doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.005

基于果树冠层识别的植保无人机可变角度变量喷施装置设计与试验

傅生辉[1,2]　任乃旭[1]　张鑫哲[1]　刘双喜[1,2]　刘镰恺[1]　张　稳[1,2]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;
2.山东农业大学山东省设施园艺智慧生产技术装备重点实验室(筹),泰安 271018)

摘要:针对当前无人机喷药喷施不均匀、雾滴飘移、肥药有效利用率低和浪费污染严重等问题,设计了一种基于果树冠层识别的植保无人机可变角度变量喷施装置。该装置通过摄像头采集果树冠层图像并传输至 Jetson Orin Nano,利用 ROI 选取与子区间线扫方法实现冠层边界与果树行宽度识别,识别结果传至 STM32 控制器,其中冠层边界信息用于调节喷头角度,像素占比信息用于调控喷头流量,流量计与磁编码器反馈信号经模糊 PID 算法处理,实现喷头角度与喷施量双闭环控制。经试验验证,果树冠层边界算法离线识别率为 91.58%。台架试验结果表明,该方法在果树行宽度识别中平均误差为 7.32%,线性拟合 $R^2=0.91$;在喷雾验证中,当喷施角度大于靶区时,调节后可使靶区外沉积数量平均降低 26.61 个/cm^2,雾滴沉积数量降低 51.94%。当喷施角度小于靶区时,调节后可使靶区内外部雾滴沉积数量平均提升 25.37 个/cm^2,雾滴沉积数量提高 54.8%。核密度估计曲线更平滑,有效改善沉积分布均匀性。田间试验结果显示:统计检验结果为 $t=3.29$、$P=0.03$,达到 $P<0.05$ 的统计显著水平,装置开启状态下沉积效果更优,该方法实现了基于果树行宽度可变角度变量喷施控制,可有效提高雾滴利用率,为无人机果园精准施药提供技术支持。

关键词:植保无人机;果树行检测;可变角度变量喷雾;模糊 PID;药液沉积

中图分类号:S251　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)03-0047-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Variable Angle and Variable Spraying Device for Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle Based on Fruit Tree Canopy Recognition

FU Shenghui[1,2]　REN Naixu[1]　ZHANG Xinzhe[1]　LIU Shuangxi[1,2]　LIU Liankai[1]　ZHANG Wen[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*
2. *Key Laboratory of Smart Production Technology and Equipment for Facility Horticulture in Shandong Province (Proposed), Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*)

Abstract: In view of the current problems such as uneven spraying, droplet drift, low effective utilization rate of fertilizers and pesticides, and serious waste and pollution caused by traditional spraying methods of unmanned aerial vehicles (UAVs), a variable angle and variable spraying device for plant protection UAVs was designed based on fruit tree canopy recognition. This device collected the canopy images of fruit trees through the camera and transmited them to Jetson Orin Nano. The recognition of the canopy boundary and the row width of fruit trees was achieved by using ROI selection and sub-interval line scanning methods. The recognition results were transmitted to the STM32 controller. Among them, the canopy boundary information was used to adjust the nozzle angle, and the pixel ratio information was used to regulate the nozzle flow rate. The feedback signals of the flowmeter and the magnetic encoder were processed by the fuzzy PID algorithm to achieve double closed-loop control of the nozzle angle and the spray volume. It was verified that the offline recognition rate of the fruit tree canopy boundary algorithm was 91.58%. The bench test results showed that the average error rate of this method in the recognition

收稿日期:2025-09-27　修回日期:2025-11-10

基金项目:山东省重点研发计划项目(2023TZXD072)、山东省重点研发计划项目(2023TZXD064)和山东省自然科学基金项目(ZR2022QE217)

作者简介:傅生辉(1989—),男,副教授,博士,主要从事拖拉机动力换挡与车辆电子控制技术研究,E-mail:fush@sdau.edu.cn

通信作者:张稳(1988—),女,副教授,博士,主要从事智能农机装备设计及理论研究,E-mail:wenzhang_098@sdau.edu.cn

of the width of fruit tree rows was 7.32%, and the linear fitting $R^2 = 0.91$. In the spray verification, when the spray angle was greater than the target area, after adjustment, the average number of deposits outside the target area could be reduced by 26.61 per cm^2, and the number of droplet deposits could be reduced by 51.94%. When the spraying angle was smaller than the target area, after adjustment, the average number of external droplets deposited in the target area can be increased by 25.37 per cm^2, and the number of droplets deposited can be increased by 54.8%. The kernel density estimation curve was smoother, effectively improving the uniformity of sedimentary distribution. The field test results showed that the statistical test results were $t = 3.29$ and $P = 0.03$, reaching a statistically significant level of $P < 0.05$. The deposition effect was better when the device was turned on. This method realized variable angle and variable spraying control based on the width of fruit tree rows, which can effectively improve the utilization rate of droplets and provide technical support for precise pesticide application in unmanned aerial vehicle orchards.

Key words: plant protection UAV; fruit tree row detection; variable angle variable spray; fuzzy PID; pesticide solution deposition

0 引言

植保无人机广泛应用于果园肥药喷施[1-6]。然而,由于喷头固定,药液易发生飘移,使有效利用率下降,作业效率低,从而造成药液浪费和土地污染。因此,根据果树行分布信息调整喷头喷洒宽度和喷洒量,以适应果树行分布情况,成为提高喷洒精度和作业效率的关键。

近年来,国内外学者针对仿形变量喷施控制系统进行了大量研究,仿形喷施控制系统能够显著减少农药使用量及药液飘移,降低环境污染。在仿形喷雾方面,文献[7-9]设计的地面仿形喷雾机构,有效提升了喷雾精准度,但装置本身重量较大、牵引行走设备体积大,在果园密集种植条件下适用性受到限制。相比之下,无人机具备低空灵活作业优势,能够规避地面设备的影响,但目前尚缺轻量化变角度仿形喷雾装置。无人机变量喷施系统可有效减少在无靶区域内药液浪费及对环境的污染,岑振钊[10]通过摄像头采集田间图像,计算作物覆盖度,同时控制喷头喷雾状态,实现靶向喷雾,该方法虽有效改善了作物覆盖率与流量之间关系,但未考虑果树行宽度对雾滴飘移的影响。对果树冠层区域的有效识别是实现无人机仿形变量喷施的关键。KIM 等[11]利用 CNN 神经网络进行作物行的识别与分割。GONG 等[12]利用 YOLOX 完成了作物行检测与提取。LI 等[13]利用 MS-ERFNet 对玉米作物行进行了有效识别与分区处理。LI 等[14]利用图像处理技术完成对油菜作物行提取识别。ZHANG 等[15]利用无人机在田间尺度上对玉米植株间的空间距离进行了定量测量。DIAO 等[16]设计了一种改进 UNet 架构,用于提升玉米作物行识别精度与分割效果。然而,以上方法均未考虑根据果树行或作物行宽度变化对设备姿态进行调整的问题。

针对上述问题,本文提出一种基于果树冠层识别的植保无人机可变角度变量喷施装置。该装置利用 ROI 区域与子区间线扫方法实现果树冠层与果树行宽度识别,明确果树冠层边界和间隔位置信息,并基于模糊 PID 实现无人机喷头角度与喷施量的双闭环控制,搭建无人机变量喷施试验平台,以验证控制系统有效性。

1 可变角度变量喷施装置方案设计

1.1 装置结构设计

装置包括摄像头、固定支架、步进电机驱动模块、磁编码器、步进电机、喷头、流量计、无刷水泵及无刷水泵调速模块,系统构成如图 1 所示。硬件选型及其技术参数见表 1。

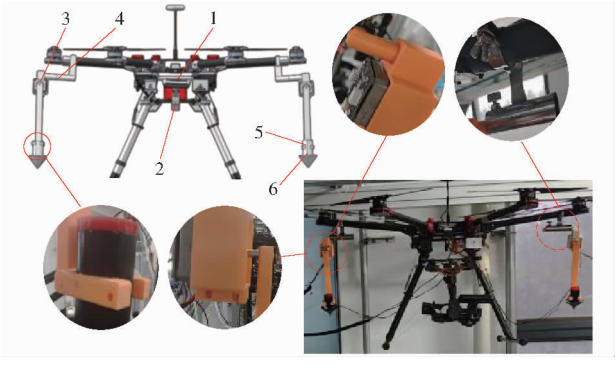

图 1 无人机可变角度变量喷施装置构成图

Fig. 1 Variable-angle variable-rate spraying device for unmanned aerial vehicles

1. 相机 2. 相机固定架 3. 电机 4. 电机固定架 5. 喷头固定件 6. 喷头

1.2 控制系统设计

无人机可变角度变量喷施系统工作流程如图 2 所示。无人机搭载的摄像头用于采集果树冠层信息,结合 Jetson Orin Nano 可分析果树冠层位置信息,利用角度传感器监测步进电机转动角度,流量计

表 1　硬件技术参数

Tab. 1　Main parameters of hardware

设备名称	规格型号	技术参数
步进电机	01S	步距角 1.8°，最大功耗 160 W
无刷水泵	TL－B04	扬程 1.2 m，流量 252 L/h
摄像头	335L	IP65，分辨率 1 280 像素 × 800 像素，60 f/s
STM32	F407VET6	168 MHz，512 KB Flash，192 KB RAM
Jetson Orin Nano	NX SUPER	70TOPS，8 GB
水泵调速	YF－44	放大电压 24 V，调频 0 ~ 10 kHz
磁编码器	AS5600	IIC 通讯，0° ~ 360°角度监测
流量计	YFS201	耐压 0 ~ 1.75 MPa，霍尔式监测

用于监测药液流量，利用单片机控制电机转角及无刷水泵，实现喷头喷施角度调节及药液喷施量的精确控制。

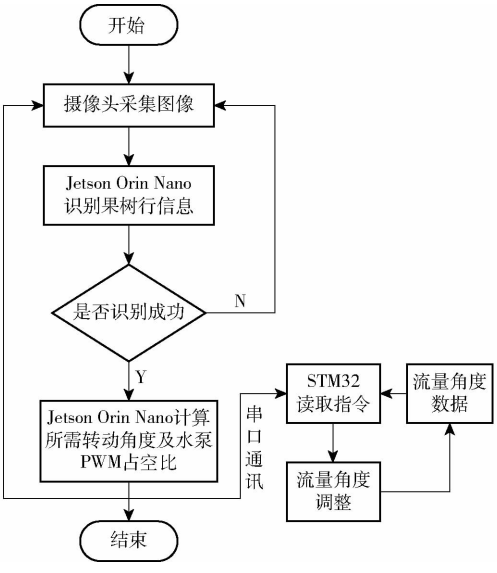

图 2　整体工作流程图

Fig. 2　Overall workflow chart

系统变量喷施控制逻辑如图 3 所示。根据无人机当前作业速度，计算 $T_0 \sim T_1$ 时间段内所需时间，作为 PWM 信号的持续时间及信息发送间隔。L1、R1 为每个区间内左、右边界，通过该区间内果树冠层分布情况计算果树覆盖占比，进而确定 PWM 输出占比。同时，根据区间内 L1 与 R1 间果树行宽度计算喷头所需调整的喷洒角度。由 Jetson Orin Nano 完成作业参数的计算与调控，包括信息发送时间间隔、电机转动角度、PWM 持续时间及占比等参数。喷施角度计算如图 4 所示。以扩大喷射角度 I_w 为例，当 Jetson Orin Nano 计算得到果树行宽度大于原始无人机喷头布局覆盖宽度时，系统根据该宽度差值计算喷头转动角度 θ，从而扩大喷射范围，确保喷洒覆盖整个果树行，角度计算式为

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = \arctan\frac{I_w}{2H} - \arctan\frac{O_w}{2H} \tag{1}$$

式中　H——施药臂臂长

O_w——扩大喷射角度后施药臂之间宽度

θ_0——扩大喷射的角度

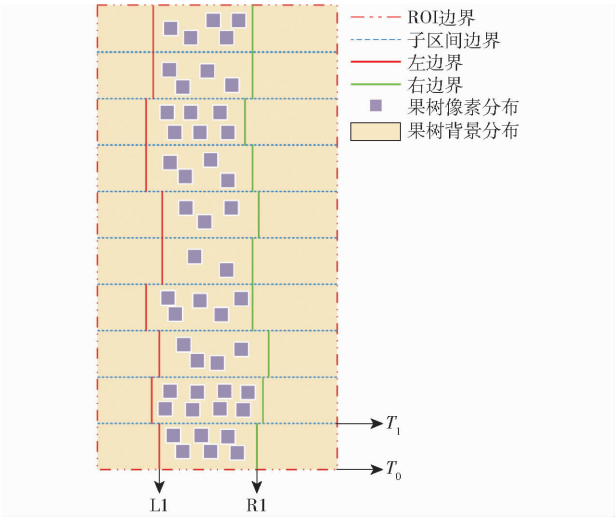

图 3　系统变量喷施控制逻辑图

Fig. 3　Logic diagram of system variable spraying control

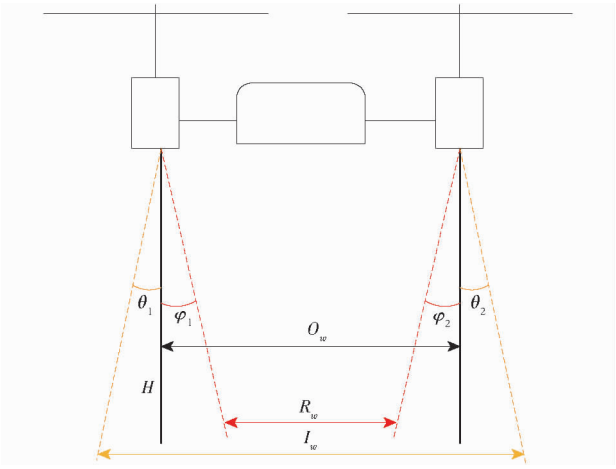

图 4　电机驱动角度计算示意图

Fig. 4　Schematic for calculating motor drive angle

针对角度控制电机与流量控制电机分别建立其传递函数 $G(s)$ 模型

$$G(s) = \frac{V(s)}{\theta(s)} = \frac{(Ls+R)(Js^2+Bs)+K^2s}{K} \tag{2}$$

式中　$\theta(s)$——角位移的拉普拉斯变换

$V(s)$——输入电压信号拉普拉斯变换

K——力矩常数，V·s/rad

L——电感，H　　R——电阻，Ω

J——转动惯量，kg·m^2

B——阻尼系数，N·m·s/rad

s——拉普拉斯变换中复频率变量，s^{-1}

角度控制传递函数 $G_1(s)$ 与流量控制传递函数 $G_2(s)$ 分别为

$$G_1(s) = \frac{316.67}{0.000\,08s^2 + 0.000\,752s + 1} \tag{3}$$

$$G_2(s)=\frac{0.05}{1.93\times10^{-8}s^3+7.24\times10^{-6}s^2+0.0025s} \tag{4}$$

为评估控制性能，基于 Matlab/Simulink 搭建了模糊 PID 仿真模型[17]，结构如图 5 所示。仿真结果如图 6、7 所示。结果表明，传统 PID 超调 20% ~ 25%，0.6 s 后趋于稳定，高频振动时间较长，控制精度较低。而模糊 PID 超调较少，0.3 ~ 0.4 s 内迅速稳定，无明显振荡。

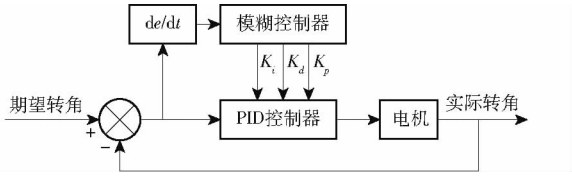

图 5 模糊 PID 控制模型原理图

Fig. 5 Schematic of fuzzy PID

依据模糊控制规则，设计比例系数(K_p)、积分系数(K_i)与微分系数(K_d)模糊控制规则，具体规则见表 2。在模糊控制中，误差(E)及其变化率(E_C)需通过隶属度函数进行模糊化处理。基于模糊推理结果，绘制 K_p、K_i、K_d相对于 E 和 E_C 响应曲面图，如图 8 所示，调控策略在快速性、稳定性与稳态精度之间取得良好平衡，显著提升系统整体控制性能。

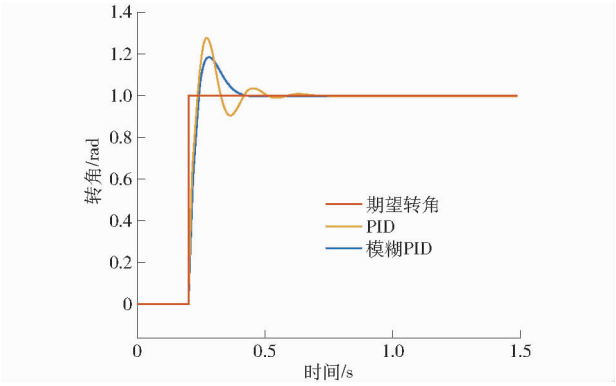

图 6 角度控制电机模糊 PID 效果图

Fig. 6 Fuzzy PID effect of angle control motor

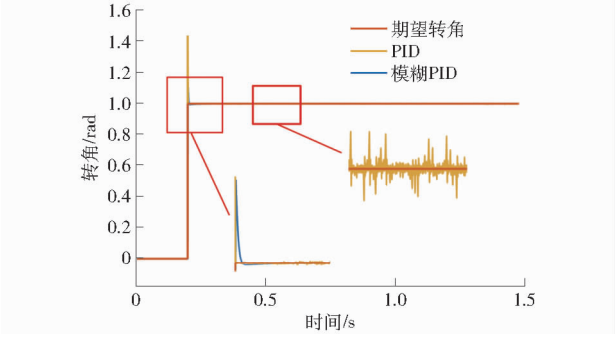

图 7 流量控制电机模糊 PID 效果图

Fig. 7 Fuzzy PID effect of flow control motor

表 2 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d模糊规则

Tab. 2 ΔK_p, ΔK_i and ΔK_d fuzzy rules

E_C	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZP/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZP/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

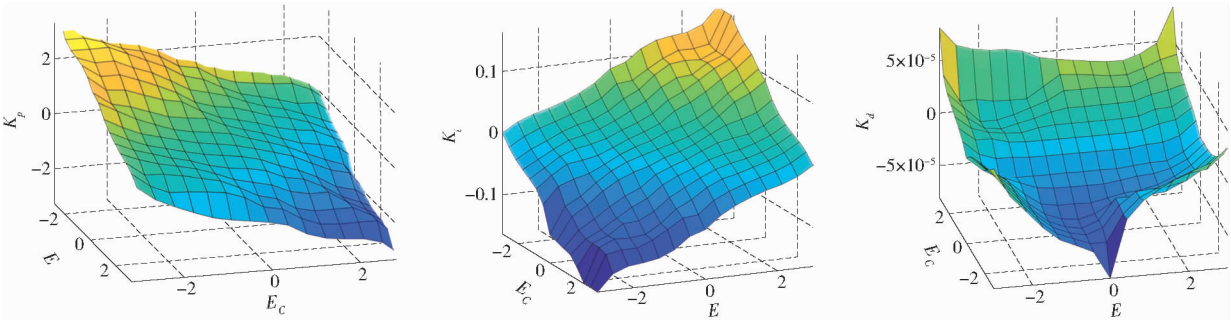

图 8 模糊 PID 参数响应曲面

Fig. 8 Fuzzy PID parameter response surface

2 果树冠层识别与测量方法

2.1 数据采集

利用大疆植保无人机于 2025 年 4 月在山东省淄博市某果园(36°40′03″N，117°57′55″E)采集图像。云台拍摄角度 30°，飞行高度 5.5 m，速度 2 m/s。分辨率 4 030 像素 ×2 268 像素，共采集图像 1 206 幅，如图 9 所示。

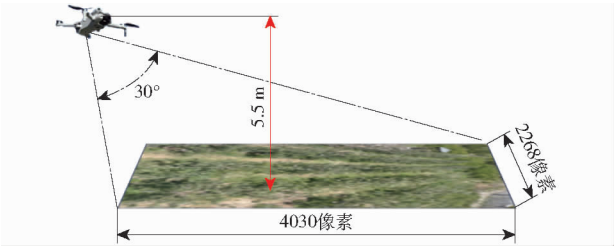

图 9　数据采集示意图

Fig. 9　Schematic of data acquisition

2.2　图像预处理

2.2.1　中值滤波

为抑制噪声干扰，增强边界检测及特征提取的鲁棒性，引入中值滤波操作[18]。滤波前后 RGB 亮度变化趋势如图 10 所示。

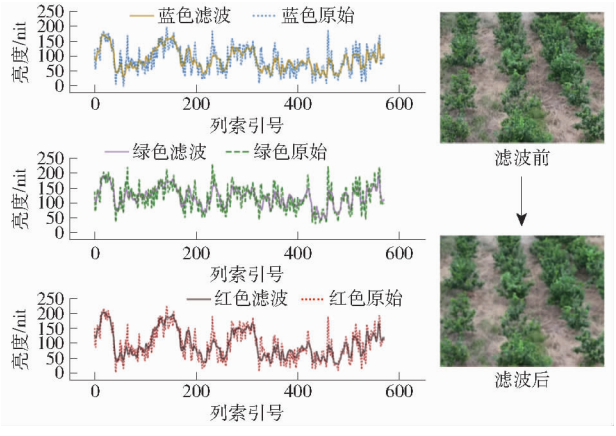

图 10　中值滤波示意图

Fig. 10　Schematic of median filtering

2.2.2　背景分割

为实现果树与背景有效分割，采用大津法、阈值法、K-means 及 GrabCut 进行背景分割。4 种算法效果如图 11 所示。大津法、阈值法、K-means 及 GrabCut 分别耗时 0.34、1、198.3 ms 及 23.2 s。GrabCut 分割时间长、分割效果差，聚类分割与阈值分割出现大片背景未分离，而大津法分割效果好，计算所需时间短，因此，选用大津法为背景分割算法。

2.2.3　ROI 区域选择

为降低计算复杂度、提升运算速度，提出一种 ROI 选取策略：以图像中心为基准，利用宽 1 像素、长 60 像素垂直扫描线逐列扫描，统计各列白色像素点。像素分布与果树行分布一致，两侧白像素计数为 0 位置即为初始边界，再按比例向外扩展以避免区域过窄而遗漏果树行。考虑无人机沿果树行中心作业，该方法既符合作业规范，又降低计算量。经过多轮阈值调整，扫描线长度取 60 像素，过短易漏检，过长则增加计算量。自适应 ROI 区域选择效果如图 12 所示。

2.3　果树冠层边界识别与测量

为实现果树冠层与果树行边界宽度准确测量，

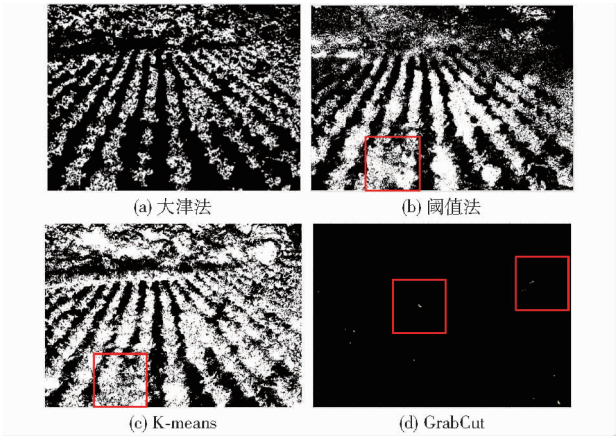

图 11　背景分割结果图

Fig. 11　Background segmentation result graph

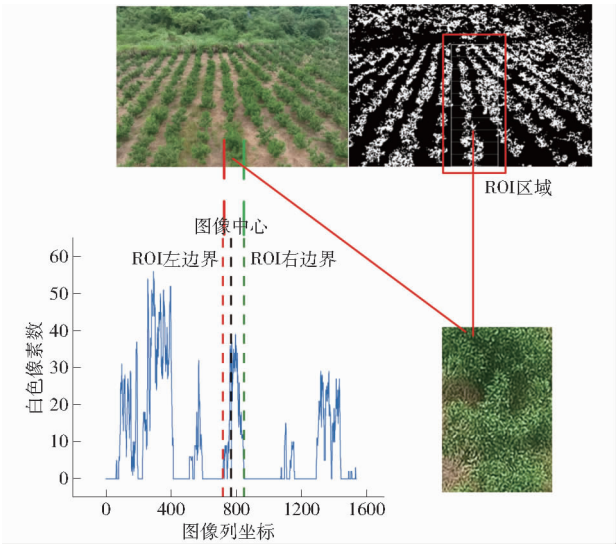

图 12　ROI 区域选择

Fig. 12　Adaptive ROI region selection

采用子区间线扫法提取果树行分布特征，并利用线性拟合法对果树行边界线进行拟合，以确定果树行边界坐标。在此基础上，利用张正友标定法对摄像头进行标定[19]，获取图像与实际尺寸间映射关系，最终得到果树实际坐标。

（1）相机标定

为提高相机内参矩及畸变参数估计精度，采用张正友标定法对相机进行标定。从多个不同角度和位置拍摄了共计 12 幅棋盘格标定板图像，以增强标定过程中的鲁棒性和精度。标定摄像机型号为 Gemini 335L，标定图像位姿以及重投影误差分布如图 13 所示。

标定所得相机内参矩阵 $\boldsymbol{K}_c$ 为

$$\boldsymbol{K}_c=\begin{bmatrix}1.125\,089\,97\times10^3 & 0 & 1.094\,852\,83\times10^3\\ 0 & 1.1245\,226\,9\times10^3 & 5.688\,284\,08\times10^2\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

畸变系数：$k_1=0.053$，$k_2=0.073$，$p_1=0.008\,4$，

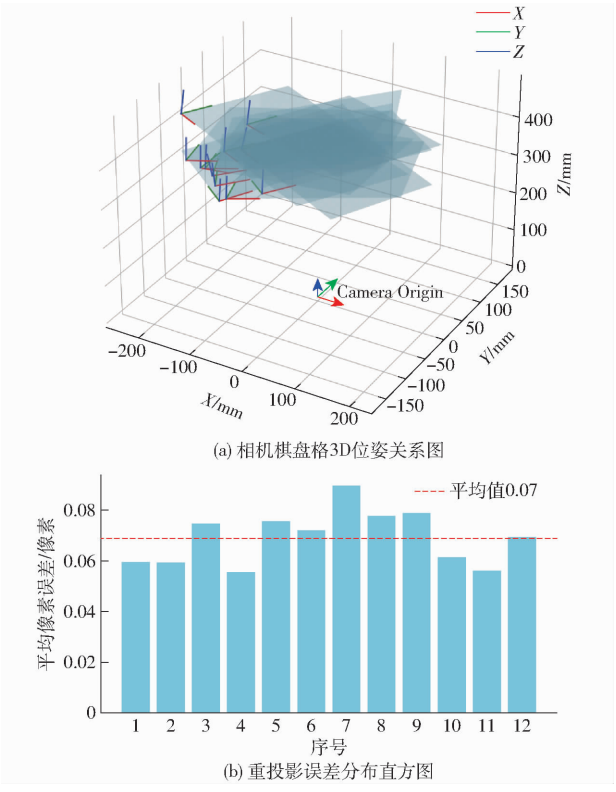

图 13 相机标定效果图

Fig. 13 Camera calibration effect picture

$p_2 = 0.007\,8$，$k_3 = 0.056$。

(2)果树冠层边界识别

基于 ROI 确定初始图像区，按等高划分若干子区间。每个子区间以 1 像素列扫描，统计每列白像素数得到像素分布曲线；局部差值 T_L 为

$$T_L(x) = W(x) - W(x-1) \tag{6}$$

式中 $W(x)$——x 列白色像素数量

TL 曲线能直观反映边缘处像素密度突变：连续接近 0 的区段表示边缘延续，突变值对应边界转换位置。部分子区间的像素分布与 TL 计算曲线见图 14。

为提取结构边界特征，根据局部差值序列构造时变(temporal variation，TV)序列

$$T_V(x) = \begin{cases} 1 & (T_L(x) = 0) \\ 0 & (T_L(x) \neq 0) \end{cases} \tag{7}$$

当出现连续 $T_V = 1$ 时，首个由 1→0 的转折点对应左边缘；最长 $T_V = 1$ 区间的起点则为右边缘。该方法能有效区分行间隙与果树行纹理突变区，边界识别效果如图 15 所示。

(3)线性拟合边界

为解决离散边界点导致整体边界线条出现断裂或不连贯问题，采用线性拟合方法对左右边界点进行线性拟合处理。

$$y = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} x + \frac{\sum y - k\sum x}{n} \tag{8}$$

式中 k——斜率 n——样本数据数量

最终识别果树行效果如图 16 所示，平均处理所用时间为 158 ms，果树冠层边界算法离线识别率 91.58%。

3 台架试验

3.1 无人机可变角度变量喷施试验平台搭建

为验证果树冠层识别精度及控制策略有效性，搭建了无人机可变角度变量喷施试验平台，以盆栽果树代替实际果树，如图 17 所示。通过串口通信采集流量计传感数据，在靶区布设水敏纸，用于分析单位面积上雾滴沉积数量与分布均匀性；依次开展果树行识别精度验证分析与喷雾有效性验证分析，从而验证本文装置可靠性。

3.2 试验结果分析

3.2.1 果树冠层识别精度分析

为验证果树冠层识别有效性与精度，设计多组识别试验，并记录识别数据点。将识别边界与人工识别边界进行测量比对，试验结果如图 18 所示。最大误差为 8.62%，最小误差为 5.5%，平均误差 7.32%。线性拟合 $R^2 = 0.91$，结果表明所提宽度识别算法具有较高准确性。

3.2.2 喷施有效性分析

为验证该装置肥药减施效果，无人机固定安装于试验支架上，喷头距冠层顶部高度为 2 m。根据喷洒面积 4 m^2、飞行速度 3 m/s 及有效喷幅宽度 1.2 m 计算，结合系统启动及响应误差，喷施时间确定为约 1.2 s。该喷施时长确保靶区被完整覆盖一次喷雾带宽，同时避免水敏试纸出现过饱和现象，保证雾滴分布清晰、可识别。在无人机台架装置下方设置不同大小靶区，分别对应靶区小于和大于原始喷头布局果树冠层宽度(即小面积靶区以及大面积靶区)，并铺设水敏试纸，通过采集对比不同果树冠层宽度下，变角度喷头与原始角度喷头在单位面积上雾滴沉积数量，展开对比分析。试验区内水敏试纸布置如图 19 所示。利用 Deposit Scan 软件对 3 次对比试验进行扫描与数据处理，分析雾滴沉积数及分布特征[20]，图 20 为部分水敏纸试验结果。

水敏试纸对比分析结果如图 21 所示。图 21a 表明当喷施角度大于靶区时，通过宽度调节可减少靶区外雾滴沉积数，靶区外平均降低 26.61 个/cm^2，雾滴沉积数降低 51.94%，靶区外仅少量雾滴因机翼下洗气流发生飘移。图 21b 表明喷施角度小于靶区时，通过宽度调节可提高靶区内、外部药液沉积雾滴数，平均提升 25.37 个/cm^2，雾滴沉积数平均降低 54.8%。根据 JB/T 9782—2014《植保机械通用试

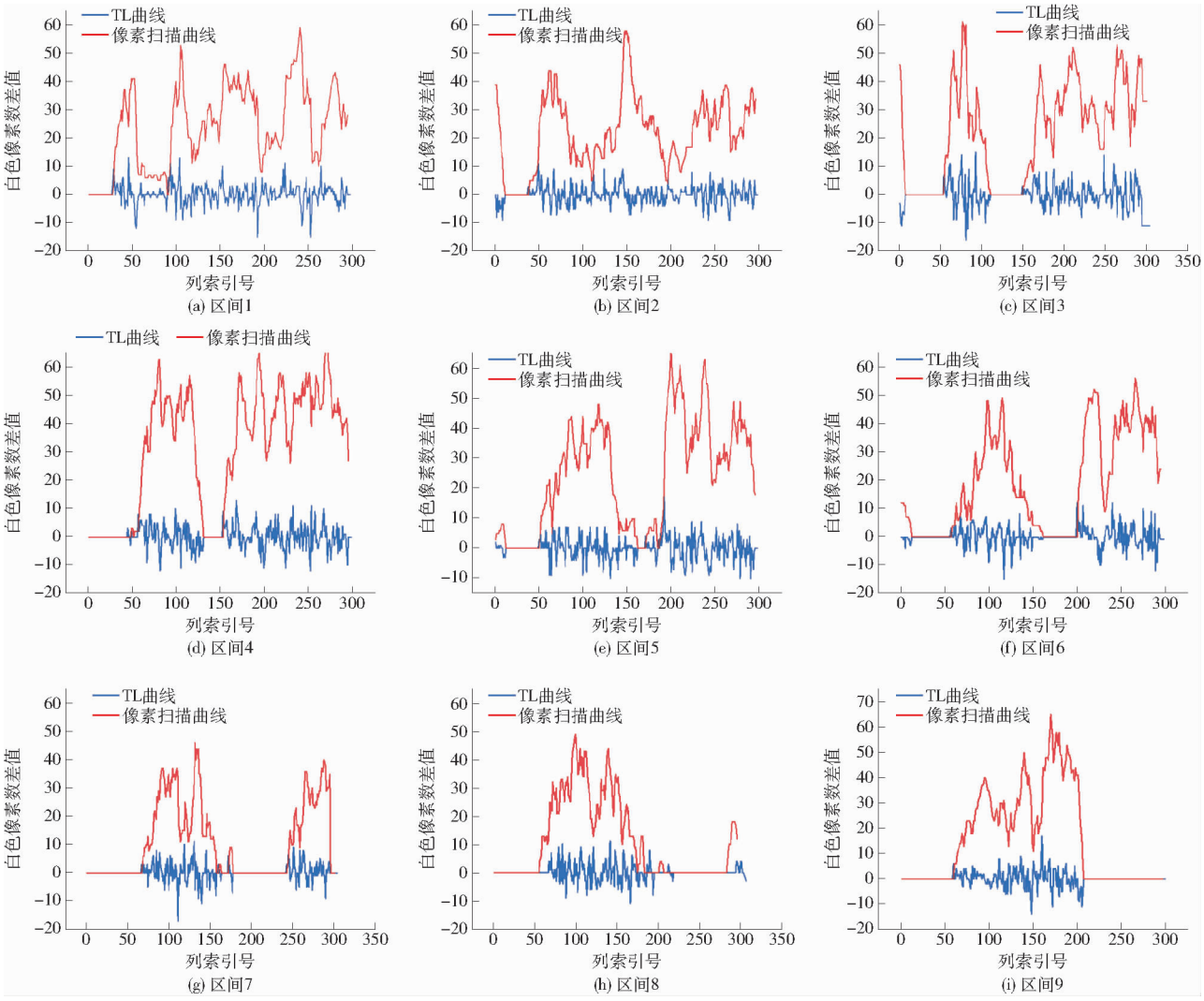

图 14　TL 曲线分布图

Fig. 14　TL curves distribution diagrams

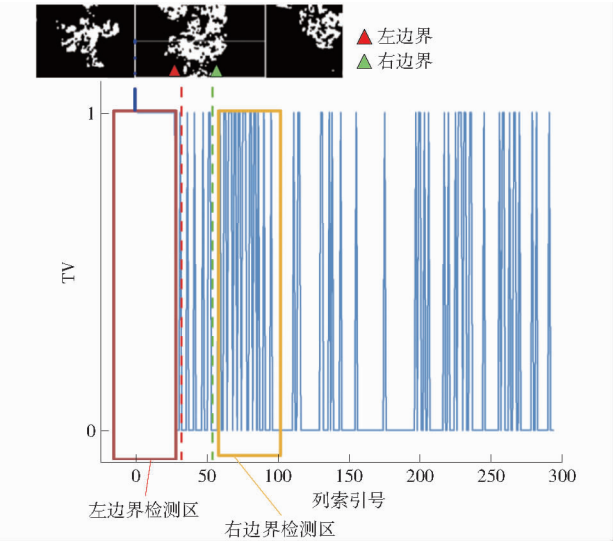

图 15　边界分割原理图

Fig. 15　Schematic of boundary segmentation principle



图 16　果树冠层识别效果

Fig. 16　Fruit tree canopy identification effect

验方法》，高于 20 个/cm^2 视为有效沉积。

对喷施角度小于靶区雾滴数据进行直方图和核密度估计曲线分析，以评估均匀效果，如图 22 所示，分析发现原始宽度沉积分布较为分散、峰值多、曲线起伏大。而调整宽度雾滴分布更集中，峰值少，曲线波动小，沉积分布更均匀[21]，避免局部过量沉积，提高药液利用率。

3.2.3　喷施流量验证试验

为验证理论喷施流量的准确性，设定 3 组不同的理论喷施流量。在相同作业条件下，每组进行 3 次重复试验，每次喷施持续 1 min。通过量筒收集喷洒出的雾滴体积，计算各组的实际平均喷雾流量，并进一步求得理论值与实测值之间的流量误差。试验

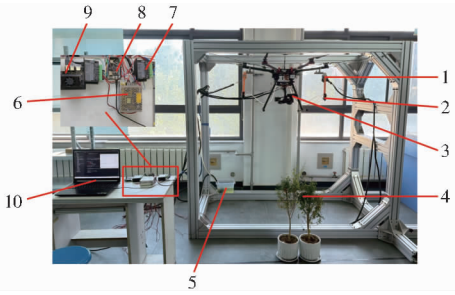

图 17 试验平台

Fig. 17 Test platform

1. 步进电机 2. 喷头 3. 相机 4. 识别目标 5. 泵体水箱 6. 变压器 7. 步进电机驱动板 8. STM32 9. Jetson Orin Nano 10. 监测点

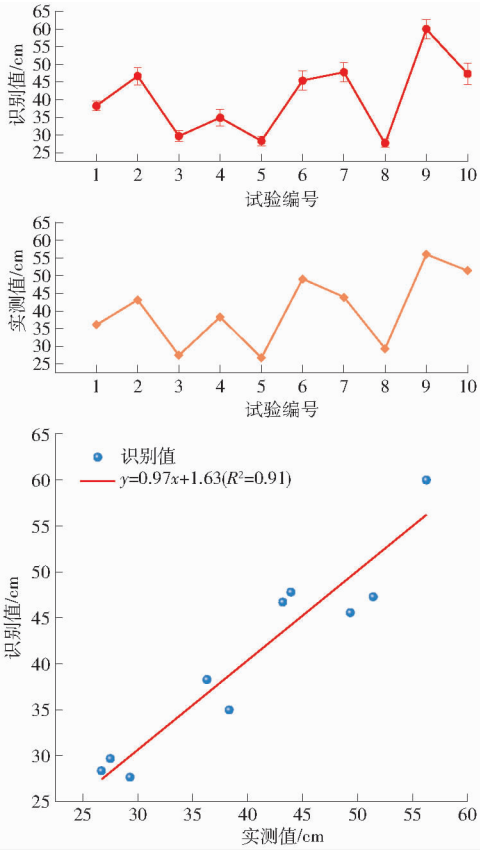

图 18 算法识别误差及拟合图

Fig. 18 Algorithm recognition error and fitting graph

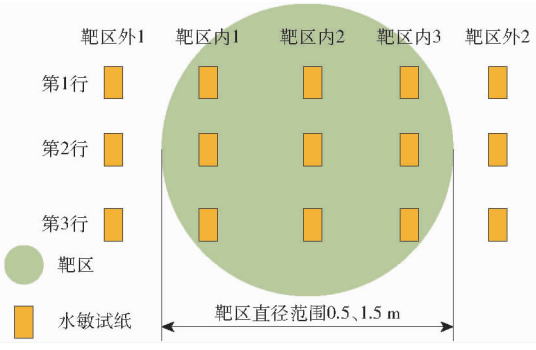

图 19 试验区水敏试纸布置图

Fig. 19 Layout of water-sensitive test paper in experimental area

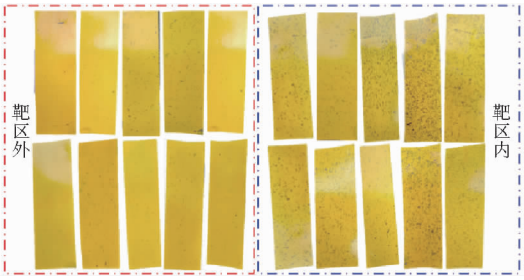

图 20 部分水敏试纸图

Fig. 20 Partial diagrams of water-sensitive test strips

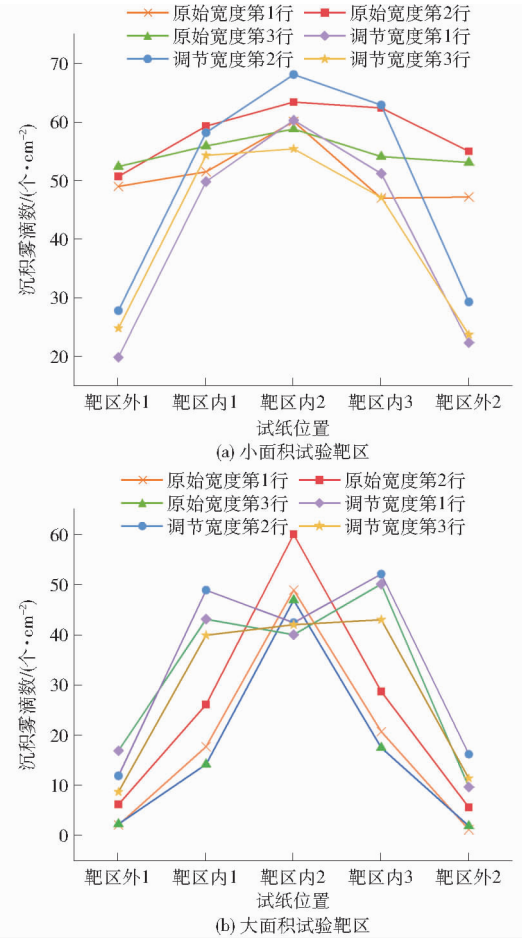

图 21 雾滴分布统计图

Fig. 21 Statistical chart of fog droplet distribution

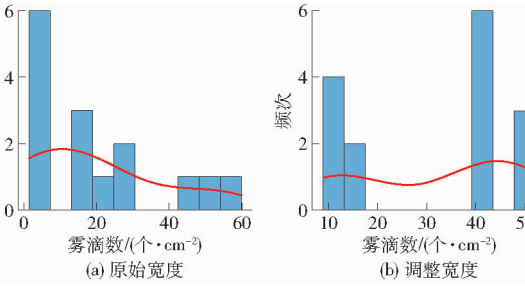

图 22 雾滴直方图和核密度估计曲线分析

Fig. 22 Analysis of droplet histogram and kernel density estimation curve

结果如图 23 所示,经分析 PID 控制下平均误差为 1.82%,而模糊 PID 平均误差为 1.5%。

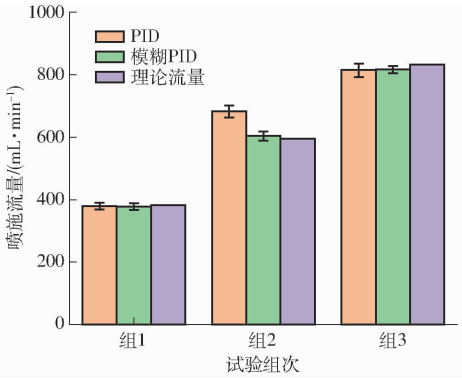

图 23　流量验证统计图

Fig. 23　Flow verification statistical chart

3.2.4　田间试验验证

为验证目标装置对沉积效果的影响，设计单因素对照试验，试验方案如表 3 所示，以装置“开启”与“关闭”为唯一变量，其余控制条件（转速、高度、雾滴直径）保持一致，并在果树不同冠层布置水敏试纸，统计每棵果树水敏纸的平均雾滴沉积数，每组设置 3 次平行重复试验。通过独立样本 t 检验对试验数据进行统计分析，如图 24 所示。结果显示：统计检验结果为 $t = 3.29$、$P = 0.03$，达到 $P < 0.05$ 的统计显著水平，装置开启状态下沉积效果更优，进一步验证了开启状态的优势。

表 3　单因素试验设置

Tab. 3　Single-factor test volume setting

序号	速度/(m·s⁻¹)	高度/m	雾滴直径/μm	装置状态
1	4	3	210	关闭
2	4	3	210	关闭
3	4	3	210	关闭
4	4	3	210	开启
5	4	3	210	开启
6	4	3	210	开启

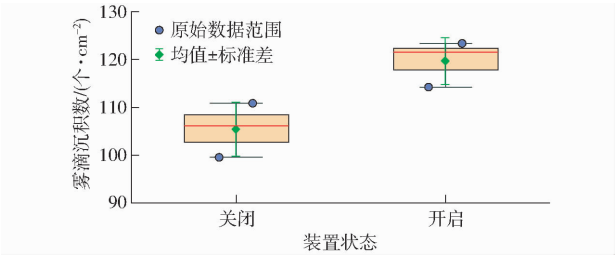

图 24　试验 t 检验结果

Fig. 24　Test t-test results

4　结论

（1）设计了基于果树冠层识别的无人机可变角度变量喷施装置。装置由摄像头、步进电机、离心喷头、流量计及无刷水泵等部件组成，基于模糊 PID 算法实现了喷头角度与喷施量的双闭环控制。

（2）提出了一种果树冠层边界宽度识别算法，实现果树冠层边界及其果树行宽度测量。算法离线识别率为 91.58%，识别平均误差为 7.32%，线性拟合 $R^2 = 0.91$，能够准确获取果树边界及其宽度信息。

（3）搭建了无人机可变角度变量喷施试验平台，验证靶区雾滴沉积分布效果。喷施角度大于靶区时，通过调节靶区外部沉积数量平均降低 26.61 个/cm²；单位面积上雾滴沉积数量降低 51.94%，喷施角度小于靶区时，通过调节靶区内外部沉积数量平均提升 25.37 个/cm²，单位面积上雾滴沉积数量提高 54.8%，核密度估计曲线更平滑，沉积均匀性提高。田间试验结果显示：统计检验结果为 $t = 3.29$、$P = 0.03$，达到 $P < 0.05$ 的统计显著水平，装置开启状态下沉积效果更优。

参　考　文　献

[1]　李珺，丁彬彬，史维娟，等. HM－YOLO：融合多尺度特征的轻量化航拍图像检测算法[J/OL]. 计算机工程与应用，2025：1－16. https://link.cnki.net/urlid/11.2127.tp.20250619.1448.008.
LI Jun, DING Binbin, SHI Weijuan, et al. HM－YOLO: lightweight aerial image detection algorithm fusing multi-scale features [J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2025:1－16. https://link.cnki.net/urlid/11.2127.tp.20250619.1448.008. (in Chinese)

[2]　PERZ R, WRONOWSKI K. UAV application for precision agriculture[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2019, 91(2): 257－263.

[3]　RADOGLOU-GRAMMATIKIS P, SARIGIANNIDIS P, LAGKAS T, et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture[J]. Computer Networks, 2020, 172: 107148.

[4]　BASIRI A, MARIANI V, SILANO G, et al. A survey on the application of path-planning algorithms for multi-rotor UAVs in precision agriculture[J]. Journal of Navigation, 2022, 75(2): 364－383.

[5]　FU S, REN N, LIU S, et al. An improved hierarchical leaf density model for spatio-temporal distribution characteristic analysis of UAV downwash air-flow in a fruit tree canopy[J]. Agronomy, 2025, 15(8): 1867.

[6]　刘冬梅，杨杭旭，周宏平，等. 密植矮化茶园地面低容量仿形喷雾液滴沉积性能研究[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：96－105.
LIU Dongmei, YANG Hangxu, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition performance of low-capacity profiling sprayin densely

planted dwarf tea plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):96 – 105. (in Chinese)

[7] NAN Y, ZHANG H, ZHENG J, et al. Research on profiling tracking control optimization of orchard sprayer based on the phenotypic characteristics of tree crown[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106455.

[8] LI Y, WANG X, ZHANG Z, et al. Design and test investigation of a 3WZ – 600 profiling sprayer for dwarf-dense planting jujube orchard[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 213 – 224.

[9] LIU C, HU J, YU Z, et al. Optimal design and dynamic characteristic analysis of double-link trapezoidal suspension for 3WPYZ high gap self-propelled sprayer[J]. Agriculture, 2024, 14(2): 319.

[10] 岑振钊. 植保无人机自适应变量对靶喷雾系统的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
CEN Zhenzhao. Design and experiment of variable target spray system for plant protection UAV[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[11] KIM W S, LEE D H, KIM Y J, et al. Path detection for autonomous traveling in orchards using patch-based CNN[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105620.

[12] GONG H, ZHUANG W, WANG X. Improving the maize crop row navigation line recognition method of YOLOX[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1338228.

[13] LIU X, QI J, ZHANG W, et al. Recognition method of maize crop rows at the seedling stage based on MS – ERFNet model [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,211:107964.

[14] LI G, LE F, SI S, et al. Image segmentation-based oilseed rape row detection for infield navigation of agri-robot[J]. Agronomy, 2024, 14(9): 14091886.

[15] ZHANG J, BASSO B, PRICE R F, et al. Estimating plant distance in maize using unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0195223.

[16] DIAO Z, GUO P, ZHANG B, et al. Maize crop row recognition algorithm based on improved UNet network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 210: 107940.

[17] 汪昕,杨德秋, 李洋, 等. 马铃薯捡拾装置作业参数模糊 PID 自调节系统研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7):361 – 373.
WANG Xin, YANG Deqiu, LI Yang, et al. Fuzzy PID self adjusting system for operation parameters of potato picking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7):361 – 373. (in Chinese)

[18] 张少侠, 闫建伟, 蒙超, 等. 基于机器视觉的农业车辆及机器人导航技术研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(12):12 – 27.
ZHANG Shaoxia, YAN Jianwei, MENG Chao, et al. Research progress of agricultural vehicle and robot navigation technology based on machine vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2025,61(12):12 – 27. (in Chinese)

[19] 张磊, 汤小伟, 李红兵, 等. 一种考虑成像特性的摄像机线性标定方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7):1832 – 1841.
ZHANG Lei, TANG Xiaowei, LI Hongbing, et al. A linear camera calibration method considering camera imaging characteristics[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020,51(7):1832 – 1841. (in Chinese)

[20] ZHU H, 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.

[21] 徐晓刚, 张扬, 王天波, 等. 多尺寸水滴喷雾掺混增强效应[J]. 航空学报, 2023, 44(增刊 2):183 – 193.
XU Xiaogang, ZHANG Yang, WANG Tianbo, et al. Mixing enhancement effect of multi-size water droplet spray [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023,44(Supp. 2):183 – 193. (in Chinese)