

无人机喷雾质量检测系统设计与试验

李民赞 李欣泽 杨 玮 郝子源

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了检测与无人机喷雾质量相关的雾滴参数,并将其应用于各种复杂环境,设计了一种基于水性丙烯酸树脂和数字图像处理技术的无人机喷雾质量检测系统。该系统由雾滴采样模块、图像采集模块、图像处理模块、无线通信模块、图像和数据存储模块、数据显示模块组成。利用水性丙烯酸树脂在遇到水时会发生变色反应这一特性,将其制成雾滴采样模块,并对雾滴采集装置上的雾滴图像进行获取,随后利用数字图像处理技术对雾滴图像进行处理,计算得出雾滴参数。在农田环境下,通过无人机喷雾试验对系统的性能进行了评价。该系统可实时检测雾滴粒径、雾滴沉积密度、雾滴覆盖率等4种雾滴参数,从而实现对无人机喷雾质量的检测。初步试验结果表明,系统运行稳定,系统检测结果分布曲线与水敏纸法检测结果分布曲线基本一致,能够及时、准确地检测无人机喷雾质量。

关键词: 无人机; 喷雾质量; 水性丙烯酸树脂; 数字图像处理; 水敏纸

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0036-07

Design and Experiment of UAV Spray Quality Detection System

LI Minzan LI Xinze YANG Wei HAO Ziyuan

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to detect the fog droplet parameters related to the unmanned aerial vehicle (UAV) spray quality and its application in a variety of complex environments, a spray quality testing system for UAV based on waterborne acrylic resin and digital image processing technology was designed. The system consisted of droplet sampling module, image acquisition module, image processing module, wireless communication module, image and data storage module, and data display module. Among them, the water-based acrylic resin would have discoloration reaction when it met water, and it was made into a fog drop sampling module, and the fog drop image of the fog drop collection device was obtained, and then the digital image processing technology was used to process the fog drop image, and the fog drop parameters were calculated. The performance of the system was evaluated by UAV spray test in farmland environment. The system can detect two droplet sizes, droplet deposition density and droplet coverage rate in real time, so as to realize the detection of UAV spray quality. The preliminary experimental results showed that the system ran stably, and the distribution curve of detection results of the system was consistent with that of the water sensitive paper method on the whole. And it can timely and accurately detect the quality of UAV spray. The research results can provide data support for the further development of UAV automatic spray system and aviation drug application decision system.

Key words: unmanned aerial vehicle; spray quality; waterborne acrylic resin; digital image processing; water sensitive paper

收稿日期: 2021-07-02 修回日期: 2021-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200700-2016YFD0200706)

作者简介: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

通信作者: 杨玮(1981—),女,副教授,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: cauyw@cau.edu.cn

0 引言

由于无人机具有运行成本低、灵活操作等优势,小型无人机喷洒农用药剂已成为发展趋势。然而由于天气因素和地形因素影响无人机喷洒的效果,单一使用无人机进行喷洒操作,无法准确了解农田作物对农药的接收状态,即无人机喷雾质量^[1-6]。

杨玮等^[7]基于变介电常数电容器原理和传感器网络技术,通过 LWS 型传感器测量叶片湿度并建立叶片湿度和雾滴沉积量的回归方程,设计了雾滴检测系统用于检测无人机喷雾雾滴质量。FOX 等^[8]通过对不同雾滴参数的雾滴落在水敏纸上发生的变色效果不同,对水敏纸的颜色变化进行了视觉评级,研究了基于图像处理技术和水敏试纸的药液沉积分析系统。陈菁菁等^[9]在喷雾溶液中使用荧光染色剂,用蒸馏水洗脱叶片上沉积的药液,通过检测洗脱溶液的荧光剂浓度来得到雾滴的沉积量,该方法的洗脱效果直接决定检测结果。曹军琳等^[10]采用 Otsu 算法对叶片图像进行处理,研究叶片表面形态特征、雾滴粒径和叶片倾角对雾滴沉积分布的影响。冯帅辉^[11]通过光谱方法采集雾滴沉积,建立荧光光谱归一化强度与雾滴覆盖率和体积率的线性模型,开发了航空施药雾滴沉积光谱检测系统。张瑞瑞等^[12]和 BRADLEY 等^[13]对示踪剂进行了实验室评估,研究了通过雾滴获取介质上的荧光示踪剂产生荧光效应的光谱平均值与雾滴沉积参数呈显著正相关的方法,建立雾滴沉积特性参数的检测多元线性回归模型。但目前无人机喷雾质量检测多数只研究了施药雾滴的沉积量,而实际无人机进行植保作业时,雾滴粒径、喷雾范围、雾滴覆盖率、雾滴沉积密度等雾滴参数也对无人机喷雾质量的评估起着重要影响。传统检测雾滴沉积的方法多采用水敏纸放置在农田中进行检测,在测试结束对水敏试纸进行回收时,水敏纸的检测结果很容易受人为操作产生的斑痕的影响。

传统的雾滴沉积分布特性检测成本较高且实时性较差,这使得无人机施药的喷洒效果不能及时获取。而将水性丙烯酸树脂印刷在聚乙烯板上,由于水性丙烯酸树脂遇水变透明,从而露出下方的红色聚乙烯板,从而产生显色效果且变色可逆。既可以保障雾滴沉积的可视化获取,又可以解决传统水敏纸采样变色不可逆造成的资源浪费和采样成本高昂问题。因此本文建立一种基于水性丙烯酸树脂的无人机喷雾质量检测系统。通过基于 Android 的上位机 APP 实现对无人机喷雾质量的远程检测。可同时检测多种雾滴数据,且检测系统可多次重复使用,

在无人机喷洒现场即可快速获取雾滴沉积效果。

1 材料与方法

1.1 系统结构

无人机喷雾质量检测系统由 6 个模块组成:雾滴采样模块、图像采集模块、图像处理模块、无线通信模块、图像和数据存储模块、数据显示模块。系统结构框图和结构示意图如图 1、2 所示。雾滴采样模块由步进电机和雾滴采样带构成,负责接收无人机喷洒的农药雾滴,由像素为 1 230 万的 Raspberry Pi HQ 摄像机连接 6 mm 广角、16 mm 长焦摄像头组成的图像采集模块,在距采样带 30 cm 处对采样模块进行拍摄,采集到雾滴图像分辨率可达 72 dpi,通过在雾滴采样带上进行尺寸标定,测得图像像素与实际尺寸的标定因子 $\eta = 605$ 像素/mm,采样面积为 101.01 cm^2 ^[14]。随后将采集到的雾滴图像传输到由 Raspberry Pi 搭建而成的数字图像处理模块进行处理。最后将处理结果的数据和图像通过由 4G 模块和远程数据服务器构成的无线通信模块传输到图像和数据存储模块、数据显示模块进行存储和显示。

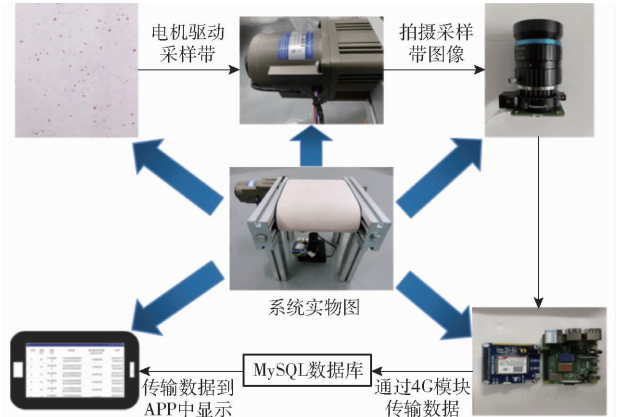


图 1 系统整体结构图

Fig. 1 System overall flow chart

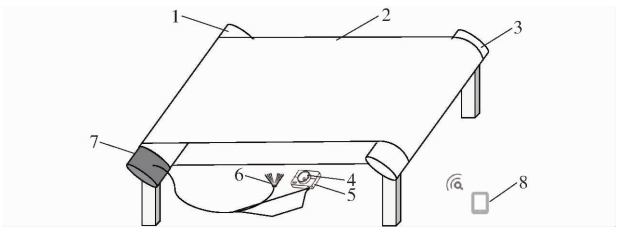


图 2 基于水性丙烯酸树脂的无人机喷雾质量检测系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of UAV spray quality detection system based on waterborne acrylic resin

1. 步进电机 2. 雾滴采样带 3. 转轴 4. 摄像头 5. Raspberry Pi 6. 光源 7. 电源 8. 智能手机

1.2 喷雾雾滴采样模块设计

无人机喷雾雾滴采样装置主要由电源、光源、步

进电机和雾滴采样带组成。雾滴采样模块中的雾滴采样带采取以水性丙烯酸树脂为主料的油墨,通过丝网印刷技术制成。

该装置表面水性丙烯酸树脂遇水后的扩散程度、变色速度、变色恢复时间需考虑。选取遇水变透明的油墨,该油墨的溶剂主要为水,更加环保,而且作为其主要成分的水性丙烯酸树脂液具有遇水变透明特性,该材料的分子结构是胶束粒子团,加入水后其分子变小粒径变细,透明度提高。同时,高岭土和硅铝酸盐的混合物作为油墨的组分,能产生遇水变透明、水干恢复原色的效果^[15]。因此加入上述材料可以进一步保证油墨遇水变透明的特点。该油墨同时具有变透明可逆的特点,在雾滴蒸发后,油墨恢复原色。运用丝网印刷技术,将油墨通过 47T 丝网印刷在红色聚乙烯软板上,即可进行雾滴的收集^[16]。经测试,该装置在采集到无人机喷雾后,3 s 内完成变色,变色开始恢复的时间为完成变色反应后 10 s。

如图 3 所示,在未接触雾滴时,雾滴采样带呈白色。无人机喷雾滴落在喷雾采样装置上后,采样带和雾滴所接触的位置会显现红色,随后步进电机用时 4 s 将雾滴采样带转送至预设位置,利用摄像头对该喷雾接收装置进行拍照,获取沉积雾滴的图像,实现雾滴的可视化采集。

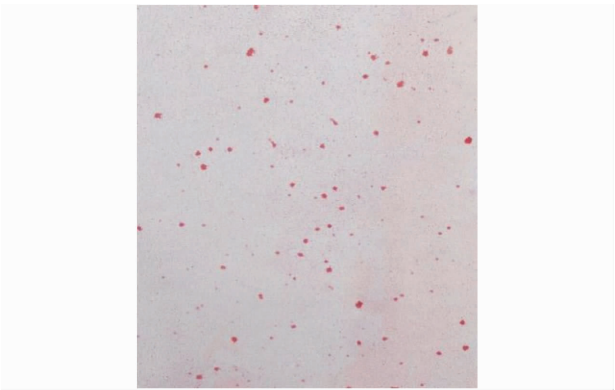


图 3 雾滴采样带发生的变色反应

Fig. 3 Discoloration reaction of fog drop sampling zone

1.3 图像处理模块设计

在 Raspberry Pi 调用相机获取雾滴沉积图像后,图像处理模块开始对采集到的图像进行数字图像处理。系统采用 Opencv - Python 编程实现液滴参数测量功能。图像处理流程如图 4 所示。首先,获取图像进行图像预处理,对获取的图像进行滤波操作可以有效抑制各种噪声,增强边缘信息,提高图像质量,提高后续图像处理的准确性。该模块采用中值滤波器。中值滤波的具体操作是通过将对邻域内像素按灰度排序的结果决定中心像素的灰度。中值滤波效果如图 5 所示。滤波处理后的图像增强了图

像的颜色。摄像头所获得的图像基本上是白色和红色的,白色作为背景,红色作为雾滴。在这个操作中,红色的饱和度被增强,因此有利于在后续操作中系统更准确地识别雾滴图像。

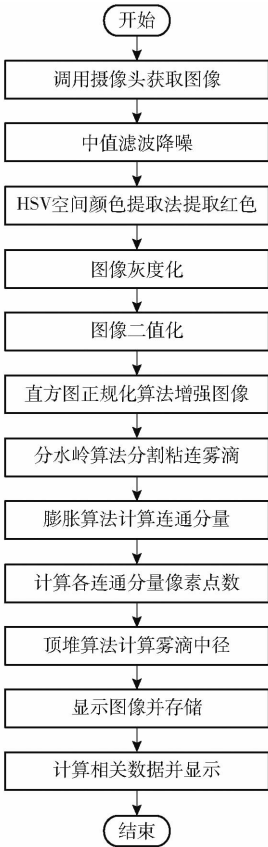


图 4 数字图像处理流程图

Fig. 4 Flow chart of digital image processing program

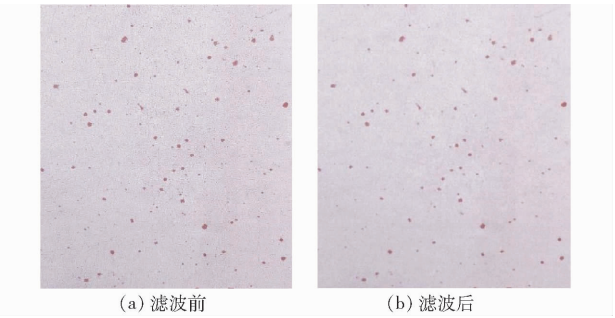


图 5 滤波效果

Fig. 5 Filtering effect diagrams

图像经过中值滤波后进行雾滴区域的提取,即将目标图像中的红色雾滴区域与背景分割开来,本程序采取动态阈值算法^[17]进行图像分割。该算法可以解决由图像亮度不均而对雾滴区域提取产生的影响。图像分割首先需要对图像进行灰度化。此时整个图像被处理成黑白图像。黑色部分为雾滴图像,白色部分为背景图像。通过直方图正规化算法对图像进行处理,增强整幅图像的对比度,再通过图像二值化将黑色图像部分的灰度调整成 1,将白色图像部分的灰度调整成 0^[18]。

雾滴图像的分割是测量雾滴参数的关键。在计算雾滴个数时,并不是每一个雾滴都是独立的,会出现两三个雾滴粘连在一起的情况。所以对于粘连雾滴分割方法的选择和分割的准确度直接影响雾滴参数测量的准确度。对粘连雾滴的处理是整个雾滴图像处理的一个难点。分水岭算法的优势在于分水岭对微弱边缘具有良好的响应,可以较完整地将分割对象从背景中剥离,而且可以得到分割区域的边缘和数目。虽然使用分水岭算法后图像中的噪声、物体表面细微的灰度变化有可能产生过度分割的现象,但可以保证得到封闭连续边缘。基于雾滴迭代开运算标记的分水岭分割算法对粘连雾滴进行分割可以有效地避免过分分割和欠分割。采用分水岭算法分割粘连雾滴步骤如下:①通过迭代开运算将各个粘连雾滴分离开。②对图像进行边缘检测,提取边缘获得背景标记。③利用所测结果作为标注点作用于原二值化图像上。④调用分水岭算法和边缘标注点进行“与”运算,覆盖掉单个雾滴斑痕内部的脊线,得到改进的分水岭脊线图。⑤将分水岭脊线图叠加到原二值图像上,生成的黑色分割线将粘连雾滴分割开,使粘连的雾滴区域被分割成几个独立的连通区域。

粘连雾滴分割结果如图 6。针对粘连雾滴的特点,运用基于雾滴迭代开运算标记的分水岭分割算法对粘连雾滴进行分割,计算量大大减少,和传统分水岭算法相比,具有简单快速、容易实现的特点。在分离粘连雾滴的应用中,取得了良好分离效果,并且避免了过分分割和欠分割^[19]。



图 6 粘连雾滴分割结果

Fig. 6 Segmentation results of adhesive fog droplet

采用膨胀算法计算连通分量。把每一个雾滴看作一个由多个像素点连通构成的连通分量。通过膨胀算法计算图像内连通分量,连通分量的个数即为图像内雾滴的个数。而利用实际雾滴和像素点的尺寸标定试验可以得出像素点尺寸和实际尺寸的比例关系。随后通过计算各个连通区域的像素点个数计算出雾滴的实际尺寸,进而得到各个雾滴的粒径。

其中在计算雾滴个数时,对于雾滴图像不清晰、光照不均匀及周围干扰等所产生的伪雾滴,一般将小于 6 个像素的雾滴视为干扰雾滴不计算在内。最后在程序中采取顶堆算法对各雾滴粒径进行排列,求出雾滴中径。在田间系统测试中,整个图像处理流程共用时 9 s。

1.4 主要技术指标计算

(1)雾滴覆盖率:通过图像中分析区域雾滴的像素个数与图像的分析区域之比求得,其计算公式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f(i,j)}{MN} \times 100\% \tag{1}$$

式中 $M、N$ ——分析区域的宽度、高度,像素
 $f(i,j)$ ——图像分析域中像素相对坐标为 (i,j) 的像素灰度,若像素为黑色,则 $f(i,j) = 1$,否则 $f(i,j) = 0$ ^[20]

(2)雾滴沉积密度:雾滴沉积密度是影响雾滴防治效果的重要参数,是指在单位面积上沉积的雾滴数。其计算式为

$$\rho = \frac{\eta^2 K}{MN} \tag{2}$$

式中 ρ ——沉积密度,个/mm²
 K ——图像上雾滴个数

(3)雾滴粒径数据 $D_{V0.1}$:取样雾滴的体积按雾滴大小顺序进行累积,选取累积值为取样雾滴体积总和的 10% 所对应的雾滴直径。

(4)雾滴粒径数据 $D_{V0.9}$:取样雾滴的体积按雾滴大小顺序进行累积,选取累积值为取样雾滴体积总和的 90% 所对应的雾滴直径。

1.5 无线通信模块及上位机软件设计

无线通信模块由树莓派节点、服务器云端数据库组成,通过 4G 数据传输网进行系统的数据传输,可以实现雾滴参数的远程检测,避免了喷雾后进入大田收集雾滴数据的繁琐工作。系统使用的服务器基于腾讯云服务搭建,服务器中配置有 MySQL 数据库,在树莓派连接 4G 网络的前提下,将雾滴参数数据自动写入服务器已经建立好的 MySQL 数据表中。

系统以 Android 智能手机为平台,设计系统的雾滴参数检测软件,在智能手机连接网络的前提下,实现在 Android 语言下对云服务器中数据库的数据访问,得到雾滴沉积数据。实现雾滴沉积量的便携式查看,为航空植保质量的快速评估提供技术支持。

上位机软件具有以下功能:实时查看雾滴图像、雾滴粒径、采样器上雾滴数量、雾滴沉积密度和雾滴

覆盖率等雾滴参数数据,APP 界面如图 7 所示。系统的整体运行流程如图 8 所示。

序号	雾滴粒径DV.1 (μm)	雾滴粒径DV.9 (μm)	雾滴覆盖率 (%)	雾滴沉积密度 (g/m^2)	时间
1	69.24	199.86	0.4394	7.46	2021-03-19 13:05:15.0
2	55.26	242.76	0.4106	9	2021-03-19 13:07:11.0
3	60.32	217.96	0.8752	17.67	2021-03-19 13:08:02.0
4	43.14	208.76	0.8199	15	2021-03-19 13:25:21.0
5	69.24	194.62	0.7963	17.05	2021-03-19 13:26:09.0
6	64.96	268.86	1.0072	11.01	2021-03-19 13:27:48.0

图 7 APP 界面
Fig. 7 APP interface diagram

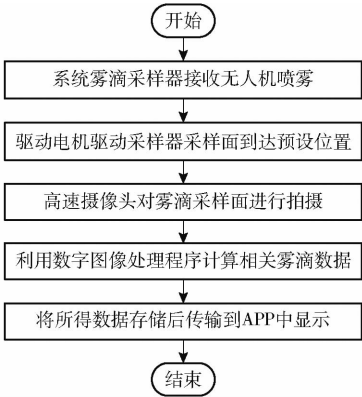


图 8 系统运行流程图
Fig. 8 Flow chart of system operation

2 试验

为了验证系统的各项性能指标,并探究无人机飞行设置参数对无人机喷雾质量的影响,选取一块约为 100 m×200 m 区域作为试验场地(位于山东省泰安市),试验布置如图 9 所示。试验分别采用水敏纸法和自主研发的无人机喷雾质量检测系统获取雾滴沉积分布。喷施液体选用自来水。试验中,无人机喷雾质量检测系统传输回施药雾滴沉积分布、覆盖率、雾滴粒径等相关雾滴参数。试验场地中采样点以飞机航线为中心线,沿中心线布置 5 个采样点,采样间距 20 m,无人机喷雾质量检测系统采样点布置如图 9,水敏纸与系统采样点间隔 20 cm 平行放置。单次喷洒作业结束后,记录喷雾质量检测系统传输返回的数据,水敏纸采样卡干燥后依次收集并带回实验室,使用扫描仪对水敏纸采样卡分别进行扫描。通过水敏纸处理软件获取水敏纸表面雾滴沉积参数,计算分析不同飞行参数下水敏纸样品雾滴覆盖率、雾滴粒径、雾滴沉积量、雾滴沉积密度等雾滴相关参数。

无人机作业预设参数是影响无人机施药质量的重要因素,施药选用极飞 P20 型无人机,选取无人机的飞行高度、飞行速度、无人机预设雾滴粒径 3 种参

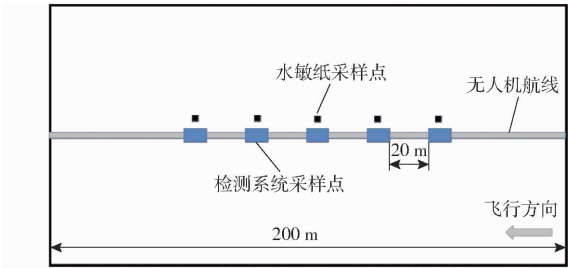


图 9 大田试验系统采样点布置示意图
Fig. 9 Sampling point diagram of field test layout system

数作为主要研究变量。考虑到无人机飞行高度过低可能会产生安全问题,以及无人机在低空低速条件下作业有较好的雾滴覆盖水平,所以共设计重复飞行 16 次,各次选取无人机飞行参数如表 1 所示^[21]。

表 1 试验组飞行参数
Tab. 1 Flight parameters of experimental group

试验组序号	飞行高度/m	飞行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	预设雾滴粒径/ μm
1	2	6.5	100
2	2	6.5	135
3	2	6.5	150
4	2	6.5	165
5	2	6.5	200
6	2	6.5	285
7	2	5	200
8	3.5	5	200
9	5	5	200
10	6.5	5	200
11	2	1.5	200
12	2	2.5	200
13	2	3.5	200
14	2	5	200
15	2	6.5	200
16	2	5	100

在采样区域中垂直地面 2 m 布置普希科 P6-8232 型风向风速仪,并在各采样点放置温湿度传感器。测得试验组平均风速为 2.9 m/s,平均风向(与正北顺时针角度)为 70°,平均气温为 17.6℃,平均空气相对湿度为 55.3%。

经田间试验测试,系统运行流畅,雾滴采样带采集到无人机喷雾后,雾滴图像的获取及处理以及数据传输查看共用时约 30s。试验共得到了 74 组有效数据样本。分别对无人机喷雾的粒径数据 $D_{v0.1}$ 和 $D_{v0.9}$ 、雾滴覆盖率、雾滴沉积密度进行了分析对比。以无人机喷雾质量检测系统测量数据作为自变量,以水敏纸检测数据作为因变量进行回归分析。

如图 10 所示,雾滴粒径 $D_{v0.1}$ 的决定系数为 0.835 3,低于 $D_{v0.9}$ 的决定系数,且在水敏纸测量数据中挑选 $D_{v0.1}$ 低于 100 μm 的 44 个样本,其决定系数仅为 0.4735,且其中 70.4% 的样本中无人机喷雾

质量检测系统测量 $D_{v0.1}$ 大于水敏纸测量值。由于水性丙烯酸树脂的遇水变透明特性受到丝网印刷技术及打印材料的影响或摄像头硬件限制,导致无人机喷雾质量检测系统对于雾滴粒径小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴识别准确度较差。

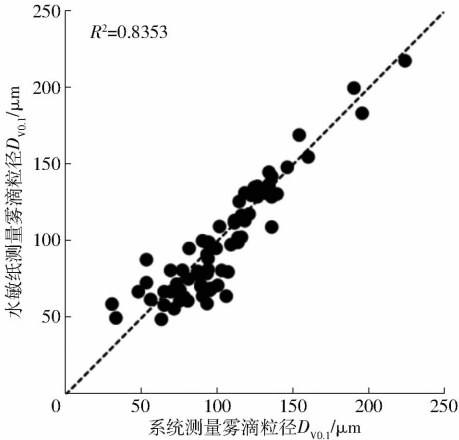


图 10 雾滴粒径 $D_{v0.1}$ 测量值对比

Fig. 10 Comparison of measured values of fog droplet particle size data $D_{v0.1}$

如图 11 所示,对 74 组水敏纸测量数据和无人机喷雾质量检测系统测量数据中的雾滴粒径 $D_{v0.9}$ 进行线性回归分析,其决定系数为 0.900 5。

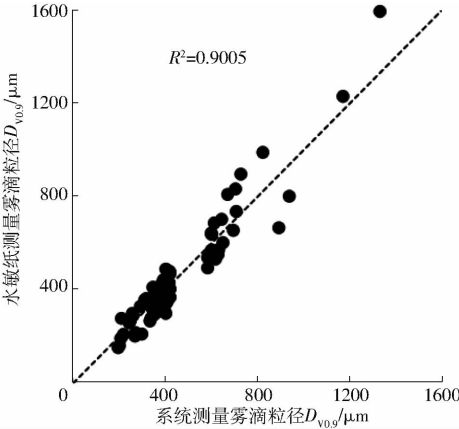


图 11 雾滴粒径 $D_{v0.9}$ 测量值对比

Fig. 11 Comparison of measured values of fog droplet particle size data $D_{v0.9}$

如图 12 所示,对 74 组水敏纸测量数据和无人机喷雾质量检测系统测量数据中的雾滴覆盖率进行线性回归分析,其决定系数为 0.907 5。

如图 13 所示,对 74 组水敏纸测量数据和无人机喷雾质量检测系统测量数据中的雾滴沉积密度进行线性回归分析,其决定系数为 0.861 8。相关性较差的 8 个样本中有 7 个样本的系统测量雾滴沉积密度小于水敏纸测量数据,且均为雾滴沉积密度大于 $10\text{ 个}/\text{cm}^2$ 、 $D_{v0.1}$ 低于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的样本。所以,无人机喷雾质量检测系统测量出的雾滴覆盖率误差大主要原因是水性丙烯酸树脂的遇水变色特性受到丝网印

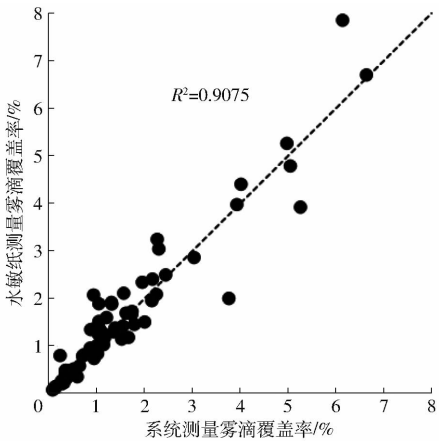


图 12 雾滴覆盖率测量值对比

Fig. 12 Comparison of fog drop coverage measurement values

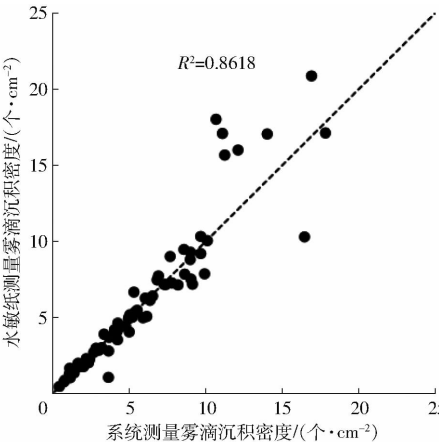


图 13 雾滴沉积密度测量值对比

Fig. 13 Comparison of measured values of droplet deposition density

刷技术及打印材料的影响,无人机喷雾质量检测系统对于雾滴粒径小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴识别性能较差,存在识别不到的情况,导致雾滴沉积密度低于水敏纸测量值。

3 结论

(1)设计了基于水性丙烯酸树脂和数字图像处理技术的的无人机喷雾质量检测系统。阐述了硬件设计及水性丙烯酸树脂的应用原理,对图像处理程序算法设计进行了介绍,分析了使用分水岭算法对粘连雾滴进行图像分割的优势。

(2)利用大田试验,通过和水敏纸的测量数据对比,对系统测量的雾滴粒径 $D_{v0.1}$ 和 $D_{v0.9}$ 、雾滴覆盖率、雾滴沉积密度 4 种参数进行了线性回归分析,得出 4 种数据和水敏纸测量数据的决定系数,最终对系统进行了应用测试,分析了系统的可行性和测量精准度。

(3)分析结果表明,基于水性丙烯酸树脂的无人机喷雾质量检测系统,对于雾滴粒径 $D_{v0.9}$ 、雾滴

覆盖率的检测结果与水敏纸测量方法的结果一致性较好,而对于雾滴沉积密度和雾滴粒径 $D_{v0.1}$ 的测量,当无人机喷雾雾滴粒径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,其检测结果与水敏纸测量方法的结果一致性较好,

雾滴粒径小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 时,测量精度不够理想。试验证明无人机喷雾质量检测系统在测量无人机喷雾的雾滴粒径、喷雾覆盖率等参数方面具有较大实用性。

参 考 文 献

- [1] 丁素明,薛新宇,董祥,等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):308-315.
DING Suming, XUE Xinyu, DONG Xiang, et al. Effects of spraying parameters on droplet deposition performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 308-315. (in Chinese)
- [2] NI Ming, WANG Hongjie, LIU Xudong, et al. Design of variable spray system for plant protection UAV based on CFD simulation and regression analysis[J]. Sensors, 2021, 21(2):638.
- [3] XU Y, XUE X, SUN Z, et al. Online spraying quality assessment system of plant protection unmanned aerial vehicle based on Android client[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166:104938.
- [4] 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)
- [5] 张波,罗锡文,兰玉彬,等. 基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J]. 农业工程学报,2015,31(17):176-182.
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Agricultural environment monitor system based on UAV and wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 176-182. (in Chinese)
- [6] 张瑞瑞,李龙龙,文瑶,等. 植保无人机喷雾雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J]. 农业工程学报,2020,36(6):47-55.
ZHANG Ruihui, LI Longlong, WEN Yao, et al. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 47-55. (in Chinese)
- [7] 杨玮,郝子源,李民赞,等. 果树叶片雾滴沉积量检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):8-14.
YANG Wei, HAO Ziyuan, LI Minzan, et al. Detecting system design of droplet deposition on fruit leaves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 8-14. (in Chinese)
- [8] FOX R D, DERKSEN R C, COOPER J A, et al. Visual and image system measurement of spray deposits using water-sensitive paper[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(5):549-554.
- [9] 陈菁菁,彭彦昆,李永玉,等. 基于高光谱荧光技术的叶菜农药残留快速检测[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊):1-5.
CHEN Jingjing, PENG Yankun, LI Yongyu, et al. Rapid detection of vegetable pesticide residue based on hyperspectral fluorescence imaging technology[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.): 1-5. (in Chinese)
- [10] 曹军琳,祁力钧,杨知伦,等. 基于图像处理的雾滴沉积分布试验研究[J]. 中国农业大学学报,2019,24(1):130-137.
CAO Junlin, QI Lijun, YANG Zhilun, et al. Experimental study on droplet deposition distribution based on image processing [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 130-137. (in Chinese)
- [11] 冯帅辉. 航空施药雾滴沉积光谱检测系统的设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2020.
FENG Shuaihui. Design and test of spectroscopic detection system for aerosol droplet deposition [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 张瑞瑞,文瑶,伊铜川,等. 航空施药雾滴沉积特性光谱分析检测系统研发与应用[J]. 农业工程学报,2017,33(24):80-87.
- [13] BRADLEY K F, HOFFMANN W C, JANK P. A fluorescent tracer method for evaluation spray transport and fate of field and laboratory spray application[J]. Journal of ASTM International, 2011, 8(3): 1-9.
- [14] FERGUSON J C, CHECHBETTO R G, O'DONNELL C C, et al. Assessing a novel smartphone application - SnapCard, compared to five imaging systems to quantify droplet deposition on artificial collectors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128(C):193-198.
- [15] 蹇刚,秦家发,刘文艺. 遇水变透明油墨及其制备方法、遇水显色薄膜:201711188744.0[P]. 2017-11-24.
- [16] LI Fangjie. Color-changing process for paper printing and printed paper with changeable color: WO 2014/042876 A1[P]. 2014-03-27.
- [17] 郭娜,刘思瑶,须晖,等. 基于图像处理的雾滴粒径检测方法[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52(1):85-89.
GUO Na, LIU Siyao, XU Hui, et al. Research on droplet size detection method based on image processing algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(1): 85-89. (in Chinese)
- [18] 张振磊. 基于数字图像的雾滴沉积分布试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2009.
ZHANG Zhenlei. Experimental study on droplet deposition distribution based on digital image [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- [19] 吴亚全,祁力钧,张亚,等. 雾滴图像粘连特征改进判断及分离计数方法优化[J]. 农业机械学报,2017,48(增刊):220-227.
WU Yaqian, QI Lijun, ZHANG Ya, et al. Optimized method of improved characteristics judgment and separation counting for adhesive droplets [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 220-227. (in Chinese)
- [20] 薛峰. 图象处理在雾滴关键参数测量中的应用[D]. 北京:中国农业大学,2005.
XUE Feng. Application of image processing in measurement of key parameters of fog drops [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [21] 陆军,李萍萍,贾卫东,等. 3种喷头雾滴输运沉积参数的试验与分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10):53-57.
LU Jun, LI Pingping, JIA Weidong, et al. Experiment and analysis on droplets motion and deposition parameters of 3 nozzles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 53-57. (in Chinese)