

基于网络 RTK 的离心式无人机变量施药可行性初探

漆海霞^{1,2,4}, 周靖康¹, 李承杰¹, 陈鹏超^{2,3}, 梁 钰¹, 黄桂珍¹, 邹 军¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 国家精准农业航空施药技术国际联合研究中心, 广州 510642;
3. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 4. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642)

摘 要: 针对植保无人机施药准确性和作业效率需求的提高, 验证网络实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)载波差分技术在无人机施药上的可行性, 设计了一种基于网络 RTK 的离心式变量施药系统。采用 STM32F103 为控制核心, 通过串口获取 GPS 定位信息, 并连接 DTU 模块实现网络 RTK 技术, 通过脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术调节占空比的大小, 从而调节离心喷头的转速以及蠕动泵的流量。系统在工作时, 通过农情信息完成处方图构建, 通过高精度 GPS 模块获取经纬度信息, 在施药过程中系统实时检索无人机所在位置, 调出处方决策信息, 按照处方信息调节离心喷头和蠕动泵的输出比例, 从而控制无人机的施药粒径大小和施药量大小, 并将作业数据上传至监控平台。通过试验表明系统能正确执行变量施药任务; 在使用离心喷头进行变量施药任务时, 受到系统稳定性和离心喷头特性的影响, 在处方交界区域会存在一个不稳定区域; 离心喷头在较高转速下进行变化时, 在处方交界区域粒径大小的变化越平滑。该结果满足预期试验设计, 可为植保无人机变量施药技术改良提供基础与参考。

关键词: 无人机; 网络 RTK; 施药; 植保; 脉宽调制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.010

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0081-09

漆海霞, 周靖康, 李承杰, 等. 基于网络 RTK 的离心式无人机变量施药可行性初探[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 81-89. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.010 http://www.tcsae.org

Qi Haixia, Zhou Jingkang, Li Chengjie, et al. Feasibility of variable rate spraying of centrifugal UAV using network RTK[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 81-89. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.010 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国的农田覆盖面积辽阔, 可达 1.5 亿 hm^2 , 但病虫害依然是国内农业发展所面临的一个重大问题。中国在病虫害防治中普遍采用农药的“粗放式”管理, 据统计中国单位面积的农药使用量是世界平均水平的 2.5 倍, 每年防治面积达到 4 亿~5 亿 hm^2 ^[1-2], 过量的使用农药不仅造成了农药利用率低, 还产生大量的农药残余, 造成严重的水污染, 使农产品品质下降、生态系统失衡, 甚至严重威胁食品安全^[3], 因此依照实际病虫害情况, 使用精准变量施药的方式, 可以在保证施药效果的情况下, 有效减少农药使用, 从而达到农药减施增效的目的。

近年来, 中国航空施药产业发展迅速, 与传统的人工施药和地面机械施药方式相比, 航空施药可以在丘陵和山地等人工和地面大型机械难以作业的区域进行喷施作业, 同时能快速应对大规模的突发性病虫害, 有效缓解农村劳动力不足, 减少作业人员与农药的直接接触, 具有其他农业机械不可替代的优势^[4-6]。针对不同的喷施要求, 与不同的喷施作业环境, 为了在达到最佳防治效果的同时, 又不造成农药浪费, 对无人机施药的准确性

和作业效率提出了较高要求^[7-11]。在植保作业过程中, 无人机施药量根据实时作业位置和作业处方图, 实时调节施药流量和施药粒径, 在保证施药效果的条件下, 实现按需变量施药, 能有效减少重喷漏喷等现象。实时作业处方位置的获取依赖于 GPS 位置信息的获取, 但是其精度不足以满足在实际农业生产应用中的需求, 因此为获取更高的精度而使用了实时差分技术(Real-Time Kinematic, RTK)^[12]。国内外学者对于变量施药技术与差分定位技术有很多研究, Thomas 等^[13]使用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术喷施农药, 使用了压力式喷头, 验证了 PWM 喷雾器与适当的压力组合能产生最佳的除草剂滴数, 并将数据储存在数据库用于精确农业的实践。Perez-Ruiz 等^[14]将使用安装了 GPS-RTK 装置的农机进行农作物地理空间制图, 实际地图误差为 2 cm, 95%以上的植株都长在生长植株半径为 5.58 cm 的圆内。Tewari 等^[15]研究了基于图像的可变速率的喷洒系统, 系统使用摄像机获取图像, 使用电脑进行图像数据处理, 并通过微处理器控制输出信号, 从而调节水泵输出, 使得化学药剂的使用量至少减少了 33%。罗锡文等^[16]将基于 RTK-GPS 的自动导航系统用在东方红 X-804 拖拉机上, 使用 PID 作为模型控制器, 在行驶速度为 0.8 m/s 时, 平均跟踪误差小于 0.03 m。王大帅等^[17]设计了一种基于 ARM 架构的植保无人机动态变量施药系统, 该系统能实现施药流量与飞行速度的自匹配, 实际流量与目标流量的偏差值为 1.9%, 喷嘴幅 5 m。徐颖章^[18]使用了 RTK 的

收稿日期: 2021-03-15 修订日期: 2021-04-23

基金项目: 广东省科技计划重点专项(2019B020214003); 广东省教育厅特色创新(2019KTCX015)。

作者简介: 漆海霞, 博士, 副教授, 主要研究方向为精准农业航空, 农业机器人, 物联网系统。Email: qihaxia_scau@126.com

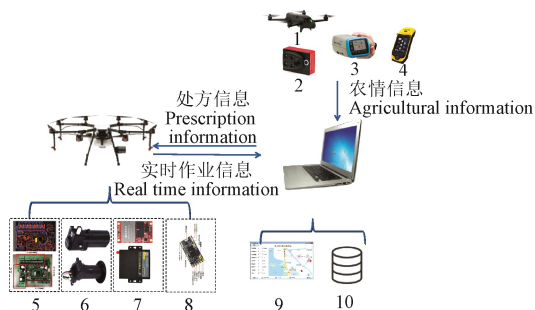
方式改善 GPS 定位精度,且 RTK 程序能够在硬件内存有限的情况下正常运行,并通过试验分析,能实现 1 cm 内级别的相对定位精度。张瑞瑞等^[19]设计了一种有人直升机变量施药系统,以 STM32 为系统主控器,完成速度与流量的采集,在飞行速度小于 160 km/h 时,误差在 10%以内。孙文峰等^[20]设计了一种基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统,该系统使用压力式喷头进行试验,通过神经网络 PID 控制算法修正控制参数,施药结果表明在不同速度下,雾滴沉积的标准差均小于 1.4 个/cm²,系统平均调节时间 0.72 s。目前国内外学者对于网络 RTK 技术和离心喷头的应用研究较少,网络 RTK 技术的优点是无需假设基准站,而是使用网络设备从数据处理中心的基准站网获取修正信息,基准站网甚至能在上百公里以外,突破了基站距离的限制,也减轻了基准站的架设费用^[21-24];与压力式喷雾不同,离心喷头的优点是液滴在离心力的作用下由转盘甩出,雾滴进入喷头时一般由重力作用流出,所以对水泵的压力需求不高,同时由于雾滴流出喷嘴的过程互不干涉,因此流量和粒径可以独立控制^[25-28]。

为提高无人机田间作业精度和作业效率,验证网络 RTK 技术在无人机施药上的可能性,本文设计了一种基于网络 RTK 的离心式无人机变量施药系统,并通过田间试验,分析处方交界区域施药量及粒径的变化情况,并验证施药装置的精度,对网络 RTK 技术以及离心式变量施药技术的改良提供方向和参考。

1 系统组成

1.1 系统总体方案设计

系统的组成如图 1 所示,包含处方图生成、机载硬件系统数据及控制信号处理和监控平台作业数据显示,首先由机载多光谱相机、地物波谱仪、手持式 GPS 仪获取农田农情信息分布,在上位电脑中使用 ArcGIS 软件生成作业处方图,然后通过机载硬件系统接收并处理传感器数据、根据处方信息执行具体施药指令,最后远程监控平台实时监控机载系统的运行状况,完成无人机变量施药任务。



1. 遥感无人机 2. 机载多光谱相机 3. 地物波谱仪 4. 手持式 GPS 仪 5. 变量施药系统主板 6. 变量施药执行装置 7. GPS 网络差分模块 8. 无线数传模块 9. 监控平台界面 10. 数据库
1. Remote sensing UAV 2. Airborne multispectral camera 3. Ground object spectrometer 4. Handheld GPS 5. Main board of variable application system 6. Variable application execution device 7. GPS network differential module 8. Wireless data transmission module 9. Monitoring platform interface 10. Database

图 1 系统组成图

Fig.1 System composition diagram

1.2 处方图生成

本研究使用无人机搭载多光谱相机以及地物波谱仪获取作物农情信息并转化为处方信息,使用手持 GPS 仪获取高精度的地面经纬度信息,根据农田位置的分布构建地块的 shapefile 文件,把处理后的处方信息录入到属性表中,同时进行网格化处理,并将处方图在符号化 (Symbology) 选项中按照处方信息值的大小进行显示。在进行试验前,将 shapefile 格式的文件导出为 CSV 文件,将文件中的位置数据、处方数据输入到变量施药系统主板中,施药过程中则根据实时 GPS 位置搜寻作业装置所在网格,并将网格中对应的处方数据进行提取,再控制变量施药装置执行。

1.3 机载系统硬件及软件设计

变量施药系统的硬件由变量施药系统主板、变量执行器、无线数传模块、GPS 网络差分模块组成。硬件系统组成如图 2 所示。

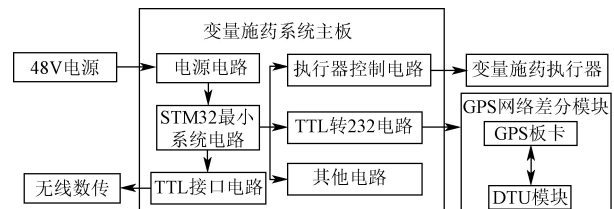


图 2 硬件系统组成

Fig.2 Composition of hardware system

该硬件系统搭载在植保无人机上,以施药系统主板为核心,通过网络 RTK 技术获取高精度的 GPS 定位信息,并调用出处方决策信息,按照处方信息及 GPS 数据调节变量施药执行装置参数,同时采用无线数传将无人机作业信息传输到远程监控平台中。

1.3.1 施药系统控制主板

本装置以 STM32F103VCT6 微处理器为核心,设计并制作了施药系统控制主板,完成高精度的位置信息采集、变量施药执行机构控制信号的输出、处方信息的解析、施药系统和上位机的信息交换等任务。板卡内部电路包含最小系统电路、电源电路、变量执行装置驱动电路和串口驱动电路等。

1.3.2 GPS 网络差分模块

网络差分模块包括高精度的 GPS 板卡和 DTU 模块, GPS 板卡使用上海司南导航生产的 K726 板卡,该板卡的输入电压为 3.3~5 V,使用双天线输入,支持 BDS B1/B2, GPS L1/L2, GLONASS L1/L2 三系统双频信号高精度测姿功能,RTK 解算后的精度能达到 1 cm,支持常用的数据格式;DTU 模块使用的是厦门四信通讯生产的 F2A16-DK 模块,支持全网频段,能实现上网功能。本研究采用千寻位置提供的网络 RTK 差分服务,可以提供 7×24 h 的水平精度 2 cm,高程精度为 4 cm 的实时定位服务。

网络差分具体实现的方式是通过司南导航 K726 板卡实现 GPS 原始数据的收集,在采集完 GPS 初始 GPGGA 数据后,板卡通过串口将该数据上传至厦门四信通讯

F2A16-DK 模块,该模块将通过拨号功能使用千寻位置提供的 FindCM 服务将 GPGGA 数据进行上传获取差分信息,并将差分数据通过串口传至 GPS 模块,最后 GPS 模块将解算后的 GPGGA (卫星定位信息) 信息和 GPVTG (地面速度信息) 信息通过另一串口上传至施药系统主板,施药系统主板提取 GPGGA 信息中的经纬度位置信息、定位信息状态信息和海拔高度信息,提取 GPVTG 信息中的地面速度信息,为保证数据获取的实时性和解析的准确性,在经过测试后将数据传输速度定为每 0.2 s 传输一次导航信息。

1.3.3 变量施药执行器

在本文中变量施药执行器由离心喷头和蠕动泵组成,其中通过控制离心喷头的转速来控制雾滴粒径,通过控制蠕动泵的转速来控制变量系统的施药量。

变量执行器中的喷头采用的是极飞科技生产的 P20 系列离心喷头和蠕动泵。两种设备控制方案相似,都是通过调节 STM32 处理器的 I/O 口输出的 PWM 信号,并通过的反相施密特触发器和场效应管将输出信号信号放大,从而控制离心喷头的转速和蠕动泵的流量。单路水泵/喷头控制电路图如图 3 所示。本设计的施药量和施药粒径的变化是通过蠕动泵和离心喷头的输出功率来控制的,将 PWM 波的输出频率固定为 1kHz,在试验过程中通过调整占空比的大小来控制蠕动泵和离心喷头输出功率,调节范围为 20%~80%。

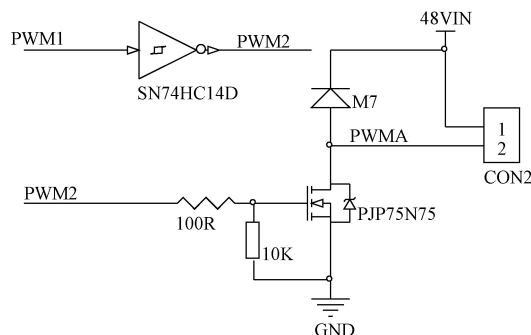


图3 单路水泵/喷头控制电路图

Fig.3 Single way water pump/nozzle control circuit diagram

1.3.4 无线数传模块

无线数传采用的是 DL-43 模块,DL-43 模块内部采用 CC2592 芯片和 CC2530F256 芯片,共 16 个信道,使用 IPEX 天线,有效传输距离可达 1 000 m,该模块能通过 AT 指令或者按键修改控制参数,具有低功耗、高性能等特点。

机载硬件系统与监控平台通过无线数传模块配置为点对点传输模式,实现监控平台与硬件系统的通讯,并确保上位机具有唯一控制权,在 DL-43 模块运行过程中,机载硬件向 DL-43 模块 A 端发送串口数据包,监控平台通过调用 DL-43 模块 B 端实时捕获串口数据,解析后显示到监控平台上。串口数据包如表 1 所示,各个数据之间由逗号隔开。

表1 串口数据包

Table 1 Serial port data packet

编号 Number	数据 Data	数据包 Data packet	信息来源
\$SSCAU	协议起始位	32bit	
<1>	经度,使用度数表达,保留小数点后 9 位	64bit	GPGGA 信息中提取并解析换算
<2>	纬度,使用度数表达,保留小数点后 9 位	64bit	GPGGA 信息中提取并解析换算
<3>	UTC 时间,格式为 hhmmss (时分秒)	32bit	GPGGA 信息中提取并解析换算
<4>	飞行速度/(m·s ⁻¹)	16bit	GPVTG 信息中提取并解析换算
<5>	作业温度/℃	16bit	在作业前通过气象站输入
<6>	作业湿度/%	16bit	在作业前通过气象站输入
<7>	飞行海拔高度/m	16bit	GPGGA 信息中提取并解析换算
<8>	施药量/(L·hm ⁻²)	16bit	实际执行信息中获取
<9>	粒径大小/μm	16bit	实际执行信息中获取

1.3.5 系统软件设计

变量控制系统的硬件程序是在 STM32F1 平台下开发的,具体的程序流程如图 4 所示。在系统启动时,先初始化各硬件串口等配置,读取处方信息,调用 GPS 子函数读取 GPGGA 数据并处理,判断是否进入差分,并获取准确的经纬度信息,检索出该位置的处方信息,将处方所给的施药量转化为 PWM 的占空比大小,通过调节 PWM 的占空比控制蠕动泵输出不同的施药量;将处方所给的目标粒径大小转化为目标转速大小,再将目标转速大小转化为 PWM 的占空比大小,通过调节 PWM 的占空比来控制离心喷头的转速。后通过无线数传传至上位机,在监控平台中完成数据的可视化处理,并将试验数据保存。

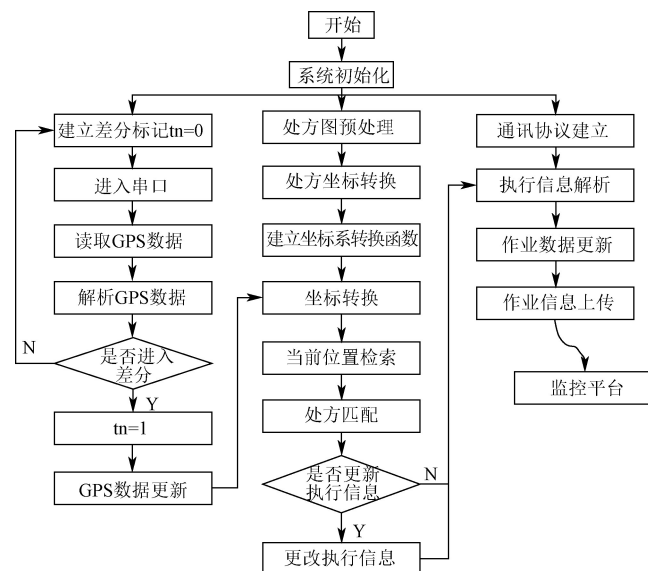


图4 系统软件设计流程图

Fig.4 Flow chart of system software design

本文是根据处方信息实现变量施药,因此在作业过程中,将根据提取的无人机作业位置信息进行网格识别。因此在获得施药系统经纬度信息后,采用坐标旋转和行列扫描的方式识别作业位置网格标号识别无人机作业位

置的网格标记。其中坐标旋转公式为^[29-30]。

$$\begin{cases} x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 x' , y' 为旋转后的经纬度, ($^{\circ}$); x , y 为 GPS 网络差分模块获取的原始 GPS 经纬度, ($^{\circ}$); α 为旋转前后坐标系间的夹角, ($^{\circ}$)。

经纬度坐标值转换结束后, 针对转换后的无人机作业位置坐标 (x', y'), 首先对无人机所在位置的经度进行行扫描, 当 $x_i \leq x' \leq x_{(i+1)}$ 时, 锁定作业位置行号 i ($0 < i \leq$ 行最大值); 后进行列扫描, 当 $y_j \leq y' \leq y_{(j+1)}$ 时, 锁定作业位置列号 j ($0 < j \leq$ 列最大值)。在检索到横坐标和纵坐标的行号和列号后, 通过读取网络标号即可查询到对应的处方施药决策信息。

1.4 监控平台软件

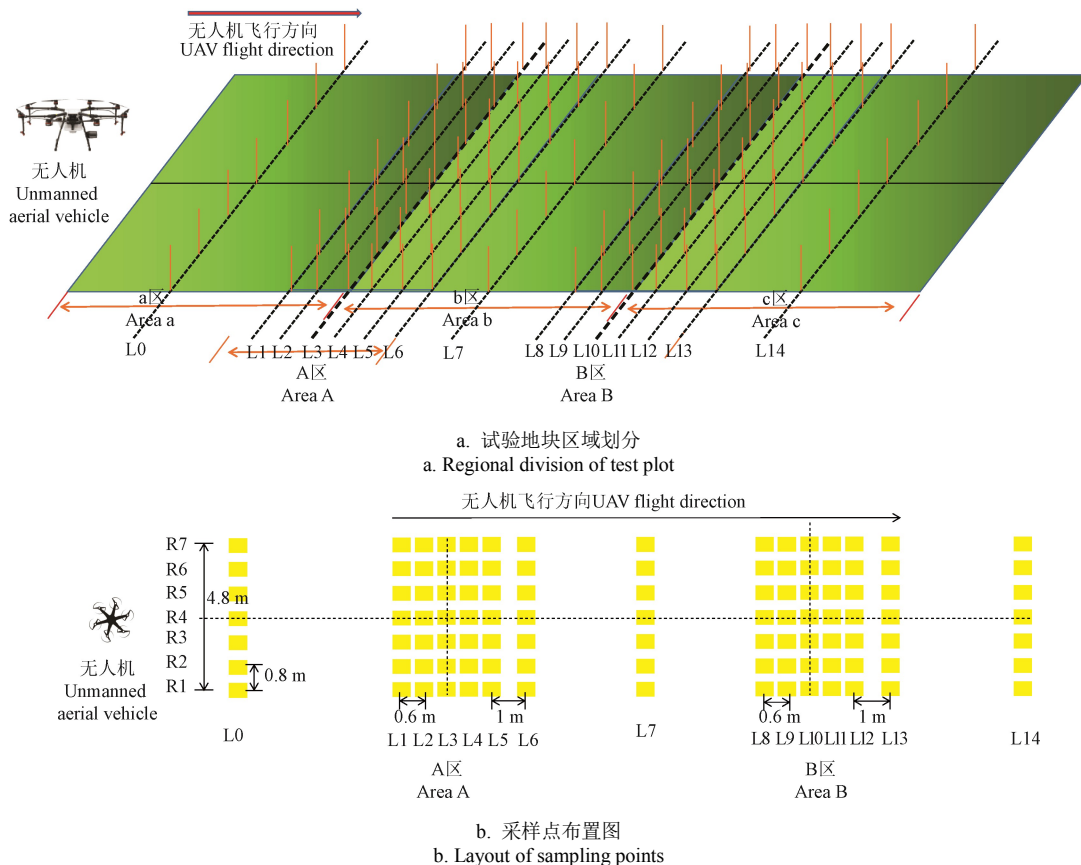
监控平台接收机载硬件系统发送的数据包, 通过提取数据包中指定数据来解析作业系统当前作业状态。系统所设计的采集监控平台, 用于显示无人机的实时作业状态, 通过调用串口数据的方式, 读取施药系统控制主板上上传的串口数据包, 串口数据包内容如表 1 所示, 将数据包解析后将数据显示在主界面中, 并通过 web 控件

连接百度地图的 API, 将经纬度信息进行实时解析并绘制作业轨迹。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与场地

试验于广东省广州市华南农业大学增城校区教学科研基地进行。试验地块的长度为 90 m, 宽度为 5 m, 该地块以行距为 0.6 m, 株距为 0.4 m 种植 3 种不同品种的玉米, 按照长 30 m, 宽 5 m 划分成 3 个处方区域, 如图 5a 所示。3 个不同的处方区域为 a 区, b 区和 c 区, 其中 a 区和 b 区的交界位置为处方交界 A 区域, 简称 A 区, b 区和 c 区的交界区域为处方交界 B 区域, 简称 B 区。其中 L3 和 L10 排为两个处方交界线, 即变量施药位置。每个区域的设定的不同施药量和目标粒径, 形成不同的处方信息, 采用 3 cm×8 cm 的水敏纸在处方交界地带布置采样点 (图 5b), 共布置 14×7 个采样点。其中 L1~L5, L8~L12 按照玉米的行距大小设置间距为 0.6 m, L5 与 L6、L12 与 L13 的排间间距为 1 m (含垄沟宽度), L0、L7、L14 在所处处方区域的中心, R1~R7 综合株距以及无人机喷幅设计列间间距为 0.8 m。



注: L_i ($i=0\sim14$) 表示采样点的行号; R_j ($j=1\sim7$) 表示采样点的列号; a 区、b 区、c 区为不同施药处方区域; A 区、B 区为不同施药处方区域的交界区域。
Note: L_i ($i=0\sim14$) are the line number of the sampling point; R_j ($j=1\sim7$) are the column number of sampling point; Area a, Area b, Area c are different prescription areas; Area A, Area B are the boundary area of different variable application area.

图 5 试验地块区域划分与采样点布置

Fig.5 Regional division of test plot and layout of sampling points

试验采用型号为大疆 MG-1P 的八旋翼无人机, 并挂载自研变量施药系统, 同时无人机的作业信息将会上传

至监控平台中。在试验过程中控制无人机距离作物 2 m 的高度进行施药作业, 以 2 m/s 的速度进行喷雾试验, 通

过水敏纸来测量在无人机处方交界地带 A 区和 B 区无人机施药量和施药粒径变化情况。

2.2 作业参数设计

此次试验主要是测试课题开发的无人机变量施药系统实际工作情况,试验通过改变处方区域的施药量、目标粒径大小来形成不同的处方信息进行变量施药试验。作业参数如表 2 所示,其中环境参数采用的是深圳市虹源博科技有限公司生产的 HberW6-3 便携

式微型自动气象站进行测量所得。试验时间为 2021 年 1 月 29 日,实验时平均气温约为 20 ℃,风向为偏北风。

如表 2 所示,试验组 G1、G2 调节的是施药量大小,G3、G4、G5 调节的是粒径大小,G6 为对照组。其中,本研究主要通过分析 DV0.5 来研究作业系统施药粒径变化情况,DV0.5 的含义是按照雾滴中值粒径从小到大进行排序,位于 50%位置的雾滴中径的值,μm。

表 2 试验参数表

Table 2 Test parameters table

试验组号 Test No.	风速 Wind speed/ (m·s ⁻¹)	a 区 Area a		b 区 Area b		c 区 Area c	
		施药量 Application amount/ (L·hm ⁻²)	粒径 Particle size/ μm	施药量 Application amount/ (L·hm ⁻²)	粒径 Particle size/μm	施药量 Application amount/ (L·hm ⁻²)	粒径 Particle size/μm
G1	1.00	7.0	150	8.0	150	8.5	150
G2	1.72	8.5	150	9.0	150	10.0	150
G3	0.77	8.0	270	8.0	240	8.0	210
G4	1.73	8.0	210	8.0	170	8.0	150
G5	1.26	8.0	150	8.0	130	8.0	110
G6(对照组) G6(Control group)	1.22	0.0	0	8.0	150	0.0	0

2.3 实际的采集及处理

在采集完成每一组数据后,待雾滴干燥后,按照编号收集放入密封袋中,等施药结束后带回实验室进行处理。将采集的水敏纸逐一用试验室的 hp4678 扫描仪进行扫描,图像采集后通过 DepositScan 对每个采样区域的水敏纸进行分析,可以获得每一个采样点的沉积量、覆盖密度和粒径大小。其中雾滴的沉积量是通过雾滴的体积来计算的,雾滴体积的计算公式为

$$V = \frac{\pi}{6} d^3 \quad (2)$$

式中 V 为单个雾滴的体积,μm³; d 为雾滴的直径,μm。而单位面积内的雾滴沉积量则为采样面积内的雾滴体积累加^[31]。

本研究的喷雾均匀性由沉积性的变异系数表示,由各个采样区域的沉积量计算得出,其计算公式为

$$C = S / \bar{X} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{其中, } S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}$$

式中 C 为变异系数,%; S 为雾滴沉积量标准差,μL/cm²; X_i 为各采集点沉积量,μL/cm²; \bar{X} 为采用区域雾滴平均沉积量,μL/cm²; n 为采样区域有效采集点个数。

3 结果与分析

3.1 不同占空比对流量和粒径的影响

为了分析不同占空比下蠕动泵流量以及离心喷头转速的关系,在进行施药试验之前使用量杯以及转速仪对施药执行机构进行标定,试验所得的部分占空比与施药量以及喷头转速的关系如表 3 所示。

表 3 占空比与蠕动泵流量及喷头转速关系

Table 3 Relationship between duty cycle and flow of peristaltic pump and nozzle speed

占空比 Duty cycle /%	蠕动泵流量 Flow of peristaltic pump/(mL·min ⁻¹)	离心喷头转速 Rotating speed of centrifugal nozzle/(r·min ⁻¹)
20	320	5 000
22	380	6 000
25	460	7 000
33	600	10 000
40	750	12 000
50	850	14 000
60	900	15 000

通过表 3 中的数值可以得出不同占空比下水泵和喷头的拟合函数:

$$\begin{cases} y_1 = -0.242p^2 + 34.01p - 241.16, R_1^2 = 0.9859 \\ y_2 = 1127.3p + 4000, R_2^2 = 0.9928 \end{cases} \quad (4)$$

式中 y_1 为蠕动泵流量,mL/min; y_2 为离心喷头转速,r/min; p 为占空比,%; R_1^2 , R_2^2 为拟合函数的拟合程度。

由于离心喷头的转速会影响施药粒径的大小,因此在试验室内模拟无人机作业高度、作业风场使用水敏纸测试了喷头转速与粒径的关系,部分结果如表 4 所示。

表 4 转速与粒径的关系

Table 4 Relationship between rotating speed and particle size

离心喷头转速 Rotating speed of centrifugal nozzle/(r·min ⁻¹)	DV0.5/μm
5 000	219.6
6 000	194.9
7 000	175.5
10 000	123.2
12 000	111.6
14 000	104.0
15 000	100.8

注: DV0.5 是粒径中值,表示粒径大小。

note: DV0.5 is the median particle size, indicating the particle size.

通过表 4 可得不同离心喷头转速下施药粒径的拟合函数:

$$y=-118.2\ln(N)+1229.1, \quad R^2=0.9489 \quad (5)$$

式中 y 为施药粒径大小, μm ; N 为离心喷头转速, r/min ; R 为拟合函数拟合程度。

本文设计的施药装置在作业时, 将读取处方中目标施药量和目标粒径后通过式 (4) 和式 (5) 转化为不同的 PWM 波占空比, 从而执行施药决策。

3.2 施药精度分析

通过对照试验组 G6 来确定施药系统的施药精度, 参照《农业航空作业质量技术》中的指标, 超低容量的农药喷洒时雾滴覆盖密度应大于 $10\text{ 个}/\text{cm}^2$, 如表 5 所示, 试验中雾滴覆盖密度大于 $10\text{ 个}/\text{cm}^2$ 的采集点为有效采集点, 由图 5b 可知垂直于飞行方向的采集点 R1~R7 的间距为 0.8 m , 考虑到作业无人机在 L5、L6、L9、L10、L11 的有效覆盖点的数量都在 4 个及以上, 且 L7 排采集点的边缘位置 R2 和 R4, 以及 L8 排的采集点的边缘位置 R4 和 R6 的雾滴覆盖密度都大于 $40\text{ 个}/\text{cm}^2$, 因此 L7 排与 L8 排可能是由于采集时下旋风场过大, 且水敏纸布置方式不佳, 导致水敏纸向下弯曲程度过大, 同时采集边缘位置本身雾滴较少, 导致采集雾滴数量较少而出现了误差。综上, 本次试验无人机的列间有效采集点为 4~5 个, 有效喷幅为 $2.4\sim3.2\text{ m}$ 。

表 5 试验组 G6 雾滴覆盖密度统计
Table 5 Statistics of droplet coverage density of test G6
个·cm⁻²

采样行号 Sampling point line number	采样点列号 Sampling point column number						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
L1	0.6	0.9	0.9	1	0.3	0.4	1.9
L2	2.3	2.1	1.4	1.3	1.1	0.6	5.4
L3	1.2	4.2	1.7	10.2	32.1	7.5	1.1
L4	1.1	4.8	9.2	14	21	15.1	3.6
L5	2.9	11.1	37.5	0.9	38.1	14.4	2.6
L6	1.8	25.3	128	19.6	11.5	2	0
L7	3.6	72.9	19.5	89	2.3	1.1	1.3
L8	0.2	1.2	9	46.3	37.5	42.2	6.4
L9	1.4	0.2	13.4	86.7	45.1	22.7	4.6
L10	0.1	0.2	25.7	63.7	63.4	17.4	3.4
L11	0	0.1	14.3	10.2	43.6	18.4	2.4
L12	0.4	0	0	0	18	4	1.6
L13	0.7	0.2	1.7	1	0.1	0	0.4

根据表 2 中 G6 组的处方信息可知施药装置在由 a 区进入 b 区后开始施药, 进入 c 区后停止施药, 由图 5a 可知预设变量施药点分别在 L3 和 L10, 由表 5 知在 A 区在 L3 出现有效采集点, 在 L3、L4 有效采集点的覆盖密度为 $10\sim32\text{ 个}/\text{cm}^2$, 考虑到药液在离心喷头作用下会沿着转盘边缘呈螺旋线状喷出的特性, 可以得出施药装置在 L3 与 L4 之间开始执行施药, 且雾滴的覆盖密度随着系统的稳定而逐渐增加; 在 B 区域在 L8、L9、L10 的有效采集点的覆盖密度为 $13\sim86\text{ 个}/\text{cm}^2$, 在 L11 的有效采集

点的覆盖密度为 $10\sim43\text{ 个}/\text{cm}^2$, 覆盖密度大小呈现较明显下降趋势, 且 L12 只在 1 个采集点大于 $10\text{ 个}/\text{cm}^2$, 因此施药系统在 L10 与 L11 之间停止施药。由于本研究设计变量施药位置在 L3 与 L10, 作业速度为 2 m/s , L1~L5、L8~L12 列间间距为 0.6 m , 由此判断施药系统的精度在 0.6 m 以内, 处方解析与执行时间小于 0.3 s 。

3.3 雾滴沉积量分布

在不同有效采集点采集到的施药沉积量以及雾滴均匀性如表 6 所示, 其中由于 L0、L7、L14 采集点位于当前处方区域中心位置, 距离前后处方变换区域有一定距离, 施药状态已稳定, 故用 L0、L7、L14 检测施药系统在处方区域的实际施药情况。在 G1 组试验中 L0 的平均沉积量为 $0.0736\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 略高于预设值 $0.07\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, L7 的平均沉积量为 $0.0776\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 略低于预设值 $0.08\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, L14 的平均沉积量为 $0.0858\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 略微高于预设值 $0.085\text{ }\mu\text{L}/\text{cm}^2$, 因此在该 G1 组试验过程中变量施药系统能按照处方值进行变量施药作业, 同理 G2 组也满足条件, 即本文设计的变量施药系统能正常执行施药决策。

表 6 雾滴沉积分布统计
Table 6 Distribution statistics of droplet deposition

试验组别 Test No.	采集位置 Location	总沉积量 Total deposition/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	平均沉积量 Average deposition/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	雾滴分布均匀性 Droplet distribution uniformity/%
G1	L0	0.368	0.073 60	76
	L1	0.379	0.094 75	78
	L2	0.358	0.089 50	77
	L3	0.385	0.096 25	70
	L4	0.361	0.090 25	83
	L5	0.428	0.107 00	34
	L6	0.375	0.075 00	75
	L7	0.388	0.077 60	68
	L8	0.380	0.095 00	78
	L9	0.411	0.102 75	67
	L10	0.394	0.098 50	76
	L11	0.422	0.105 50	64
	L12	0.402	0.100 50	68
	L13	0.421	0.084 20	69
	L14	0.429	0.085 80	51
G2	L0	0.429	0.085 80	58
	L1	0.391	0.097 75	67
	L2	0.416	0.083 20	72
	L3	0.410	0.082 00	75
	L4	0.422	0.084 40	73
	L5	0.463	0.092 60	52
	L6	0.452	0.090 38	45
	L7	0.463	0.092 60	67
	L8	0.428	0.107 00	63
	L9	0.511	0.102 20	84
	L10	0.447	0.111 75	54
	L11	0.468	0.156 00	78
	L12	0.462	0.115 50	75
	L13	0.547	0.109 40	75
	L14	0.542	0.108 40	81

由表 6 可知, 在 A 区和 B 区的 L1~L5、L8~L12 区域的施药量出现明显的波动, 因此存在一个不稳定区

域,施药与前后处方区域的预设值相差较大,这是主要是由两部分原因组成:施药系统在进入处方变量点 L3、L10 后,目标施药量大小发生了变化,施药系统无法立即进入稳定状态;由于离心喷头的施药特性,在作业时离心喷头能同时影响前后几列采集点的雾滴沉积情况,因此造成部分区域的沉积效果出现较大震荡。

在 G1 组试验中, L6 的平均沉积量为 $0.075 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 比 L7 的平均沉积量少 $0.0026 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, L13 的平均沉积量为 $0.0842 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 比 L14 的平均沉积量少 $0.0016 \mu\text{L}/\text{cm}^2$; 在 G2 组试验中, L6 平均沉积量为 $0.09038 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 比 L7 的平均沉积量少 $0.00228 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 在 L13 平均沉积量为 $0.1094 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 比 L14 的平均沉积量多 $0.001 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 均相差不大, 因此可以判断无人机在 L6、L13 的位置时施药量的增加已经趋于稳定, 结合采样点的布置方法图 5b 可知 L6、L13 位置距离变量施药位置 L3、L10 的距离是 2.2 m, 由此判断本文研究的变量施药系统的施药量能在 2.2 m 内趋向稳定。

3.4 雾滴粒径大小

分析 G3、G4、G5 组的试验数据, 验证试验装置是否能根据处方信息实现变粒径施药。如表 7 所示为 G3、G4、G5 组试验处于各处方栅格中心 L0、L7、L14 的 DV0.5 情况, 各处方区域的粒径大小均随着目标值的减少而减少, 与预设处方值相符, 说明本课题组研制的变量施药系统能实现变粒径的变量施药。同时实际平均粒径和目标粒径的偏差值会随着目标粒径大小的减小而增加, 这是由于雾滴的粒径大小由离心喷头的转速来控制的, 在目标粒径足够小的情况下, 受气象等外界因素的影响, 实际的粒径变化并不会随着转速的增加呈线性变化, 导致偏差增加。

表 7 各采样位置粒径分析

试验组别 Test No.	采样位置 Sampling location	实际平均粒径 Actual average particle size/ μm	目标粒径 Target particle size/ μm	偏差 Deviation/%
G3	L0	281	270	4.07
	L7	252	240	5.00
	L14	218	210	3.81
G4	L0	223	210	6.67
	L7	185	170	8.82
	L14	164	150	9.33
G5	L0	163	150	8.67
	L7	151	130	16.15
	L14	127	110	15.45

如图 6 所示为 G3、G4、G5 组不同采集位置的平均 DV0.5 大小, 其中 L3、L10 为处方变换点, 雾滴在经过变换点后, 在 L4~L6 和 L11~L13 采样位置雾滴粒径大小都有不同程度的波动, 相较于 L7 和 L14 采样位置粒径普遍偏大, 这种现象在目标粒径较大的组别如 G3 组和 G4 组较为明显, 对于目标粒径较小的 G5 组影响较小, 因此在转速相对较小时, 施药系统喷头转速的增加会在处方交界区域产生较为明显的震荡, 粒径大小呈现波动

下降的趋势, 而在转速较大时, 粒径大小能以更平滑的方式趋于稳定。

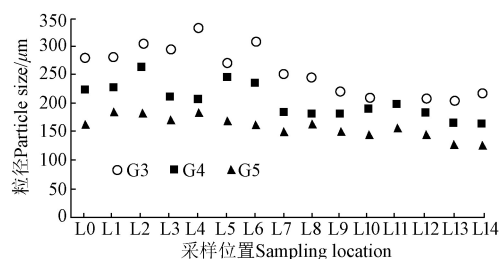


图 6 不同试验组别 DV0.5 分布图

Fig.6 DV0.5 distribution of different test groups

4 结论与展望

本文以 STM32F103 为平台设计并搭建了基于网络 RTK 的变量施药硬件及软件, 并通过田间试验得到以下结论:

1) 本文设计了一种基于网络 RTK 的变量施药装置, 该装置能通过 GPS 模块和 DTU 模块实现网络 RTK 技术, 通过 ArcGIS 软件和农情信息生成处方图, 通过位置匹配检索无人机处方信息, 并根据处方信息执行施药决策, 并通过试验采集了处方区域的雾滴沉积数据, 验证了该装置能执行变量施药任务;

2) 在使用离心喷头进行变量施药时, 由于施药系统的稳定性和离心喷头的施药特性, 处方交界区域的施药沉积会有较大的波动值, 无法立即达到稳定状态, 因此在使用离心喷头进行变量施药时应该考虑不稳定区域的宽度。

3) 在使用离心喷头进行变粒径试验时, 实际粒径会随目标粒径减小, 但是粒径大小的变化并未呈线性变化, 粒径越小偏差值越大, 这是由于在粒径过小时, 更容易受到作业环境的影响; 同时离心喷头在较高转速下进行变量作业时, 处方交界区域的粒径变化较平缓;

本文将网络 RTK 技术与无人机变量施药技术结合, 验证了网络 RTK 技术在田间运用的可能性, 并通过试验研究了离心喷头在处方交界位置的药液及粒径分布情况, 该变量施药装置的变量精度在 0.6 m 以内, 执行与解析时间约为 0.3 s, 能在 2.2 m 以内达到稳定状态, 这与测试方法、网络速率、作业速度、系统执行和解析时间都有较大关系。在下一步的研究中; 将通过其他联网方式进行网络差分运算, 避免在田间因为 DTU 网络连接信号较差而出现的误差; 同时根据作业速度、系统执行与解析时间等计算出施药装置的提前量, 并通过提前量的设置, 提高施药的准确性。

[参 考 文 献]

- [1] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
Yuan Huizhu, Yang Daibin, Yan Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese with English abstract)
- [2] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展[J]. 农药学学

- 报, 2019, 21(5/6): 921-930.
- He Xiongkui. Research and development of crop protection machinery and chemical application technology in China[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2019, 21(5/6): 921-930. (in Chinese with English abstract)
- [3] 兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 217-225. Lan Yubin, Chen Shengde, Deng Jizhong, et al. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 217-225. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [5] Xue X Y, Lan Y B, Sun Z, et al. Development an un-manned aerial vehicle based automatic aerial spraying system[J]. Comp Electr Agric, 2016, 128: 58-66.
- [6] Huang Y, Thomson S J. Characterization of spray deposition and drift from a low drift nozzle for aerial application at different application altitudes[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2011, 4(4): 28-33.
- [7] Lan Y B, Chen S D, Fritz B K. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies[J]. Int J Agric Biol Eng, 2017, 10(3): 1-17.
- [8] 廖娟, 臧英, 周志艳, 等. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 38-46. Liao Juan, Zang Ying, Zhou Zhiyan, et al. Quality evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 38-46. (in Chinese with English abstract)
- [9] Qi H, Lin Z, Zhou J, et al. Effect of temperature and humidity on droplet deposition of unmanned agricultural aircraft system[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 41-49.
- [10] 何勇, 吴剑坚, 方慧, 等. 植保无人机雾滴沉积效果研究综述[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 392-398, 515. He Yong, Wu Jianjian, Fang Hui, et al. Research on deposition effect of droplets based on plant protection unmanned aerial vehicle: A review[J]. Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci, 2018, 44(4): 392-398, 515. (in Chinese with English abstract)
- [11] Campos J, Gallart M, Llop J, et al. On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards[J]. Agronomy, 2020, 10(1): 102.
- [12] 潘冉冉. 基于 RTK 的农机精准定位系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. Pan Ranran. Research on Agricultural Machinery Precision Positioning System Based on RTK[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [13] Thomas R B, Chase A S, Lucas X F, et al. Optimum droplet size using a pulse-width modulation sprayer for applications of 2,4-D choline plus glyphosate[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1-8.
- [14] Perez-Ruiz M, Slaughter D C, Gliever C, et al. Tractor-based Real-time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS) guidance system for geospatial mapping of row crop transplant[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 64-71.
- [15] Tewari V K, Pareek C M, Lal G, et al. Image processing based real-time variable-rate chemical spraying system for disease control in paddy crop[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2020, 4: 21-30.
- [16] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动驾驶控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145. Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86-93. (in Chinese with English abstract)
- [18] 徐颖章. 基于 RTK 的高精度无人机定位导航技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018. Xu Yingzhang. Research on High-precision Positioning and Navigation System of UAV Based on RTK[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张瑞瑞, 李杨, 伊铜川, 等. 有人直升机变量施药控制系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 124-127. Zhang Ruirui, Li Yang, Yi Tongchuan, et al. Design and experiments of control system of variable pesticide application for manned helicopter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 124-127. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙文峰, 刘海洋, 王润涛, 等. 基于神经网络整定的 PID 控制变量施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 55-64, 94. Sun Wenfeng, Liu Haiyang, Wang Runtao, et al. Design and experiment of PID control variable application system based on neural network tuning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 55-64, 94. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郝明. 北斗导航载波相位差分定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017. Hao Ming. Research on Carrier Phase Difference Positioning Technique of BeiDou Navigation Satellite System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张家慧. 基于载波相位实时动态差分的 GPS 精确定位系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015. Zhang Jiahui. Research on GPS Carrier Phase Real Time Kinematic Precise Positioning System[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] 鲁烨超, 梁冬泰, 梁丹, 等. 室外移动机器人的惯导/网络 RTK 组合自定位研究[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 12-17, 23. Lu Yechao, Liang Dongtai, Liang Dan, et al. Inertial/Network RTK Combined positioning researched on outdoor mobile robot[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(5): 12-17, 23. (in Chinese with English abstract)
- [24] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 北斗三频宽巷组合网络 RTK 单历元定位方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6): 641-648. Gao Wang, Gao Chengfa, Pan Shuguo, et al. Single-epoch positioning method in network RTK with BDS triple-frequency wide lane combinations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(6): 641-648. (in Chinese with English abstract)
- [25] 何勇, 肖舒裴, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 113-124.

- He Yong, Xiao Shupe, Fang Hui, et al. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 113-124. (in Chinese with English abstract)
- [26] 郭一鸣. 速度自适应的无人机变量施药系统研究与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- Guo Yiming. Research and Experiment of Velocity Adaptive Variable Pesticide Application System for UAV[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [27] 漆海霞, 陈鹏超, 兰玉彬, 等. 不同电动植保无人机稻田雾滴沉积分布试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(9): 147-151.
- Qi Haixia, Chen Pengchao, Lan Yubin, et al. Experimental study on droplet deposit distribution of different electric UAVs in rice fields[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(9): 147-151. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王玲, 兰玉彬, Hoffmann W C, 等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 15-22.
- Wang Ling, Lan Yubin, Hoffmann W C, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 15-22. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王利霞, 张书慧, 马成林, 等. 基于 ARM 的变量喷药控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 113-118.
- Wang Lixia, Zhang Shuhui, Ma Chenglin, et al. Design of variable spraying system based on ARM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 113-118. (in Chinese with English abstract)
- [30] 高锐涛, 单建, 杨洲, 等. 植保无人机变量喷雾处方图实时解译系统的设计与试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(1): 361-374.
- Gao Ruitao, Shan Jian, Yang Zhou, et al. Real-time interpretation system of variable spray prescription map based on plant protection UAV[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2020, 50(1): 361-374. (in Chinese with English abstract)
- [31] Zhu H P, Salyani M, Fox R D. A portable scanning system for evaluation of spray deposit distribution[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(1): 38-43.

Feasibility of variable rate spraying of centrifugal UAV using network RTK

Qi Haixia^{1,2,4}, Zhou Jinggang¹, Li Chengjie¹, Chen Pengchao^{2,3}, Liang Yu¹, Huang Guizhen¹, Zou Jun¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. National Center for International Collaboration Research on Precision Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology, Guangzhou 510642, China; 3. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have widely been served as a new technology in agricultural aviation plant protection and pest control in China. However, it is highly demanded to improve the accuracy of UAV spraying pesticides and operational efficiency. In this study, a Variable Rate Application (VRA) of a centrifugal spraying system was designed for precise placement and timing of pesticide application in specific field conditions using the network Real-Time Kinematic (RTK) technology. STM32F103 single-chip microcomputer was used for the core controller. A serial port of controller was selected to obtain the global position system (GPS) information. A network modular Data Terminal Unit (DTU) was connected to realize the network RTK technology via the serial port of the controller. The control voltage was used to tailor the speeds of the centrifugal nozzle motor and peristaltic pump. A Pulse Width Modulation (PWM) was used to control the output voltage from the core controller to the armature of motors in this system. The speed of the centrifugal nozzle motor determined the output droplet size, while the speed of peristaltic pump determined the flow rate and amount of spray fog. The agricultural dataset before the system working was acquired using the airborne multispectral camera, ground object spectrometer, and handheld GPS. A prescription chart was also constructed using ArcGIS software. In the system working, the GPS modular was used to capture the location longitude and latitude data for the system to read and analyze. The system was always real-time searching the UAV geographical position during the spraying pesticides process using the GPS data, and then matching the position using the orthogonal grid. Meanwhile, the system was used to real-time tailor the changes in the duty cycle of output PWM, after matching the decision of the prescription map. The speeds of the centrifugal nozzle motor and the peristaltic pump were then to control the particle size and application amount of the UAV. The operation data was finally uploaded to the monitoring platform for real-time display and storage. Several spraying experiments were carried out in the research base of South China Agricultural University in Zengcheng City, Guangdong Province of China. The airborne spraying device was carried on the MG-1p plant protection UAV using a developed DJI Drone. The sampling points of droplets were set to match the planting density of crops, where the water-sensitive paper was used to collect the droplet data. After UAV operation, the water sensitive paper was collected into a plastic bag for later use. An hp4678 scanner was selected to map the collected water-sensitive paper after the experiment. A DepositScan software was utilized to analyze the water-sensitive paper in each sampling area after image acquisition. A detailed dataset was obtained, including the deposition amount, coverage density, and particle size of droplets. The data demonstrated that the accuracy of the device was within 0.6 m at the operating speed of 2 m/s. The application effect was finally stabilized within 2.2 m in the case of continuous operation. Particle size varied smoothly in the boundary area of prescription, as the rotating speed of the centrifugal nozzle increased. The findings can provide a sound basis for the improvement of variable application technology of plant protection UAV in precise agriculture.

Keywords: UAV; Network RTK; spraying; plant protection; pulse width modulation