303D 实现,三轴地磁仪由 LSM303D 和 HMC5883 实现,高度数据由气压计 MS5611 和超声波传感器 MD25 实现。这些传感器与 pixhawk 处理器通过各自串行总线 IIC 或 SPI 协议通信。

## 4 软件系统设计

### 4.1 三层 PID 闭环控制系统软件设计

软件系统指挥低空遥感平台实现路径导航和姿态调整。控制示意图如图 2 所示,导航模块设定目标路径轨迹,视觉采集模块获取实际飞行路径轨迹\*,路径 PID 控制器根据目标轨迹与实践轨迹\*的偏差  $e_1$  决策输出目标角度(横滚角  $\varphi$ , 俯仰角  $\theta$ , 偏航角  $\psi$ )。角度 PID 控制器根据角度偏差  $e_2$  决策输出目标角速度。角速度 PID 控制器根据角速度偏差  $e_3$  决策输出驱动信号,调整动力系统,调整飞行姿态。通过三层 PID 闭环控制实现平台飞行导航与姿态控制<sup>[6]</sup>。

遥感平台飞行导航路径的微观控制环节,主要是由中央控制模块的微处理器 STM32F103 路径

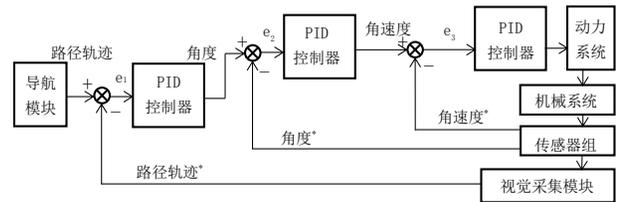


图 2 闭环控制示意图

PID 算法程序代码完成;宏观导航路径飞行控制使用有限状态机算法程序代码完成,每次飞行路径任务状态机包含解锁、爬升、稳定、悬停、俯仰、横滚、偏航、降落、锁定等状态。

遥感平台飞行姿态角度闭环控制环节、角速度闭环控制环节是由飞行控制模块 pixhawk 的主处理器 STM32F427 的双闭环 PID 程序代码实现的。飞控模块 pixhawk 的软件包含三层架构,实时操作系统 Nuttx、中间件 uORB、应用程序栈。双闭环 PID 程序代码位于应用程序栈中。

### 4.2 控制模块间通信系统软件设计

飞行控制模块 pixhawk 既接收导航操作员的 RC 遥控器指令,又接收中央控制模块程控代码发出的飞行指令。它是开源飞控,编程人员可以修改源代码定制适合的通信协议。本文在 pixhawk 通信协议设计上,综合 RC 遥控器和程控代码两类指令数据帧格式。Pixhawk 接收的信息帧包含通用 RC 遥控器 1 至 6 通道的参数值,使用 uart 异

步串行通信数据帧格式设计为:

帧头+横滚值+俯仰值+油门值+偏航值+工作模式值+位置/增量开关+帧尾

Pixhawk 发送的信息帧除包含前六项通道值外,增加了飞行高度参数值。数据帧格式中的帧头和帧尾是异步通信时数据帧的起始和结束的标识;工作模式值用以选择解锁、自稳、悬停、锁定等工作模式;位置/增量开关值用以选择通道1至通道4参数指令是位置式给定值还是增量式给定值<sup>[7]</sup>。

pixhawk 接收数据帧格式的结构体代码如下:

```
typedef
struct{
uint16  header;          //帧头取值0xA5A5
int16   rollposition;    //横滚值取值范围-4 500 ~ 4 500
int16   pitchposition;   //俯仰值取值范围-4 500 ~ 4 500
int16   throttleposition; //油门值取值范围0 ~ 1 000
int16   yawposition;     //偏航值取值范围-4 500 ~ 4 500
.....
uint16  tail;           //帧尾取值0x5A5A
} pixhawk_rev_frame;
```

中央控制模块模仿 RC 遥控器解锁飞控,向 pixhawk 发送数据,中央控制模块代码如下:

```
rollposition=0;
pitchposition=0;
throttleposition=0;      //油门值取最小值0
yawposition=4500;        //偏航值取最大值4 500,
延时5 s后可以解锁
```

航行路径闭环控制回路的中央控制模块、视觉采集模块处理器芯片 STM32F103 均采用无实时操作系统支持的裸机编程,使用 STM32 Cube MX 工具开发。中央控制模块向视觉采集模块发送的数据帧格式设计为:

帧头+序号+时间+横滚值+俯仰值+偏航值+高度值+帧尾

数据帧信息包含时间信息,飞行器偏离目标路径范围过大并且视觉模块寻迹失败后,根据时间信息回顾历史路径轨迹信息,进而解算找回路径轨迹的方案。信息中包含姿态值、高度值,是用来补偿视觉模块解算当前路径轨迹的偏差。视觉采集模块向中央控制模块发送的数据帧格式设

计为:

帧头+序号+时间+位域区+横滚位置值+横滚速度值+俯仰位置值+俯仰速度值+偏航位置值+偏航速度值+帧尾

数据帧格式的位域区是用16个二进制位的低端10位表示10个逻辑状态,包括帧格式中横滚位置值等6个参数是否有效路径、轨迹在飞行器上下左右的4个位置状态。例如:第一帧数据用十六进制表示 A5A5 0100 0000 0A00 0000 4002 0000 0000 0000 0000 0000 0000 5A5A,十六进制数字 0000 0001 先发送 01 后发送 00 00 00。发送的十六进制数据 4002 对应的原始二进制 0000 0010 0100 0000 表示航行路径在飞行器的前方右方,后方左方无航行路径;后续横滚位置值等六个参数无效。

## 5 调试与结论

在检测与调试低空遥感平台时,依次按照平台机架系统、动力系统、指挥控制系统顺序进行。测试机架系统与动力系统时,使用自制实验装置,通过 RC 遥控器控制单一机翼旋转,测试升力  $N$ 、电机电枢电流  $I_m$ 、电机电枢电压  $U_m$ 、油门比例  $\sigma$ ,测得数值与理论计算 51.8% 基本相符<sup>[8-10]</sup>。

测试指挥控制系统时,先使用 RC 遥控器手动遥控飞行平台悬停、定高状态。通过地面站软件 Mission Planner 调整 pixhawk 的 PID 参数数值,然后再使用程控方式完成平台全自主作业的功能。调试过程中飞行平台原地爬升高度过低,那么 PID 环节中减弱积分环节。自稳状态过程中如果飞行平台向某一方向漂移速度过大,需要使用地面站软件重新校正三轴加速计初始值。pixhawk 双闭环 PID 调节中,经实验测得自稳状态下横滚速度内闭环控制比例系数  $P=0.170 0$ 、积分系数  $I=0.100 0$ 、微分系数  $D=0.004 0$ ;横滚位置外闭环控制比例系数  $P=4.500 0$ 、积分系数  $I=0$ 、微分系数  $D=0$ 。

平台全自主作业时,中央控制模块所在的航行路径闭环控制中,俯仰值范围是  $-4 500 \sim 4 500$ ,经实验测得,俯仰值  $pitch=-75$  时,平台前向俯仰角小于  $1^\circ$ ,航行速度适宜。平台全自主作业航行程控失败时,航行控制操作员将 RC 遥控器通道 5 参数选择降落模式,使平台紧急降落。如出现降落锁定失效时,航行控制操作员将 RC 遥控器的油门归零,偏航归最小,延时 5 s 以上完成手动锁定。

参考文献:

- [ 1 ] 葛佳琨,刘淑霞.数字农业的发展现状及展望[J].东北农业科学,2017,42(3):58-62.
- [ 2 ] 李新伟,田 敏,肖 新.基于小麦养分快速诊断的施肥决策与控制系统设计[J].东北农业科学,2019,44(2):23-27.
- [ 3 ] 桂淮濛.遥感技术在农业生产中的实际应用[J].农业工程,2019,9(2):22-24.
- [ 4 ] 李 丹.微型低空遥感平台研究与实践[J].价值工程,2020,39(4):236-237.
- [ 5 ] 刘建刚,赵春江,杨贵军,等.无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J].农业工程学报,2016,12(24):98-99.
- [ 6 ] 于文妍,杨坤林.四旋翼无人机串级模糊自适应PID控制系统设计[J].机械设计与制造,2019(1):227-231.
- [ 7 ] Xunhua Dai, Quan Quan, Jinrui Ren, et al. An Analytical Design Optimization Method for Electric Propulsion Systems of Multicopter UAVs with Desired Hovering Endurance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(1): 228-239.
- [ 8 ] 高德民,史东旭,薛 卫,等.基于物联网与低空遥感的农业病虫害监测技术研究[J].东北农业科学,2021,46(1):108-113.
- [ 9 ] 刘大众,刘升平,周国民,等.基于高光谱遥感监测小麦籽粒蛋白质含量的研究进展[J].东北农业科学,2020,45(4):108-112.
- [ 10 ] 于成龙.基于高光谱数据的主要农作物类型信息提取[J].东北农业科学,2019,44(3):45-51.

(责任编辑:王 昱)



(上接第 120 页)

**参考文献:**

- [ 1 ] 宗锦耀.农机专业合作社经理人[M].北京:中国农业科技出版社,2012:1-8.
- [ 2 ] 汪来喜.强力培植现代农业“二次飞跃”的新型经营主体[J].农业经济,2013(12):47-49.
- [ 3 ] 农业农村部农业机械化司.全国农业机械化统计年报[R].北京:农业农村部农业机械化司,2018.
- [ 4 ] 李斯华,李庆东.2015年全国农机合作社发展情况综述[J].中国农民合作社,2016(2):61.
- [ 5 ] 农业农村部农机化司.张桃林在2019年全国农业机械化工作会议上的讲话[EB/OL].(2019-03-16)[2020-08-18] <http://www.amic.agri.cn/secondLevelPage/info/52/75404>.
- [ 6 ] 李二超.我国农机合作社起源与发展阶段研究[J].中国农机化学报,2014,35(4):305-309.
- [ 7 ] 国彩同.对我国农机合作社发展的观察和思考[J].中国农民合作社,2013(6):50-52.
- [ 8 ] 吴 萍,曹光乔,刘小伟,等.对农机合作社服务综合化趋势的思考[J].农业经济,2018(10):54-56.
- [ 9 ] 赵新子,马 明.吉林农机合作社发展调查与思考[J].农机科技推广,2019(1):33-35.
- [ 10 ] 朱月浩,张晓辉,马根众,等.山东农机合作社的现状与分析[J].中国农机化学报,2019,39(1):111-115.
- [ 11 ] 温 芳.浅谈农机合作社规范化建设[J].农机质量与监督,2017(12):7-8.
- [ 12 ] 展昭海,胡胜德.我国农机合作社产权制度研究[J].学术交流,2016(2):123-127.
- [ 13 ] 昔 亮,李玉林,成 斌,等.农机合作社精益转型驱动因素及作用机理分析[J].江苏农业科学,2017,45(22):315-320.
- [ 14 ] 周 易,王 欧,唐 轲.我国农机合作社农机作业成本收益分析—基于区域和规模的比较[J].南京农业大学学报(社会科学版),2015,15(2):51-56,126.
- [ 15 ] 杨发展,李维华,王黎阳,等.大型农机专业合作社面临的问题与可持续发展策略研究—以山东农业生态区为例[J].中国农机化学报,2019,40(3):212-216.
- [ 16 ] 乔金友,李金鸿,洪 魁,等.黑龙江省各地市农机合作社总体绩效评价研究[J].农机化研究,2020,42(6):8-13.
- [ 17 ] 梁岚清,漆雁斌.基于DEA模型的四川省农机专业合作社经营效率研究[J].中国农机化学报,2018,39(3):87-92.
- [ 18 ] 张一豪,刘雨欣,姜天瑞,等.黑龙江省农机合作社助农增收绩效评价—基于DID模型的实证研究[J].农机化研究,2017,39(11):40-43.
- [ 19 ] 张永强,王 珅,蒲晨曦,等.黑龙江省克山县仁发合作社绩效评估研究[J].农业经济与管理,2018,50(4):68-76.
- [ 20 ] 何晓群.多元统计分析(第5版)[M].北京:中国人民大学出版社,2014:134-138.
- [ 21 ] 王 术,刘一明.农业机械化与区域农业可持续发展关系实证分析[J].农机化研究,2015,37(4):1-6.
- [ 22 ] 王扬光,田金明,温 芳,等.我国农机合作社发展历程及示范创建成效研究[J].中国农机化学报,2020,41(3):201-204,210.

(责任编辑:刘洪霞)