

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.07.015

基于机器视觉和北斗定位的小麦变量喷雾系统研究

杨文超^{1,2} 何进^{1,2} 周靖凯^{1,2} 李洪文^{1,2} 王庆杰^{1,2} 卢彩云^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部保护性耕作农业装备重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对传统植保喷杆喷雾机作业时各喷头以同等药量喷洒的方式导致农药浪费、利用率低和污染环境等问题, 以生长前期的小麦为研究对象, 设计一种基于北斗定位系统和机器视觉的小麦变量喷雾作业系统。通过双平面高度投影法完成对感兴趣区域获取, 研究了速度、植株密度对喷雾的影响, 提出变量喷雾流量的控制方法。在定位系统规划的目标区域内, 通过机器视觉处理实现变量喷雾, 试验结果表明, 相同机组速度下, 植株密度稀疏区相对植株密度正常区的平均雾滴覆盖率平均减少 12.06%; 相同植株密度下机组前进速度 0.75 m/s 相对 1.50 m/s 的平均雾滴覆盖率平均增加 3.94%。在满足喷雾标准的情况下, 可以在不同速度、不同植株密度下实现变量喷雾。为验证目标区域边界行驶速度对等级变换准确度, 进行定位传感器实时判断在目标区域边界喷头相对位置并控制开闭, 试验结果表明, 在行驶速度为 0.50 m/s 时准确度最高, 区域边界行驶超出量误差平均值为 48.72 cm; 为验证行驶方式对喷雾等级变换准确度的影响, 使用北斗定位系统在目标区域边界开展行驶方式对喷雾等级变换准确度的影响试验, 试验结果表明, 驶入目标区域超出量误差平均值为 7.20 cm。

关键词: 小麦; 机器视觉; 北斗定位系统; 目标区域; 变量喷雾

中图分类号: S491 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0150-12 **OSID:** 

Design of Wheat Variable Spray System Based on Machine Vision and Beidou Positioning

YANG Wenchao^{1,2} HE Jin^{1,2} ZHOU Jingkai^{1,2} LI Hongwen^{1,2} WANG Qingjie^{1,2} LU Caiyun^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment for Conservation Tillage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problems of waste of pesticide, low utilization rate and environmental pollution caused by spraying the same amount of pesticide in the traditional plant protection spray rod sprayer, a wheat variable spray operation system based on positioning system and machine vision was designed. The region of interest (ROI) was obtained by double-plane height projection method. The effects of velocity and plant density on spray volume were studied, and the control method of variable spray volume was proposed. In the target area planned by the positioning system, variable spray was realized by machine vision processing. The test results showed that at the same unit speed, the average fog drop coverage in the sparse area of plant density was reduced by 12.06% compared with that in the normal area of plant density. At the same plant density, the average fog drop coverage rate at unit advancing speed of 0.75 m/s was 3.94% higher than that at speed of 1.50 m/s. Under the condition that the spray standard was satisfied, variable spray can be realized at different speeds and different plant densities. In order to verify the grade transformation accuracy of the driving speed at the boundary of the target area, the positioning sensor was used to judge the relative position of the nozzle at the boundary of the target area in real time and control the opening and closing. The test results showed that the accuracy was the highest when the driving speed was 0.50 m/s, and the average exceeding error at the boundary of the region was 48.72 cm. In order to verify the influence of driving mode on the accuracy of spray level transformation, a test on the influence of driving mode on the accuracy of spray level transformation was carried out at the

收稿日期: 2021-07-14 修回日期: 2021-11-24
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-03)和中国农业大学2115人才工程项目
作者简介: 杨文超(1993—),男,博士生,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail: yangwenchaoau@163.com
通信作者: 何进(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与计算机测控技术研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

boundary of the target area by the positioning system. The test results showed that the average value of the minimum outsize error of driving into the target area was 7.20 cm.

Key words: wheat; machine vision; Beidou positioning system; target area; variable spray

0 引言

植保作业作为农业生产中的一个重要环节,也是确保丰产丰收的主要措施之一^[1]。随着农业机械化技术的发展与进步以及植保机械的推广与运用^[2],其作业可有效提高工作效率,避免人工喷药对身体带来的副作用,同时作业所施用的化学农药可使农产品损失减少 45%^[3]。

由于作业环境、作物品种以及喷雾目的和方式不同,植保机械的作业方式和手段也不尽相同。目前变量喷雾系统研究主要包括变量喷雾探测技术和变量喷雾流量控制技术。变量喷雾探测技术目前主要有美国 Patchen 公司^[4]研制的 Weedseeker 喷药系统,主要通过光学传感器对非作物行检测有无杂草存在,该系统对行间非作物区域喷洒除草剂节省农药喷施量 60%~80%;OEBEL 等^[5]设计了基于处方图的变量喷药作业控制系统,系统使用高精度 GPS 定位设备,通过施药装置的实时位置与处方图相匹配,通过计算输出控制信号来控制喷药量。在变量喷雾流量控制技术方面 CASE 公司^[6]设计的自走式变量喷药机采用脉冲调控高速电磁阀来实现喷头流量的调控,该方法提高了喷雾雾滴的均匀性。小麦在生长前期的植保主要为了预防病虫害,由于土壤肥力、墒情不同,导致同一田块不同区域小麦的生长密度存在差异,普通喷雾方式容易造成药液浪费和环境污染等问题^[7]。近年来随着农业现代化的发展,变量喷雾技术也取得了一定的研究成果,对于小麦的变量喷雾则研究较少。

本文基于视觉传感器的变量喷雾探测技术实时分析田间小麦植株密度,通过变量喷雾流量控制技术对生长前期的小麦实现变量喷雾。同时使用北斗定位系统对目标喷雾区域做出规划,以期较好地实现在指定区域内对不同植株密度的小麦实现变量控制喷雾。

1 变量喷雾系统总体设计

1.1 结构与系统设计

本文变量喷雾系统主要通过目标区域内小麦植株密度进行识别,实行植株正常区域正常喷、植株稀疏区域少喷、无植株区域不喷以及对非目标区域不喷。基于以上设计要求,提出一种基于机器视觉和北斗定位系统的变量喷雾系统。其总体结构如

图 1 所示,主要由定位传感器、视觉传感器、高度传感器、喷杆、喷头 + 电磁阀的变量喷头和供药系统等组成^[8]。

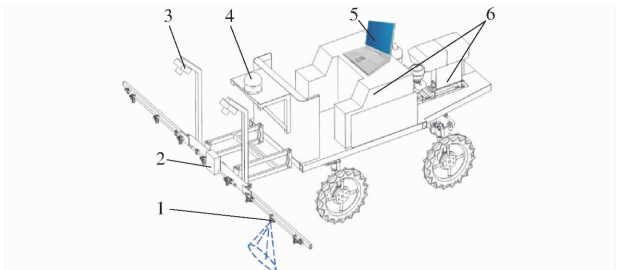


图 1 变量喷雾系统结构示意图

Fig.1 Schematic of variable spray system structure

1. 喷雾执行机构 2. 高度传感器 3. 视觉传感器 4. 定位传感器 5. 中央处理器 6. 供药系统

变量喷雾系统功能框图如图 2 所示。系统主要由检测装置、中央处理器模块和执行机构组成。检测装置包括:视觉传感器(威鑫视界 SY002HD 型摄像头)、定位传感器(AD300 型 GNSS-RTK 定位系统,山东北斗华宸导航技术有限公司)、高度传感器(MyAntenna L4 型激光传感器);中央处理器模块包括 Raspberry pi 4B(操作系统 Raspbian);执行机构包括:电磁阀(Zwqd/浙文 2L030-08 06 型)、喷头和水系统。相关装置具体参数如表 1 所示。

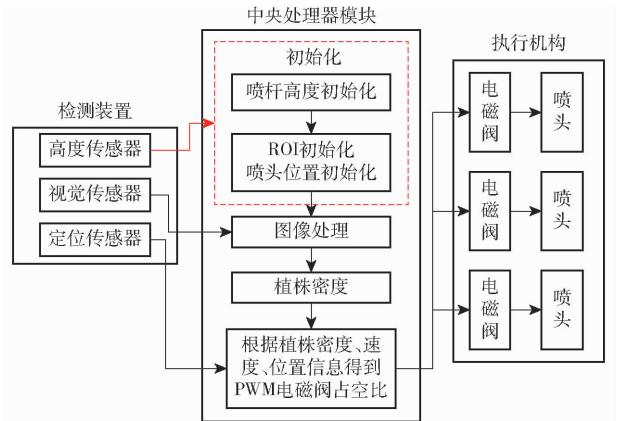


图 2 系统功能框图

Fig.2 System function block diagram

载具采用自走式喷杆喷雾机,其为横喷杆,可折叠,喷杆离地的高度可以通过液压式调节机构控制^[9]。自走式喷杆喷雾车的喷杆为前置式自走式喷杆喷雾机。如图 3 所示,为了使得变量喷雾探测机构系统的视觉传感器可以实时探测田间情况,将相机固定于整个变量喷雾系统的最前端即喷杆正上方,且摄像头会随着喷杆的变化而变化,为了获取喷杆前方的图像数据,使得摄像头与水平面呈一定的

表 1 技术参数
Tab. 1 Technical parameters

装置	参数	数值/类型
威鑫视界 SY002HD 型摄像头	传感器	1/2.7 英寸 CMOS 高清
	畸变指标/%	< 2
	信噪比/dB	< 50
	物距/mm	≥ 10
MyAntenna L4 型激光 传感器	精度/mm	±(1 + 0.000 5D)
	分辨率/mm	1
	测量速率/Hz	1 ~ 10(连续测量模式) 约 10/20(快速连续测量模式)
	激光类型	630 ~ 670 nm, Class II, < 1 mW
Zwqd/浙 文电磁阀	工作电压/V	24
	响应时间/ms	10 ~ 20
迪科爱农 agrotop 植 保防漂移	工作压力/MPa	0.1 ~ 0.6
	喷雾形状	110°扇形
	持续喷雾寿命/h	800 ~ 1 000
喷嘴	喷嘴间距/cm	50

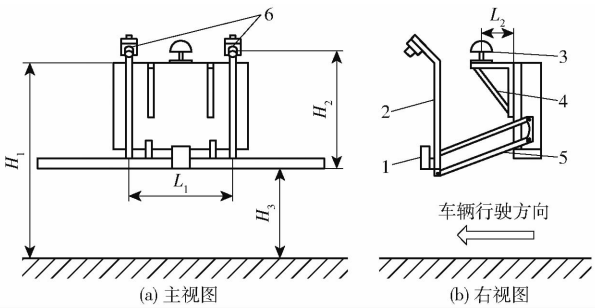


图 3 变量喷雾探测机构

Fig. 3 Diagrams of variable spray detection mechanism
1. 红外激光传感器 2. 相机固定架 3. 定位天线 4. 定位天线固定架 5. 喷杆 6. 相机

角度,相机俯仰角约 25°。为了使得相机能够尽可能多看到喷头,摄像头距离喷杆底部的高度 H_2 约 100 cm。在此高度下,每个摄像头观测到 3 个喷头,两个摄像头之间的间距 L_1 约 130 cm。定位天线放置于车辆中心的正前方,且位于喷杆的后方,天线安装架高度 H_1 约 170 cm,天线安装位置与车前壁距离 L_2 约 25 cm。激光传感器安装于喷杆中心位置,用来测量喷杆高度 H_3 。

中央处理器模块是变量喷雾系统的核心部件之一,该模块对喷药系统的位置信息、航向信息、速度信息、图像信息进行处理,并判断喷雾流量,根据流量和 PWM 信号占空比的关系^[7],输出占空比信号,调节电磁阀开口时间,从而控制喷雾量。处理器主要用来同时接收定位模块和视觉传感器的图像信息,经过处理后根据喷药量与 PWM 信号占空比的关系,输出控制信号,从而控制执行机构的动作^[10]。

执行机构由供水系统和变量执行机构组成。供

水系统由水泵、调压阀、压力传感器和供水箱组成,负责对执行机构提供压力以及水流。变量执行机构由喷杆、喷头和电磁阀组成,负责接收获取的信号,从而改变喷头流量。变量喷雾变流量执行机构原理如图 4 所示。根据常规喷雾标准,大田喷杆喷雾机械通常采用 110°锥形喷头,喷头间距约 50 cm,由于对喷雾效果不做特殊要求,所以喷杆和喷头与常用的喷雾器一致。

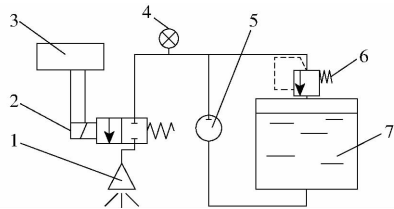


图 4 喷雾执行机构原理图

Fig. 4 Schematic of spray actuator

1. 喷头 2. 电磁阀 3. 控制器 4. 压力传感器 5. 水泵 6. 调压阀 7. 水箱

1.2 工作原理及参数

采用 3WP-280 型自走式喷杆喷雾车作为系统搭载的平台,液压系统采用车辆内燃机给予水泵动力,水泵将液体压入水管,水管与电磁阀和喷头组成的变量喷头相连接。作业前通过定位系统设定特定喷雾目标区域,当机组进入目标工作区域,相机实时检测特定区域的小麦生长情况,定位传感器记录速度、航向角、位置信息,当植株密度和速度发生变化时,喷雾等级会相应变化。实际作业过程中当机组不处于目标区域中,全部停止喷雾,当机组处于目标区域中,部分喷头不处于目标区域中,超出区域喷头则停止喷雾,从而实现规定区域内变量喷雾功能。变量喷雾机技术参数如表 2 所示。

表 2 变量喷雾机技术参数
Tab. 2 Technical parameters of variable sprayer

参数	数值
整机尺寸/(mm × mm × mm)	1 935 × 3 233 × 2 345
作业最大速度/(m · s ⁻¹)	1.5
正常工作压力/MPa	0.5 ~ 1.0
喷头数量/个	6
水箱容量/L	280
动力/kW	8.95

2 感兴趣区域获取方法

2.1 感兴趣区域获取平台设计

感兴趣区域获取方法是以小麦田所在平面为基准面,喷头对应区域为实际检测区域。根据上述需求,设计图像感兴趣区域获取方法,并搭建了感兴趣区域获取试验平台(图 5)。

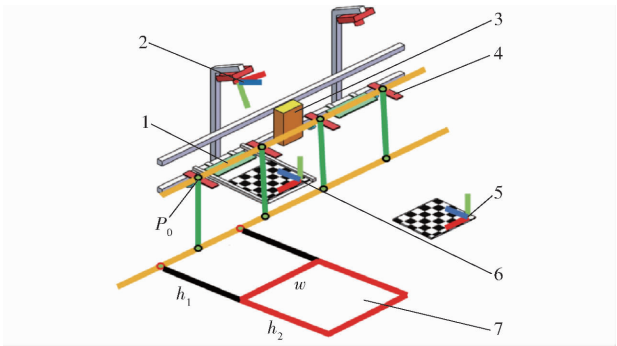


图 5 视觉静态感兴趣区域获取试验平台

Fig. 5 Visual static ROI acquisition test platform

1. 绿色标识板 2. 相机坐标系 3. 红外激光传感器 4. 红色标识板 5. 地面坐标系 6. 喷杆平面坐标系 7. 单个喷头管控区域

将喷头标识板固定于喷头正上方用于标识喷头位置。将喷杆标识板固定于平行于喷杆的位置，且与喷头标识板安装于同一平面，用于标识喷杆位置。喷杆标识板长度为 300 mm，宽度为 90 mm，如图 6a 所示；喷头标识板长度为 190 mm，宽度为 50 mm，如图 6b 所示。喷头标识板和喷杆标识板拟合直线得到的交点即为喷头交点 P_0 。

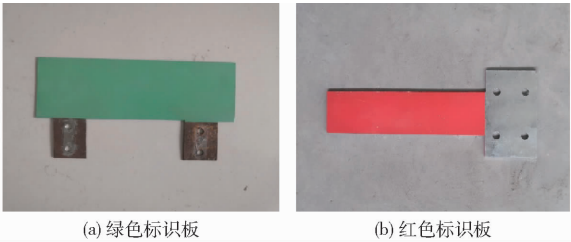


图 6 喷头标识板

Fig. 6 Sprinkler head labeling board

考虑到相机安装于喷杆上实际要求，将喷头对应区域底边与喷杆的距离 h_1 设计为 200 mm。综合以上考虑，设计喷头对应区域的宽度 h_2 为 400 mm。一般扇形喷头喷雾角为 110° ，实际喷雾高度在 400 ~ 600 mm 之间，在此高度下喷头有效宽度为 500 ~ 700 mm，设计喷头对应区域长度 w 为 600 mm。

2.2 感兴趣区域计算方法

设计了一种感兴趣区域的快速计算方法，通过这种方法可以快速求得喷头对应区域在图像中的位置，即感兴趣区域。感兴趣区域计算方法流程图如图 7 所示。

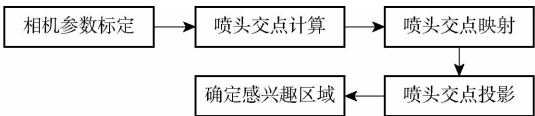


图 7 感兴趣区域获取方法流程

Fig. 7 Flow chart of ROI acquisition method

2.2.1 喷头交点计算

喷头交点计算使用颜色识别的方式对喷杆标识

板和喷头标识板进行识别，将识别结果进行拟合求解获得图像中的喷头交点，将喷头交点映射到喷杆平面坐标系，获得喷杆平面喷头交点，具体步骤如下：

(1) 将棋盘格放置喷杆平面进行图像采集，使用标定结果（预试验相机参数已标定）对图像进行畸变矫正。将校正后的喷杆平面棋盘格图像使用 $2G-B-R$ 法和大津法进行二值处理，得到喷杆标识板的二值图像，使用最小二乘法对该二值图像下的 True 值像素点进行拟合，得到喷杆标识板的拟合直线，称为喷杆拟合直线。如图 8a 所示，喷杆拟合直线方程为

$$z = -0.00255i + 662.58 \tag{1}$$

式中 z ——像素坐标系纵坐标

i ——像素坐标系横坐标

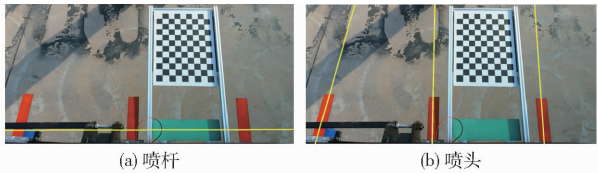


图 8 喷杆喷头标识拟合直线

Fig. 8 Spray rod and sprinkler head identification fitting straight line

(2) 将校正后的喷杆平面图像使用 $2R-G-B$ 法和大津法进行二值处理，处理结果如图 9 所示。图像中出现 3 个喷头标识板，需要对该图进行分区，使每个区域中只有一个喷头标识板，分割后再进行最小二乘法直线拟合。



图 9 喷头标识板二值图像

Fig. 9 Binary image of sprinkler head labeling board

(3) 使用最小二乘法对二值图像进行拟合，得到每一个喷头标识板的拟合直线^[11]，称为喷头拟合直线。如图 8b 所示，每一个喷头拟合直线表达式为：

喷头 1 $z = -3.53i + 1\,040.73$ (2)

喷头 2 $z = -50.36i + 29\,851$ (3)

喷头 3 $z = 14.28i - 14\,259.6$ (4)

由式(1) ~ (4) 可得喷头交点在像素坐标系下的坐标分别为： $(107.215, 662.303)$ 、 $(579.604, 661.100)$ 、 $(1\,044.440, 659.916)$ 。

2.2.2 喷头交点映射和坐标投影

将喷杆平面棋盘格图像进行单应性矩阵估计,由单应性矩阵可获得喷头坐标点到喷杆平面,得到喷杆坐标系的喷头交点坐标,计算方法为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = u \mathbf{R}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 (x,y) ——需转换成目标平面坐标,即喷杆坐标系下的坐标
 (X,Y) ——已知平面的坐标,即图像坐标系下的坐标

u ——比例因子

$\mathbf{R}_{3 \times 3}$ ——由棋盘格图像获取的单应性矩阵

通过投影方式预试验对双平面投影法、单平面高度投影法和双平面高度投影法 3 种方式的准确度比较,最终选择双平面高度投影法。双平面高度投影法通过拍摄一幅喷杆平面棋盘格图像和一幅地面棋盘格图像,使用红外激光传感器测量喷杆平面高度。通过估算喷杆平面棋盘格图像和地面棋盘格图像的外参矩阵,得到喷杆坐标系和地面坐标系的转换矩阵,使用激光传感器获取喷杆平面的高度,将喷头交点转换到地面坐标系,令坐标转换后的喷头交点坐标的高度为喷杆高度,得到该喷头交点在地面的投影坐标。喷头交点由喷杆坐标系转换为地面坐标系的关系式为

$$\begin{bmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{f \rightarrow c} \times \mathbf{M}_{p \rightarrow c} \begin{bmatrix} X_{pw} \\ Y_{pw} \\ Z_{pw} - h \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中 $\mathbf{M}_{p \rightarrow c}$ —— 4×4 的喷杆坐标系的外参矩阵
 $\mathbf{M}_{f \rightarrow c}$ —— 4×4 的地面坐标系的外参矩阵
 (X_{pw}, Y_{pw}, Z_{pw}) ——喷杆平面喷头世界坐标系坐标
 (X_f, Y_f, Z_f) ——地面坐标系下的喷头投影点坐标
 h ——测量所得喷杆平面的高度

2.2.3 感兴趣区域确定

不同的投影方式能够影响感兴趣区域准确度和灵活性。采用双平面高度投影法可以获得较高的准确度,并且具有较强的灵活性,即可以随着高度的变换改变感兴趣区域在图像中的位置。喷头投影点是由喷杆拟合直线间接求得,所以喷头投影点都处于一条直线。选取两侧的投影点求取地面坐标系喷杆投影直线 $y = kx + b$,直线与坐标系夹角 $\alpha = \arctan \varphi$ 。如图 10 所示,以其中一个喷头为例,该喷头在地面

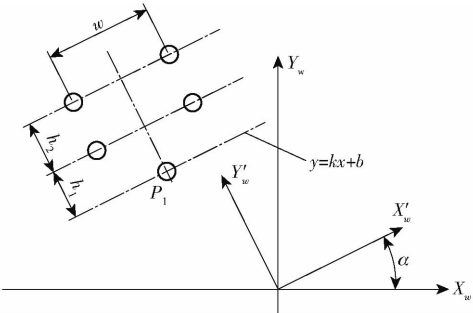


图 10 地面坐标系感兴趣区域确定

Fig. 10 Determination of ROI in ground coordinate system

坐标系下的投影坐标是 $P_1(X_{f1}, Y_{f1})$,为了方便求得 P_1 所对应的 4 个地面感兴趣区域点,求得 4 个感兴趣区域点在地面世界坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} X'_{f1} \\ Y'_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{f1} \\ Y_{f1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} X_{f2} & X_{f3} & X_{f4} & X_{f5} \\ Y_{f2} & Y_{f3} & Y_{f4} & Y_{f5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} X'_f - \frac{w}{2} & X'_f + \frac{w}{2} & X'_f - \frac{w}{2} & X'_f + \frac{w}{2} \\ Y'_f + h_1 + h_2 & Y'_f + h_1 + h_2 & Y'_f + h_1 & Y'_f + h_1 + h_2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 (X_{f1}, Y_{f1}) ——喷头交点在地面的投影坐标
 α ——地面坐标系喷杆投影直线与横轴夹角
 (X'_{f1}, Y'_{f1}) ——地面坐标系旋转 α 后的喷头交点投影坐标

(X_{f2}, Y_{f2}) 、 (X_{f3}, Y_{f3}) 、 (X_{f4}, Y_{f4}) 、 (X_{f5}, Y_{f5}) 为喷头对应区域的四点区域坐标。

双平面高度投影法结合了双平面投影法和单平面高度投影法的优点。如图 11 所示, P_0 、 P_1 、 P_2 分别为理想交点坐标所得地面投影坐标、喷头对应区域近边、喷头对应区域远边, P'_0 、 P'_1 、 P'_2 分别为实际的交点坐标所得地面投影坐标、喷头对应区域近边、喷头对应区域远边,双平面高度投影法将喷头交点由喷杆平面坐标转换到地面坐标。由于双平面高度投影法使用了与双平面投影法相同的坐标转换方式,将喷头交点由喷杆平面坐标转换到地面坐标,由于计算所得喷头交点与喷杆距离较小,约 7.5 cm,所以其中形变导致的高度误差相对较小,且在计算地面喷头投影点时引入了高度,可以使地面喷头投影的 Z_f 坐标可以随着高度的变化而变换,并且具有较高的交并比。

基于以上研究分析,本文综合考虑了灵活性和感兴趣区域的准确度,在感兴趣区域获取方法的基础上,采用双平面高度投影法完成喷头交点到地面的投影。

图 11 双平面高度投影法投影误差图

Fig. 11 Projection error diagram of biplanar height projection method

1. 喷杆平面支撑架 2. 红外激光传感器 3. 喷头标识板 4. 喷杆坐标系 5. 地面坐标系

3 变量喷雾流量控制方法

变量喷雾流量控制系统设计主要通过植株密度和机组前进速度来判断相应喷头喷雾等级。使用 PWM 变量喷雾技术,建立占空比、流量、密度数据、速度的喷雾量模型,设计喷雾等级决策方法,实现流量等级的变换^[12-14]。

3.1 喷雾量模型建立

喷头流量需要和植株密度相匹配,单位植株密度所需喷雾量为设定值,该值与喷施药物种类以及喷雾对象有关,根据上述条件,单位面积内正常喷雾所需药量计算公式为

$$u = \frac{q}{60wv} \quad (9)$$

式中 u ——单位面积内正常喷雾所需药量, L/m^2

q ——喷头流量, mL/min

所使用喷头流量 q 为 615 mL/min 。标准情况下行驶速度 v 为 1.5 m/s ; 单个喷头幅宽 w 选择为 0.6 m , 可得 u 为 11.38 mL/m^2 。

在实际喷雾过程中,存在单位面积植株覆盖率 D 和行驶速度 v 等变量,需要根据这两种情况做出变量喷雾决策,最终决策得喷头流量 q 。

(1) 植株覆盖率对流量的影响

在实际喷雾过程中,由于土壤墒情等情况的影响^[15],难以达到覆盖率为 100% 的情况,不同地块的植株密度不同,单位面积植株覆盖率 D 下单位面积所需药量为

$$Q = \frac{0.01138D}{k} \quad (10)$$

式中 O ——单位面积所需要的药量, L/m^2

 k ——喷雾时期最大植株覆盖率, %

(2) 速度对流量的影响

在实际喷雾过程中,行驶速度难以保持一致。由此建立单位面积药量 Q 和行驶速度 v 关系式为

$$Q = \frac{q}{60_{wv}} \quad (11)$$

联立方程式(10)、(11)获得喷头流量 q 和单位面积植株覆盖率 D 、行驶速度 v 的关系为

$$q = \frac{0.40968Dv}{k} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,行驶速度越大,植株密度越大,需求喷嘴的流量越大。

3.2 喷头流量等级决策方法

3.2.1 喷头流量占空比流量曲线

基于 PWM 控制的喷头流量模型与喷嘴的流量型号、系统喷雾压力、电磁阀的开关机械性能以及 PWM 控制信号频率等因素相关。当喷嘴的型号、系统喷雾压力、电磁阀型号和 PWM 控制信号频率等条件确定后,对喷头流量和 PWM 信号占空比进行标定,从而可得喷头流量与 PWM 占空比的线性方程为

$$q = As + b \quad (13)$$

式中 A ——特定压力和频率的流量占空比曲线的斜率

b ——流量占空比曲线的截距

s ——占空比

喷嘴采用迪科爱农 agrotop 植保防漂移喷嘴,喷头与电磁阀相结合,组成变量喷头(图 12)。

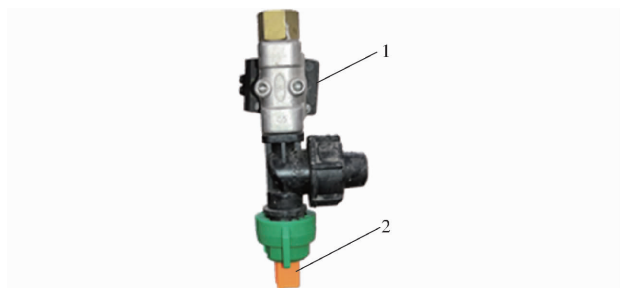


图 12 变量喷头

Fig. 12 Variable sprinkler

1. 电磁阀 2. 喷嘴

变量喷雾中压力越大,脉冲频率越大,雾滴均匀性越好,根据以往研究成果,系统中 PWM 频率采用 9 Hz,喷雾系统压力采用 0.6 MPa^[10],在该环境下,对每一个喷头进行占空比和流量的标定。标定过程中,喷雾时间为 1 min,通过设定 PWM 占空比,使用量筒记录每一个喷头的流量,获取每个 PWM 占空比下的流量,取平均值后的标定结果如表 3 所示。

如图 13 所示,使用最小二乘法拟合直线,可得压力 0.6 MPa 下,每个喷头的占空比流量曲线 $y =$

表 3 不同占空比时喷头流量标定结果

编号	占空比/%							
	100	90	80	70	60	50	40	30
0	610	600	550	495	480	430	390	350
1	610	610	590	540	500	470	435	400
2	615	610	580	550	500	475	430	395
3	630	640	630	600	565	520	470	435
4	620	620	610	600	555	520	500	440
5	600	600	600	580	540	490	460	420
平均值	614. 17	613. 33	593. 33	560. 83	523. 33	484. 17	447. 50	406. 67

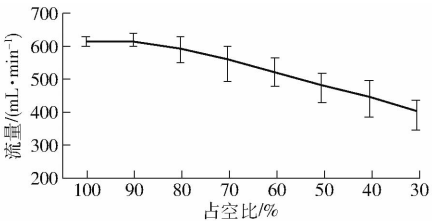


图 13 流量与占空比关系曲线

Fig. 13 Flow rate and duty cycle relationship curve

0. 003 75*s* + 0. 296。由表 3 可以看出,所使用的喷药机喷头在 PWM 占空比 30% ~90% 范围内,呈现出较好的线性关系,流量可调节范围为 400 ~ 600 mL/min,流量调节范围较大。当占空比处于 90% ~ 100% 范围时,喷头流量调节达到最大值。

3. 2. 2 喷雾等级决策

根据喷头流量、速度、单位面积植株密度公式,联立式(12)、(13)得到理论占空比和单位区域植株密度以及速度之间的关系,由标定可得 *A* = 0. 003 75、*b* = 0. 296,可得

$$s = \frac{0. 409\ 68 \frac{Dv}{k} - 0. 296}{0. 003\ 75} \times 100\%$$

(14)

由于每时刻的速度不同,每帧图像所得植株密度不同,为了减小占空比频繁变换的情况,本文将理论占空比通过等级决策值,划分相应的占空比。设定小于总流量 15% 的等级决策值,即 *s* ≤ -69% 时,等级为 0,对应占空比为 0,关闭电磁阀;设定处于总流量 15% ~ 50% 的等级决策值,即 -55% < *s* ≤ 5%,喷雾等级为 1,对应占空比为 40%;设定处于总流量大于 50% 等级决策值,5% < *s* ≤ 100% 之间,喷雾等级为 2,对应占空比为 100%。

4 目标区域变量喷雾

变量喷雾作为系统的核心部分^[16-17],喷头需要根据实际工作要求准确进行喷雾等级的变换^[18]。实际的工作环境中存在秧苗生长密度不同、机组在田间地头调转方向使得部分喷头在非目标区

域内等实际问题。因此目标区域内喷雾作业时通过机器视觉对不同的生长密度的作物实现喷雾等级变换;目标区域边界的非目标区域喷雾根据 GNSS 定位传感器实时判断控制喷头停止喷雾。

4. 1 基于机器视觉目标区域内变量喷雾

通过定位系统对目标喷雾区域做出规划,在目标区域内基于机器视觉的等级变换方法是将感兴趣区域图像进行图像变换和图像处理,实时获取每一个感兴趣区域的植株密度,当密度达到不同等级阈值时,喷头进行变量喷雾^[19]。

由于感兴趣区域是一个不规则的四边形,为便于计算在感兴趣区域内有效像素点的数量,本文使用透视变换将感兴趣区域图像变换为矩形。如图 14a、14b 所示,图像中的对象主要为小麦植株和背景,图像处理时常将彩色图像的 RGB 各个分量进行适当的组合转换,以增强植物,抑制背景。对小麦作物识别采用超绿灰度法,即

$$ExG = 2G - R - B$$

(15)

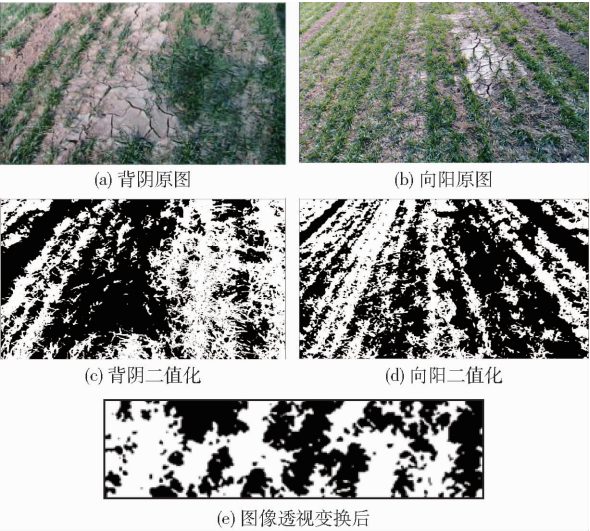


图 14 小麦图像处理结果

Fig. 14 Wheat image processing results

通过大津法计算出最优阈值 *T_h*,根据阈值 *T_h*将植物和背景分割处理,即

$$B = \begin{cases} 255 & (ExG \geq T_h) \\ 0 & (ExG < T_h) \end{cases} \quad (16)$$

当 $B = 0$ 为背景(黑色), $B = 255$ 为小麦植株(白色),结果如图 14c、14d 所示。

采用绿色植株占比的方式表示植株密度,将透视变换后的图像(图 14e)进行像素点数量统计,植株密度计算公式为

$$D = \frac{c_o}{A_r} \quad (17)$$

式中 c_o ——一个 ROI 区域中的有效像素点个数

A_r ——ROI 区域的像素面积

通过变量喷雾流量控制方法对喷雾进行等级决策,实现变量喷雾目的。

4.2 基于定位的目标区域边界喷雾

基于定位系统的目标区域边界喷雾控制方式^[20]:在工作前对每一个喷头位置与 GNSS 天线的相对位置进行确定;在系统工作时,使用相对位置数据和车辆定位数据,判断每一个喷头所处的位置是否在目标喷雾区域内,避免喷头在非目标喷雾区域误喷。

4.2.1 喷雾环境

目标区域喷雾等级变换的前提是在指定区域内进行喷雾,通过 GNSS 天线安装位置计算出每一个喷头和喷杆中心位置的实时坐标。在实际整个喷雾的作业过程中,会遇到脱离目标区域情况:

喷雾环境 1:在实际作业中,田块长度不完全是喷杆长度的倍数,在车辆行驶到边界区域时,会出现未喷雾的田块长度小于喷杆长度的情况,这时会出现车辆在目标区域内工作,部分喷头在区域外部,这种情况会导致非目标区域的误喷。

喷雾环境 2:车辆处于目标区域边界处,但喷头已经在区域内部,该情况常发生于地头转向。转向过程中当机组与田埂平行时,目标喷雾区域中地头部分出现重喷现象。

4.2.2 实时喷头位置确定方法

根据上述喷雾环境所适应的作业状态,为了解决喷雾环境 1 的问题,由 GNSS 天线安装位置与喷头相对位置、航向角和 GNSS 天线位置信息,实时判断每一个喷头是否在目标区域内,当喷头处于目标区域外时该喷头则停止喷雾。采用 3WP-280 型自走式喷杆喷雾车,其喷杆高度会随着液压杆的升降而变化(图 15),GNSS 天线的位置和喷头的相对位置随之产生变化,所以需要引入高度参数,完成动态的相对位置确定,以适应高度变化引起的相对位置的改变。

在不同高度下,喷杆的中心和天线的相对位置

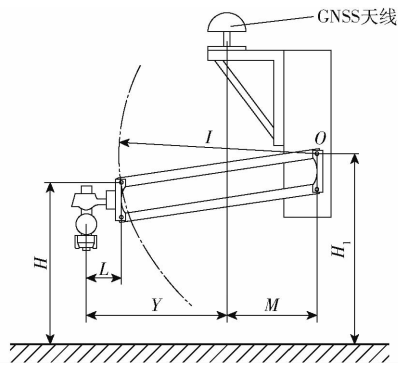


图 15 喷杆运动简图
Fig. 15 Motion diagram of spray rod

会发生变化,某一个高度下的喷杆中心到 GNSS 天线安装位置的距离为

$$Y_1 = \sqrt{I^2 - (H_p - H)^2} - (M - L) \quad (18)$$

式中 Y_1 ——在某一个高度下的喷杆中心到 GNSS 天线安装位置的横向距离,m

I ——升降杆长度,m

H_p ——平行四边形的铰点高度,m

H ——喷杆高度(下铰链高度),m

M ——GNSS 天线安装位置到点 O 的横向距离,m

L ——平行四边形铰点到喷杆中心的距离,m

由横向距离 Y_1 实时判断每一个喷头是否在目标区域内。

为了解决喷雾环境 2 的问题,当机组驶出地头时,停止喷雾。由于 GNSS 天线的位置在喷杆正后方,将喷杆中心作为判断位置,当喷杆中心处于目标工作区域外时,停止所有喷头。首先确定工作区域,记录目标喷雾区域经纬度,选取 4 个坐标点确定目标区域经纬度。

GPRMC 数据刷新频率为 10 Hz,使用串口实时获取 GPRMC 信号中的经纬度和航向角,其中航向角以正北方向为 0° ,顺时针角度增加,使用 UTM 投影计算 GNSS 天线投影坐标,并实时计算喷头位置坐标。如图 16 所示,将 xoy 坐标系下表示的 GNSS 接收器安装位置与每一个喷头目标点的关系坐标转换到坐标系 XOY 下,计算公式为

$$\begin{bmatrix} X'_2 & X'_3 & \cdots \\ Y'_2 & Y'_3 & \cdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & \cdots \\ y_2 & y_3 & \cdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X'_1 & X'_1 & \cdots \\ Y'_1 & Y'_1 & \cdots \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中 (X'_3, Y'_3) ——喷头在 XOY 坐标系下的位置坐标
 (x_2, y_2) ——喷杆中心在坐标系 xoy 下的位置坐标

(x_3, y_3) ——喷头在坐标系 xoy 下的位置坐标

β ——行驶航向角
(X'_1, Y'_1)——在坐标系 XOY 中 GNSS 接收器
安装位置坐标
(X'_2, Y'_2)——喷杆中心位置 P_{centre_d} 在坐标系
 XOY 下的位置坐标

点 P_{centre_d} 为虚拟点,用来判断车辆是否在目标区域
内。

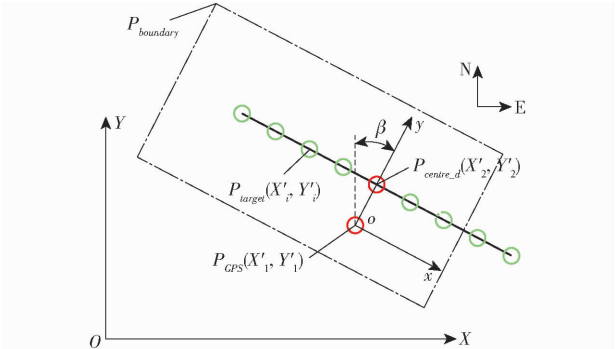


图 16 实时目标点计算示意图

Fig. 16 Schematic of real-time target point calculation

5 验证试验

5.1 试验材料

为了验证小麦变量喷雾系统的作业效果,2020
年 11 月于河南省焦作市武陟县进行喷药机喷雾试
验,试验对象为小麦,植株高度 40 ~ 80 mm。3WP -
260 型自走式喷杆喷雾机(图 17)的喷雾压力为
0.6 MPa,喷雾高度为 0.5 m,喷头最大流量为
0.615 L/min。

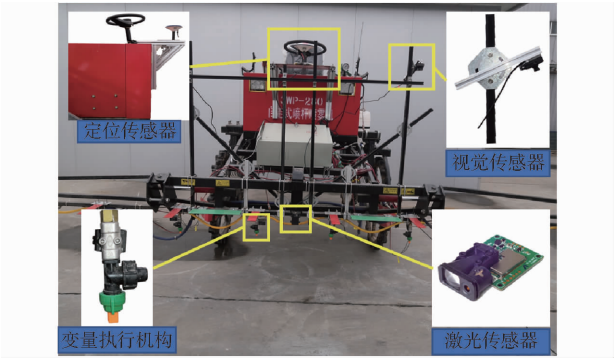


图 17 试验装置

Fig. 17 Test device

5.2 目标区域内变量喷雾性能试验

试验前期通过定位系统对目标喷雾区域做出规
划,通过机器视觉的等级变换方法将感兴趣区域图
像进行图像变换和图像处理,考察机具对目标区域
内不同植株密度实现变量喷雾的性能。

5.2.1 试验设计与评价方法

为了选取放置水敏试纸的采样区域,试验前期
使用标识框(标识框内框尺寸与喷头对应的图像检

测区域实际尺寸一致,长度为 60 cm,宽度为 40 cm。)对
田块进行标记,通过图像处理计算采样区域植株密
度,并将其划分为植株稀疏区域和植株正常区域。

根据田间植株生长情况,分别在植株稀疏区域
(计算密度小于 40%)和植株正常区域(计算密度大
于 40%)布置水敏纸,试验采样位置如图 18 所示。
为检测及评价变量喷雾性能的实际效果,试验使用
水敏纸(图 19)在采样区域记录每一次喷雾情况。

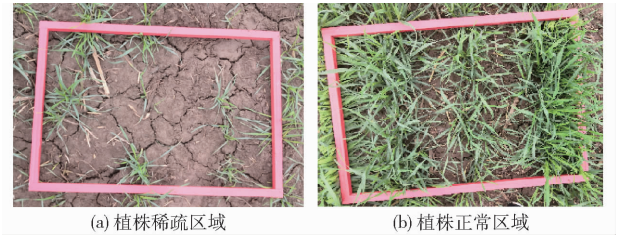


图 18 采样位置

Fig. 18 Sampling locations



图 19 水敏纸采样方式

Fig. 19 Sampling method of water-sensitive paper

试验采用 6 组喷头,对照组和试验组采用的喷
嘴型号、喷嘴喷雾角、喷雾压力、喷杆高度和电磁
阀型号等条件均保持一致。

选取 3 个植株密度正常的区域,将此组试验数
据作为对照组试验,机组速度为 1.5 m/s;选取 3 组
植株稀疏区域将此组试验数据作为试验组 1,机组
速度为 1.5 m/s;在与对照组相同的 3 个区域内将
该组试验作为试验组 2,机组速度为 0.75 m/s。水
敏纸收集并进行处理。

5.2.2 试验数据及分析

使用 DepositScan 软件对各个采样点的水敏纸
图像进行分析^[21],雾滴覆盖率如表 4 ~ 6 所示。植
株密度对变量喷雾量有着较大影响,3 组数据表明
相同机组速度下植株稀疏区相对植株正常区的平
均雾滴覆盖率减少 12.06%,相同植株密度下机组
前进速度 0.75 m/s 相对 1.50 m/s 的平均雾滴覆盖
率平均增加 3.94%。在满足喷雾标准的情况下,可
以在不同速度、不同植株密度下实现变量喷雾。

5.3 目标区域边界喷雾性能试验

目标区域边界喷雾主要是通过 GNSS 天线安装
位置计算出每一个喷头和喷杆中心位置的实时坐

表 4 第 1 组采样点处雾滴覆盖率

Tab.4 Fog drop coverage rate under sampling point of group 1 %

编号	试验组 1	试验组 2	对照组
1	22. 22	35. 12	31. 09
2	23. 07	40. 55	28. 35
3	19. 12	38. 22	33. 84
平均值	21. 47	37. 96	31. 09

表 5 第 2 组采样点处雾滴覆盖率

Tab.5 Fog drop coverage rate under sampling point of group 2 %

编号	试验组 1	试验组 2	对照组
1	20. 64	32. 22	30. 56
2	19. 33	35. 61	33. 77
3	19. 22	40. 22	34. 12
平均值	19. 73	36. 02	32. 82

表 6 第 3 组采样点处雾滴覆盖率

Tab.6 Fog drop coverage rate under sampling point of group 3 %

编号	试验组 1	试验组 2	对照组
1	22. 22	32. 5	38. 56
2	23. 07	36. 6	30. 2
3	17. 12	39. 01	34. 12
平均值	20. 80	36. 04	34. 29

标,在实际整个喷雾的作业过程中,实时判断每一个喷头是否在目标区域内,当喷头处于目标区域外时该喷头则停止喷雾。

5.3.1 目标区域边界喷头喷雾性能试验

根据喷雾环境 1,开展目标区域边界喷雾性能试验。系统工作时,实时判断每一个喷头的位置是否在目标喷雾区域内。在实际试验中,由于田间环境等因素^[22-23],增加了试验结果测量的难度和误差,因此选择平坦的地块进行路面试验,验证行驶速度对喷雾等级变换准确度的影响。如图 20 所示,根据该自走式喷杆喷雾机实际作业速度区间,将行驶速度分别调整为 0.5、1.0、1.5 m/s,在目标喷雾区域边界处行驶,测量超出目标喷雾区域的距离。每隔 0.5 m 测量喷雾超出量误差,并记录。

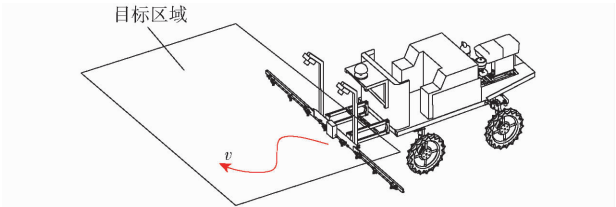


图 20 区域边界行驶

Fig. 20 Driving at regional boundary

试验结果如表 7 所示。行驶速度为 0.5 m/s

时,区域边界行驶的喷雾超出量误差平均值为 48.72 cm,标准差为 1.90 cm;行驶速度为 1.0 m/s 时,区域边界行驶的喷雾超出量误差平均值为 54.36 cm,标准差为 2.06 cm;行驶速度为 1.5 m/s 时,区域边界行驶的喷雾超出量误差平均值为 55.18 cm,标准差为 2.71 cm。

表 7 不同速度喷雾超出量误差

Tab.7 Errors in excess of spray at different speeds

测量点	速度/(m·s ⁻¹)		
	0.5	1.0	1.5
0	50	54	55
1	48	56	52
2	47	56	54
3	52	54	57
4	50	58	57
5	50	55	57
6	45	52	60
7	48	51	54
8	48	52	56
9	48	55	55
10	50	55	50
平均值	48.72	54.36	55.18
标准差	1.90	2.06	2.71

5.3.2 目标区域边界行驶方式喷雾性能试验

根据喷雾环境 2,开展目标区域边界喷雾性能试验。为验证行驶方式对喷雾等级变换准确度的影响^[24-25],同时考虑到喷头开闭响应一致情况下,行驶速度越快误差越大。因此为得到喷雾效果可靠性,试验将行驶速度调整为 1.5 m/s。将行驶方式划分为 3 种情况,如图 21 所示。行驶方式 1:中心点在目标区域外,匀速在目标区域边界行驶,每隔 1 m 测量超出目标区域的喷雾超出量误差,并记录数据。行驶方式 2:匀速行驶,由目标区域外驶入目标区域内,每隔 0.5 m 测量喷雾超出量误差,并记录数据。行驶情况 3:以匀速行驶,由目标区域内驶出目标区域,每隔 0.5 m 测量喷雾超出量误差,并记录数据。

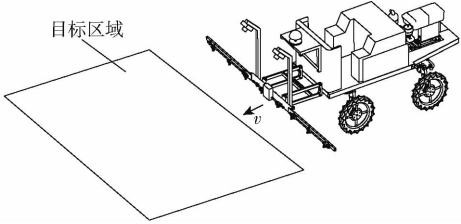


图 21 驶入和驶出目标区域

Fig. 21 Driving in and out of target areas

试验结果如表 8 所示。驶出目标区域超出量误差平均值为 19.36 cm,标准差为 0.81 cm;驶入目标区域超出量误差平均值为 7.2 cm,标准差为 1.48 cm;

区域边界行驶超出量误差平均值为 55.18 cm,标准差为 2.71 cm。

表 8 不同行驶方式的喷雾超出量误差
Tab.8 Spray excess error of different driving modes
cm

测量点	驶出目标区域	驶入目标区域	区域边界行驶
0	20	7	55
1	18	5	52
2	18	10	54
3	20	5	57
4	19	7	57
5	20	8	57
6	20	7	60
7	19	9	54
8	19	8	56
9	20	7	55
10	20	7	50
平均值	19.36	7.20	55.18
标准差	0.81	1.48	2.71

6 结论

(1)设计了基于机器视觉和北斗定位系统的小麦变量喷雾系统,满足实际作业要求,可以实现不同速度、植株密度下的变量喷雾。

(2)利用机器视觉在目标区域内建立不同植株密度下和前进速度的变量喷雾试验。试验结果表明相同机组速度下植株密度稀疏区相对植株密度正常

区的平均雾滴覆盖率平均减少 12.06%,相同植株密度下机组前进速度 0.75 m/s 相对 1.5 m/s 的平均雾滴覆盖率平均增加 3.94%。主要是根据植株密度发生变化时,通过图像处理实现喷雾等级发生变化,当植株密度不变速度变化时,速度变慢导致停留时间增加,因此平均雾滴覆盖率也会上升。在满足喷雾标准的情况下,可以在不同速度、不同植株密度下实现变量喷雾。

(3)通过定位系统在目标区域边界开展行驶速度对等级变换准确度的影响试验。试验结果表明,喷雾超出量误差及标准差随着行驶速度的增加而增加。主要由于行驶速度越快提供响应时间越短,而系统响应时间固定,因此行驶速度越快喷雾超出量误差越大。在行驶速度为 0.5 m/s 时准确度最高,区域边界行驶的最大超出量误差为 52 cm,平均值为 48.72 cm,标准差为 1.90 cm。

(4)通过定位系统在目标区域边界展开行驶方式对喷雾等级变换准确度的影响试验。其中驶入目标区域超出量误差平均值为 7.20 cm,驶出目标区域超出量误差平均值为 19.36 cm,区域边界行驶超出量误差平均值为 55.18 cm。驶入目标区域相对驶出目标区域,由于系统需要一定的响应时间因此喷雾从开到闭,增加了一定的喷雾超出误差;同时区域边界行驶,喷雾不断地开闭增加响应时间,导致在 3 种情况中喷雾超出误差最大。

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] 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)

[3] 张菡. 植保无人机变量喷药系统研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
ZHANG Han. Development of variable spraying system for plant protection unmanned aerial vehicle [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[4] WEN Sheng, ZHANG Quanyong, YIN Xuanchun, et al. Design of plant protection UAV variable spray system based on neural networks [J]. Sensors, 2019, 19(5): 1112.

[5] OEBEL H, GERHARDS R. Site-specific weed control using digital image analysis and georeferenced application maps: on-farm experiences [C] // The 5th European Conference on Precision Agriculture, 2005: 131-138.

[6] DOU Hongbin, ZHANG Chengliang, LI Lei, et al. Application of variable spray technology in agriculture [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186(5): 012007.

[7] 游倩倩,黄继红,冯军伟,等. 小麦抗性淀粉含量测定方法研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 33-36.
YOU Qianqian, HUANG Jihong, FENG Junwei, et al. Study on content determination methods of wheat resistant starch [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 33-36. (in Chinese)

[8] 刘道奇. 悬挂式喷杆喷雾机变量喷雾系统设计及试验分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
LIU Daoqi. Design and test analysis of variable spray system for suspended boom sprayer [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018. (in Chinese)

- [9] 林立恒. 高地隙喷杆喷雾机智能控制系统设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
LIN Liheng. Design of intelligent control system for high clearance boom sprayer[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [10] 肖静. 基于脉宽调制的变量施药控制系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
XIAO Jing. Research on control system of variable spraying based on pulse width modulation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [11] 陈丽君. 基于机器视觉的变量喷雾控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
CHEN Lijun. Study on automatic control system of variable spraying based on machine vision[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [12] 蒋焕煜, 张利君, 刘光远, 等. 基于 PWM 变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 41–46.
JIANG Huanyu, ZHANG Lijun, LIU Guangyuan, et al. Experiment on dynamic spray deposition uniformity for PWM variable spray of single nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 41–46. (in Chinese)
- [13] 蒋斌. PWM 变量喷雾机的设计及其压力特性的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
JIANG Bin. Design of PWM variable sprayer and research on its pressure characteristics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [14] 张利君. 基于动态 PWM 变量喷雾系统的雾量分布均匀性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHANG Lijun. Research of spray deposition uniformity for dynamic PWM variable spray system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [15] 刘慧, 李宁, 沈跃, 等. 模拟复杂地形的喷雾靶标激光检测与三维重构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 84–91.
LIU Hui, LI Ning, SHEN Yue, et al. Spray target laser scanning detection and three-dimensional reconstruction under simulated complex terrain[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 84–91. (in Chinese)
- [16] 沈成杰. 变量喷雾系统设计及喷雾流量控制特性试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
SHEN Chengjie. Design of variable spray system and experimental research on spray flow control characteristics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- [17] 沈景新, 李青龙, 孙永佳, 等. 喷杆喷雾机智能控制系统设计及试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 133–137.
SHEN Jingxin, LI Qinglong, SUN Yongjia, et al. Design and experiment of intelligent control system spray bar sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 133–137. (in Chinese)
- [18] 唐婧. 植保无人机变量喷雾系统设计与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
TANG Jing. Design and experimental research of variable spray system for plant protection drones[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [19] 刘国海, 李持衡, 沈跃, 等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 389–399.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Trajectory tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 389–399. (in Chinese)
- [20] 陈志刚, 陈梦溪, 魏新华, 等. 基于北斗定位的农田变量处方施药喷雾系统[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(11): 965–970.
CHEN Zhigang, CHEN Mengxi, WEI Xinhua, et al. Variable prescription pesticide spraying system for farmland on the Beidou navigation satellite system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(11): 965–970. (in Chinese)
- [21] 高凯. 喷施参数对农药利用率影响的试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
GAO Kai. Study and experimental of influence of the spraying parameters on the utilization of pesticide[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [22] 周良富, 薛新宇, 周立新, 等. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80–92.
ZHOU Liangfu, XUE Xinyu, ZHOU Lixin, et al. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 80–92. (in Chinese)
- [23] 蒋焕煜, 周鸣川, 李华融, 等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 73–77.
JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 73–77. (in Chinese)
- [24] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 82–90.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiuyu, et al. Evaluation and experiment of effective spray amplitude of plant protection UAV in aerial spray operation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 82–90. (in Chinese)
- [25] 宋坚利, 刘杨, 刘亚佳, 等. 无人旋翼机航空施药有效喷幅确定方法比较[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(10): 126–132.
SONG Jianli, LIU Yang, LIU Yajia, et al. Comparison of methods for determining effective spray range for aerial spraying of unmanned rotorcraft[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(10): 126–132. (in Chinese)