

基于顶芽智能识别的棉花化学打顶系统研究

韩鑫¹ 韩金鸽¹ 陈允琳¹ 兰玉彬¹ 李建坤² 崔立华³

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 潍坊 261200;

3. 山东绿风农业集团有限公司, 滨州 256600)

摘要: 设计了基于顶芽智能识别的棉花化学打顶系统, 为实现精准作业, 合理高效使用棉花化学打顶药剂, 以减少因化学打顶剂的过度使用造成的环境污染。该系统主要由棉花顶芽识别系统、控制系统和喷施系统组成。采用 YOLO v5s 算法构建棉花顶芽识别模型。控制系统采用 STM32F407 单片机, 负责接收识别系统的信号, 并对各个棉花打顶剂管道进行控制。同时, 显示界面能够实时显示机具行驶速度、药液流量、打顶剂液位等参数。试验结果表明, 在田间全天光照试验中, 上午和下午时间段识别效果最优; 在速度 0.4 m/s 下, 平均识别率约为 94%; 信号发送区间为 100 mm 时, 成功向下位机发送信号的成功率达到 92%; 田间对靶喷施试验表明, 有效喷施率为 94%, 满足作业要求。

关键词: 棉花; 化学打顶; 控制系统; YOLO v5s; 顶芽识别

中图分类号: TP18; TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)03-0145-08

OSID:



Research on Cotton Chemical Topping System Based on Apical Bud Intelligent Recognition

HAN Xin¹ HAN Jin'ge¹ CHEN Yunlin¹ LAN Yubin¹ LI Jiankun² CUI Lihua³

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang 261200, China

3. Shandong Lufeng Agricultural Group Co., Ltd., Binzhou 256600, China)

Abstract: A cotton chemical topping system based on top bud intelligent recognition was designed to achieve precise operation, rational and efficient use of cotton chemical topping agents, and reduce environmental pollution caused by excessive use of chemical topping agents. The system mainly consisted of cotton top bud recognition system, control system, and spraying system. A cotton top bud recognition model was constructed by using the YOLO v5s algorithm. The control system adopted STM32F407 microcontroller, which was responsible for receiving signals from the recognition system and controlling various cotton topping agent pipelines. At the same time, the display interface can display real-time parameters such as the driving speed of the equipment, the flow rate of the medicine, and the liquid level of the topping agent. The experimental results showed that in the field all day light experiment, the morning and afternoon time periods had the best recognition performance. At a speed of 0.4 m/s, the average recognition rate was about 94%. When the signal transmission interval was 100 mm, the success rate of successfully sending signals to the lower computer reached 92%. The field target spraying experiment showed that the effective spraying rate was 94%, which met the spraying requirements.

Key words: cotton; chemical topping; control system; YOLO v5s; apical bud recognition

0 引言

棉花具有无限生长的特性, 而棉花打顶技术能

够抑制顶芽生长, 从而阻止棉花顶端过度发展, 使更多的养分供给生殖器官生长, 从而促进棉株多结铃结桃, 进而提高棉花质量和产量^[1]。

收稿日期: 2023-08-09 修回日期: 2023-09-03

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项目 (CARS-15-22)、山东省引进顶尖人才“一事一议”专项 (鲁政办字 [2018]27 号) 和教育部、农业农村部、中国科协“山东无棣棉花科技小院”建设项目

作者简介: 韩鑫 (1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事棉花田间管理机械研究, E-mail: sdut_hanxin@163.com

通信作者: 兰玉彬 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精准农业航空应用技术研究, E-mail: ylan@sdut.edu.cn

目前,棉花打顶的方式主要包括人工打顶、机械打顶和化学打顶^[2]。然而,人工打顶方式耗时长、劳动强度大、作业效率低,而机械打顶则容易出现漏打、撞铃、撞桃和损坏棉叶等问题^[3-5]。学者正积极探索新技术,以弥补或替代现有的打顶技术。例如,李海涛等^[6]提出一种农作物激光打顶方法,利用激光束以特定速度在农作物的打顶位置进行横向扫描,通过破坏组织细胞来阻止养分在作物内的上升运输过程。夏博等^[7]开发了一种基于激光烧蚀的棉花打顶机,采用双目深度相机进行视觉识别和三维空间定位,能够准确地识别棉花的顶芽位置。随后,通过控制装置来调整激光器的导向,实现对棉株顶芽的精确打顶操作。

另一方面,化学打顶主要是利用植物生长调节剂延缓棉花顶芽生长,降低棉花顶芽的分化速率^[8]。欧美国家通常采用植物生长延缓剂甲哌鎓调控棉株生长^[9-10]。近年来,我国发现含有植物生长延缓剂 DPC 和植物生长抑制剂氟节胺等有效成分的调节剂产品,在化学封顶方面表现出较为显著的效果^[8,11]。然而,传统的人工喷洒打顶剂方式药物使用效率低下、作业精度低,导致化学药剂过度使用,进而造成环境污染。为减少化学打顶剂对环境造成的污染,迫切需要开发更精准的喷施技术。

随着农业科技的发展,农业精准化和精量化逐渐成为提高生产效率和质量的关键手段。GRAVALOS 等^[12]通过红外线传感器定位烟草植物茎秆,识别后发出信号,通过高精度喷雾器喷施适量的抹芽剂。TUFAIL 等^[13]利用机器视觉识别烟草,根据从视觉系统获得的反馈信号改变 PWM 电磁阀的占空比来控制通过喷嘴的应用速率,进而实现精准喷施。ZHENG 等^[14]设计了用于露天白菜的间歇性除草剂喷洒系统,可节约农药 28.3%。DAMMER 等^[15]设计了胡萝卜实时可变速喷施除草剂系统,可节约除草剂 30%~40%。精准喷施系统在环境和农业生产等方面都具有较好的发展潜力,将化学试剂精准地喷施到目标作物,可提高药物使用效率,减少化学品使用量,降低生产成本^[13,16]。

随着机器视觉在农业上应用,农业不断地向智能化发展。刘俊奇^[17]利用 BP 神经网络,对棉花顶芽的形态特征进行分析,并设计了棉花顶芽自动识别系统。经过初步测试和试验,结果表明该系统对棉花顶芽的识别是可行的。沈晓晨^[18]利用 VGG 网络模型,对棉花顶芽进行识别,模型对测试集图像进行测试,识别率为 83.4%,识别率相对较高。刘海涛^[19]通过改进 YOLO v4 神经网络实现对棉花顶芽识别,改进后 YOLO v4 算法的平均精度均值为 90.15%。

借鉴上述研究成果,本文针对化学打顶效率低、药物浪费等问题,设计基于机器视觉的棉花化学打顶系统,以期实现对棉花顶芽识别和打顶剂的精准喷洒。

1 棉花顶芽识别与控制系统设计

1.1 总体系统设计

棉花化学打顶系统包括识别系统、打顶剂喷施系统和控制系统等。如图 1 所示,车载计算机实时处理相机采集的棉花顶叶图像,获取顶芽坐标信息;控制器接收上位机的信号,控制电磁阀的开闭,进而实现对各个喷头的控制;同时,控制器利用速度编码器、流量传感器以及打顶剂液位传感器采集信息,通过串口将这些信息传递给车载计算机,在显示界面上显示,如图 2 所示。

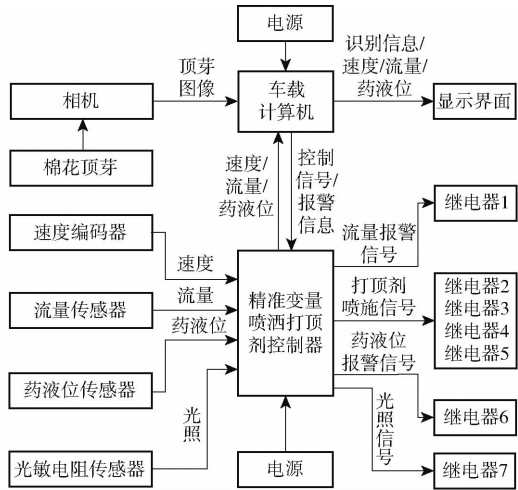


图 1 棉花打顶剂精准变量喷施系统控制框图
Fig. 1 Control block diagram of cotton topping agent precision variable spraying system



图 2 显示界面
Fig. 2 Display interface

1.2 棉花顶芽识别模型构建与应用

1.2.1 数据采集

2022 年 7 月上旬,在山东省滨州市无棣县山东绿风农业集团有限公司棉花科技小院进行棉花顶芽图像的采集工作。采集时间段设定为每天 07:00—

12:00 和 13:00—17:00 之间。采集过程中,使用 iPhone 13 进行视频录像和拍摄图像两种方式,从棉花顶芽的垂直方向上方进行拍摄。从视频和图像中

选取棉花顶芽图像,建立了棉花顶芽数据集。其中,数据集包含棉花顶芽在晴天、阴天、傍晚、多株、单株、被遮挡等情况下的图像,示例如图 3 所示。

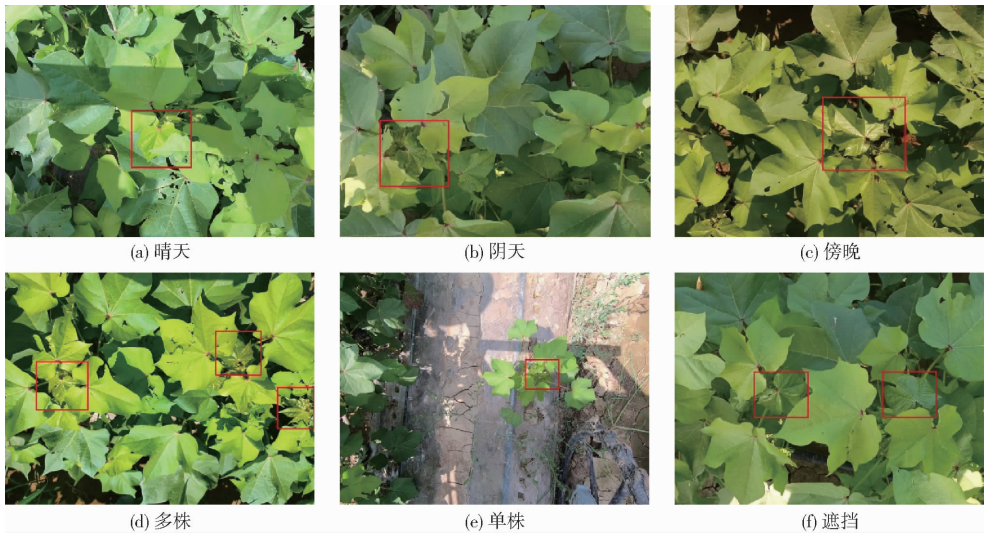


图 3 不同情况下棉花顶芽图像示例

Fig. 3 Examples of images of cotton top buds in different situations

1.2.2 数据集构建

为扩充数据集、增加数据多样性以提高模型的鲁棒性和模拟真实环境,对数据集进行多项处理,包括将图像向右旋转 90°、向左旋转 90°、左右翻转、水平镜像,以及增加高斯噪声、图像变暗和图像变亮等操作。经过处理后,对于图像中棉花顶芽出现残缺或完全丢失情况,放弃对该图像进行标注,以确保数据集的质量。最终,获得 14 500 幅有效图像,用于构建数据集。使用 LableImg 标注工具,对图像中棉花顶芽位置信息进行手动标注,按照通用的数据集划分策略^[20],将其中的 11 745 幅图像作为训练集,1 305 幅作为验证集,1 450 幅作为测试集,供模型训练、验证和测试。

1.2.3 模型选择

YOLO v5 算法的整体结构包括输入端、基准网络、Neck 网络以及 Head 输出端^[21]。在输入端,YOLO v5 仍然采用 YOLO v4 的 Mosaic 数据增强方式。YOLO v5 通过引入 letterbox() 函数增加自适应图像缩放功能,采用等比例缩放的形式,更好地保留图像信息,从而最大程度地利用感受野。在基准网络方面,YOLO v5 使用 CSPDarknet53 结构和 Focus 结构作为基础网络,以减少原始数据的丢失,降低网络复杂度并提升运算速度。在 Neck 网络中,YOLO v5 采用 SPP 模块,充分利用网络的浅层信息,加强不同特征图之间的联系,同时将特征金字塔网络(FPN)与路径聚合网络(PAN)结合,通过反复的上下采样实现特征图的融合,从而使得模型能够获得更充分的特征图信息。

YOLO v5 系列模型有 YOLO v5n、YOLO v5s、YOLO v5m 和 YOLO v5x 共 4 个模型^[22]。其中,YOLO v5s 是最小的模型,在相同环境下,该模型训练时间最短、检测速度最快。综上考虑,选择 YOLO v5s 模型作为目标检测模型。

1.2.4 试验平台

试验过程在 Windows 10 操作系统下进行,处理器型号为 Intel(R) Xeon(R) W-2275 CPU @ 3.30 GHz,显卡 NVIDIA GeForce RTX 2060。深度学习框架采用 PyTorch 1.13,编程平台为 PyCharm,编程语言为 Python 3.7。模型训练参数设置批次大小为 32,初始学习率为 0.001,动量因子为 0.9,权值衰减系数为 0.000 5,迭代轮次为 100。

1.2.5 评价指标

选取精确率(Precision)、召回率(Recall)、平均精度均值(Mean average precision)作为评价指标,衡量模型性能。

1.2.6 试验结果

训练结束后的模型对测试集中的 1 450 幅棉花顶叶图像进行了测试,测试结果表明,该模型检测棉花顶芽的精确率为 90.14%,召回率为 91.43%,平均精度均值为 92.40%,满足识别要求。

1.2.7 棉花顶芽定位

识别模型识别出棉花顶芽后,获取其位置和大小信息,进行分析和判断,得到喷雾信息再将信息通过串口传输至控制器,控制相应的电磁阀,实施精准喷施。为避免摄像头中棉花顶芽被多次识别,造成重复喷施,设置信号发送区间,在垂直于机具前进方

向上设定 (Y_1, Y_2) 区间,如图4所示。只有当顶芽的中心坐标 (X, Y) 处在区间内(蓝色框内),视为有效坐标,然后再对垂直前进方向的 X 进行分析。当 X 处于对应区间时,打开相应的喷头。



图4 信号发送区间

Fig.4 Signal transmission range

由于生长状况不同,形成了不同大小的顶芽,为实现棉花顶芽的变量喷施,根据顶芽识别框的大小控制喷头打开时长。识别顶芽区域如图5所示。

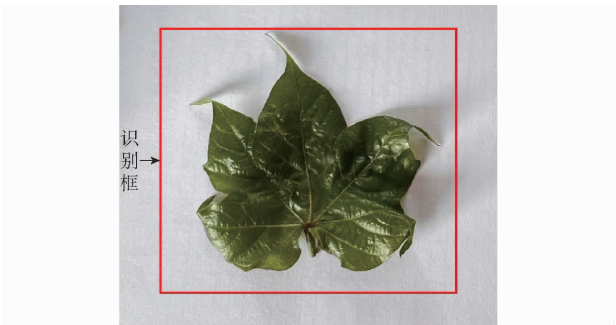


图5 识别框

Fig.5 Identification box

1.3 打顶剂喷施系统设计

1.3.1 打顶剂喷施系统结构与原理

打顶剂喷施系统结构如图6所示,主要由药箱、管道开关、过滤装置、泵、喷头、电磁阀、溢流阀、废药箱、清水箱等组成。

喷施系统工作时,开关 a、d 打开,开关 b、c 关闭。泵采用通用 12 V 药液泵,为整个喷施系统的动力,电磁阀采用 12 V 的 SAN YE 三叶常闭型控制管道开闭,溢流阀采用 PA,型号为 VS160,维持管道内压力。同时,喷施设备需要进行定期的维护和清洁,清理残留药剂工作有助于防止喷施设备的损害,延长设备的使用寿命,避免经济损失,系统增加清水箱。

1.3.2 控制系统结构及控制流程图

系统控制结构框图如图7所示,核心器件包括 STM32F407 型单片机和 PC 机。光敏电阻传感器采用光敏电阻模块,其模块与单片机 I/O 口 PF7 连接,模块输出信号为 TTL 信号,当光照强度小于设定阈值时,输出高电平。单片机的 I/O 口 PF5 用作

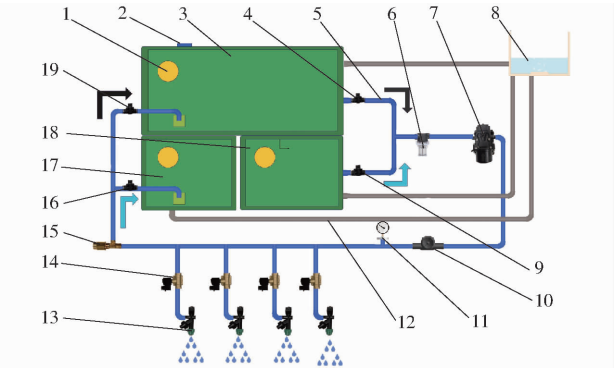


图6 打顶剂喷施系统结构图

Fig.6 Structure diagram of topping agent spraying system

1. 药箱盖 2. 打顶剂液位传感器 3. 药箱 4. 开关 a 5. 管道
6. 过滤装置 7. 泵 8. 药液回收池 9. 开关 b 10. 流量传感器
11. 压力传感器 12. 废药管道 13. 喷嘴 14. 电磁阀 15. 溢流阀
16. 开关 c 17. 废药箱 18. 清水箱 19. 开关 d

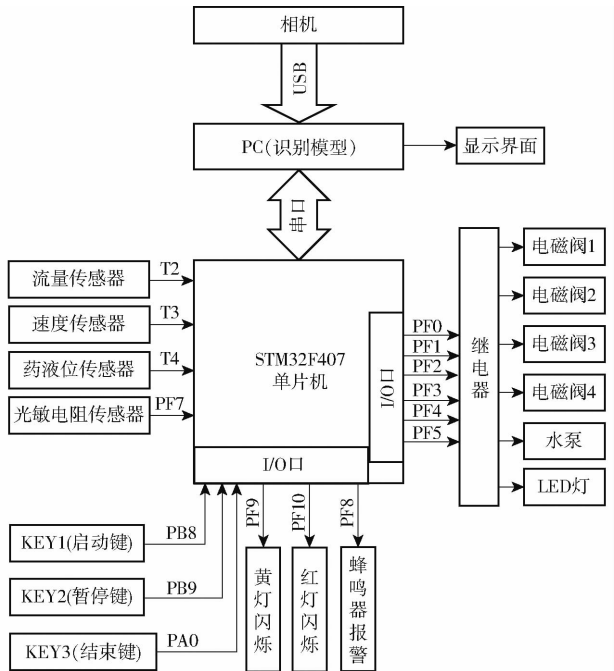


图7 控制系统硬件结构框图

Fig.7 Control system hardware architecture diagram

LED 继电器的信号端,补光装置开启。打顶剂液位传感器采用非接触式液位传感器,在水箱上外侧分别等距安装 3 个液位传感器,输出信号均为 TTL 信号,传感器感应到药液时,输出信号为高电平。定时器定时获取信号,当信号为 111 时,药液信号为“高”;信号为 011 时,药液信号为“中”;信号为 001 时,药液信号为“低”,当信号为 000 时,单片机 PF4 端口电位输出高电平并作为水泵继电器的信号端,采取高电平沿触发,水泵停止工作;LED 红灯和蜂鸣器直接采用单片机 I/O 驱动,进行声光报警。流量传感器采用霍尔元件流量传感器,型号为 HH-S2,通过时间 Δt 内采集霍尔流量传感器脉冲个数 n ,流量传感器脉冲累加采取定时器中断。当流量超

过设定阈值时,水泵停止工作,黄色 LED 闪烁,蜂鸣器报警。脉冲频率 f 和流量 q 的计算公式为

$$f = \frac{n}{\Delta t} \tag{1}$$
$$q = \frac{f + 10}{108} \pm 10\% \tag{2}$$

速度传感器型号为 HENGSTLER RI30 - O/1000AR,利用定时器定时对编码器信号脉冲计数,在时间 Δt_1 采集脉冲数 n_1 ,可计算机具前进速度。速度 v 计算公式为

$$v = \pi D \frac{n_1}{1\,000 \Delta t_1} \tag{3}$$

式中 D ——轮胎直径
单片机的 I/O 口 PF0、PF1、PF2 和 PF3 作为输出信号接口,分别连接控制 4 个电磁阀开合的继电器。单片机的 I/O 口 PB8、PB9 以及 PA0 作为信号输入接口,其中 PB8 和 PB9 采用低电平沿触发,PA0 采用高电平沿触发。KEY1、KEY2 和 KEY3 分别是启动键、暂停键、结束键。

控制系统工作流程图如图 8 所示。

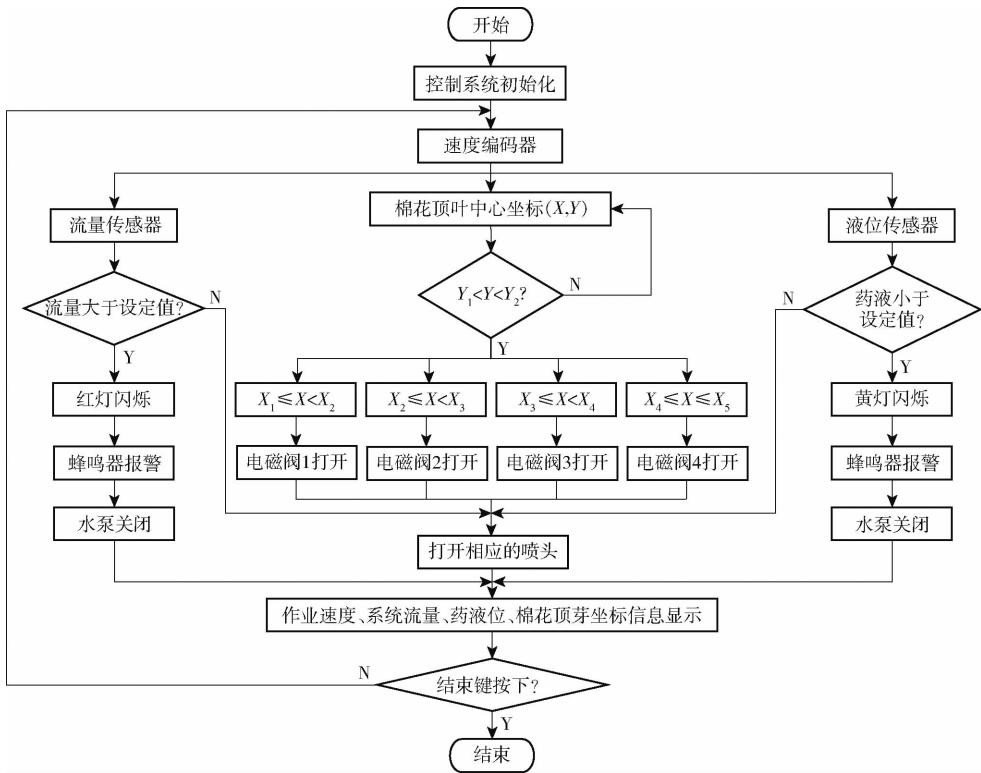


图 8 控制流程图

Fig. 8 Control flowchart

2 试验

2.1 棉株顶芽识别试验

2.1.1 棉花顶芽识别性能影响

为探究机具行驶速度对棉花顶芽的模型识别效果,确定机具最佳行驶速度。在山东理工大学智慧农业团队实验室搭建试验台,传送带搭载棉花植株,以不同速度进行试验^[23],测试 30 株棉花顶芽的图像识别情况。搭建试验台如图 9 所示,将 30 株棉花植株依次放置在传送带上,保证它们在不同速度条件下都能被拍摄到,并以速度 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 m/s 分别进行试验,相应识别率分别为 100%、100%、98%、94%、80%、70%、50%、34%。

在传送带速度为 0.1 ~ 0.3 m/s 时,平均识别率

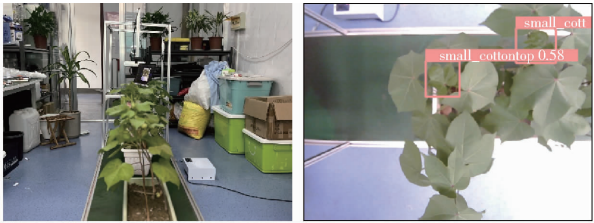


图 9 试验台以及识别情况

Fig. 9 Experimental setup and recognition conditions

99.3%,棉花顶芽图像处理较为稳定,棉花顶芽的识别较为准确。在速度 0.4 m/s 时,识别率为 94%,满足识别要求。在速度 0.5 m/s 以上时,图像获取模糊,顶芽纹路不清晰等情况,导致棉花顶芽识别率较低。因此,设计田间试验时,为兼顾棉花顶芽识别率和作业效率,综合考虑选择机具速度为 0.4 m/s。

2.1.2 光照强度影响

为探究田间不同时段算法的识别效果,在山东

省滨州市无棣县山东绿风农业集团有限公司棉花科技小院进行试验,选取了上午、中午、下午、傍晚以及晚上(补光装置)的5个时段,将摄像头搭载在高地隙车的前端,对棉花顶芽进行视频拍摄,选取视频中100个棉花顶芽作为试验样本,以正确识别率作为试验指标进行试验。

识别图像如图10所示,田间试验结果如表1所示,白天平均识别率约为91%。上午和下午时间段识别效果最优,中午和傍晚识别效果较差。晚上(补光)识别效果最差。分析主要原因有中午光照强度较大,棉花顶芽因角度原因造成反光,导致棉花顶芽纹路获取不清晰。傍晚时由于棉花顶芽受风速影响造成棉花顶芽侧翻,并且光照强度不足,导致识别效果较差。晚上增加补光的情况下,识别效果也不理想,经分析,所选补光设备补光不均匀,造成了过曝光和曝光不足的现象,并且棉花顶芽晚上呈现下垂状态,导致获取的图像特征不明显,棉花顶芽识别率较低。

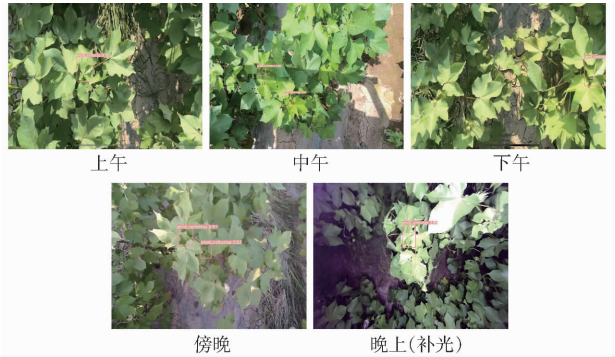


图 10 田间不同时段识别图像

Fig. 10 Identity images at different times in field

表 1 田间不同光照棉花顶芽的试验结果

Tab.1 Experimental results of cotton apical meristems under different lighting conditions in field

类别	棉花顶芽样本数/个	识别数/个	识别率/%
上午	100	93	93
中午	100	90	90
下午	100	92	92
傍晚	100	90	90
晚上(补光)	100	70	70

2.2 棉花顶芽定位试验

为探究信号发送区间对棉花顶芽识别发送信号的影响,分别设置0、50、100、150 mm的区间进行试验。试验中,机具速度设置为0.4 m/s,选取100株棉花顶芽,统计发送信号情况,包括成功发送、未发送和重复发送。

试验结果如表2所示。在区间为0 mm(中心线)时,发送信号成功率较低,由于棉花地不平整造

成机具行走时摄像头抖动和顶芽小范围摆动,影响发送效果。随着区间宽度增加,成功发送率也相应提升,较宽的区间容纳更多的识别结果,同时重复发送率也增加。综合考虑成功发送率和重复发送率的情况,选择信号发送区间宽度为100 mm,在这个宽度下能够较好地平衡成功发送率和重复发送率。

表 2 不同区间的宽度试验结果

Tab.2 Experimental results of different confidence interval widths

区间宽度/ mm	棉花顶芽样 本个数/个	成功发 送数	未发 送数	重复发 送数	成功率/ %
0	100	55	45	0	55
50	100	85	15	1	85
100	100	92	8	4	92
150	100	98	2	10	98

2.3 对靶喷施性能试验

2023年7月在山东省滨州市无棣县山东绿风农业集团有限公司棉花科技小院进行试验,选取棉花田中采摘的棉花顶芽作为试验对象,将其平铺在试验台,如图11所示。高地隙车以速度0.4 m/s行驶,信号发送区间设置100 mm进行试验。试验后观察并测量喷施在水敏纸上的喷施水印^[24]。有效喷施的定义为喷施覆盖棉花顶芽的区域且超出顶芽域边界的宽度小于80 mm。误喷定义为喷施未能覆盖棉花顶芽或喷施区域超过顶芽域边界的宽度大于80 mm。根据试验结果,有效喷施率为94%,这意味着喷施的液体成功覆盖了棉花顶芽区域,且边界超出的宽度较小,满足了喷施要求。误喷率为6%,部分喷施没有达到预期的效果,其中喷施超出棉花顶芽域边界为5%,未能覆盖棉花顶芽率为1%。



图 11 对靶喷施试验以及试验界面

Fig. 11 Targeted spraying experiments and experimental interface

3 讨论

对试验存在的问题进行了仔细分析,并提出了可能的解决方案。

(1)在进行试验时,由于土地不平整和自然环境的影响,棉株排布不整齐,行走时导致高地隙车作业时出现横向偏移和摄像头抖动的问题,进而影响了棉花打顶剂喷施的准确性。为解决以上问题,建

议设计机具自动对行装置,并增加云台搭载摄像头来减少镜头的抖动,进一步提高棉花打顶率。

(2)田间棉花顶芽识别受到外界因素的干扰较大。因风速影响造成棉花顶芽摆动和侧翻,导致棉花顶芽识别率低。建议喷洒打顶剂时尽量选择风速较小或无风的情况下进行作业,既确保识别的准确率又能减少药剂的雾滴漂移。

(3)光照强度较强以及晚上的补光装置补光不均匀时,识别率较低。可通过增加遮光装置和优化补光装置,减少光照强度对识别的影响。还可以通过制备特定情况的棉花顶芽数据集,训练特定的识别模型,在特定情况选择对应模型,以提高识别率。

4 结论

(1)以高地隙自走式底盘为载体,设计了一种

基于深度学习的棉花化学打顶系统。该系统能够识别棉花顶芽,实现棉花打顶剂的精准变量喷洒。

(2)提出一种棉花顶芽定位的方法,并设置不同的信号发送区间进行试验。试验结果表明,当信号发送区间在 100 mm 时,成功向下位机发送信号成功率达到 92%,重复发送率为 4%,满足试验要求。通过棉花顶芽识别框的面积来调整喷头的开启时间,以实现变量喷洒。

(3)实验室棉花顶芽识别定位试验表明,在速度 0.4 m/s 的情况下,识别率为 94%。田间全天光照试验表明,在上午和下午时间段识别效果最优。

(4)根据棉花顶芽的精准喷洒试验结果,在速度为 0.4 m/s、信号发送区间在 100 mm 的情况下,有效喷洒率为 94%,误喷率为 6%,满足作业要求。

参 考 文 献

- [1] 刘海涛,伊丽丽,兰玉彬,等. 机器视觉在棉花智能打顶领域的应用研究进展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(6): 159–165. LIU Haitao, YI Lili, LAN Yubin, et al. Research progress in the application of machine vision in the field of cotton intelligent topping[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(6): 159–165. (in Chinese)
- [2] 韩长杰,燕长辉,仇世龙,等. 基于机器视觉的双圆盘式棉花打顶装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 36–46. HAN Changjie, YAN Changhui, QIU Shilong, et al. Design and experiment of double disc cotton topping device based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 36–46. (in Chinese)
- [3] 彭强吉,康建明,宋裕民,等. 3MDZ-4 型自走式棉花打顶喷药联合作业机设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 30–38. PENG Qiangji, KANG Jianming, SONG Yumin, et al. Design of 3MDZ-4 self-propelled cotton topping and spraying combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 30–38. (in Chinese)
- [4] 周海燕,尹素珍,朱立成,等. 3WDZ-6 型自走式棉花打顶机设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 86–89. ZHOU Haiyan, YIN Suzhen, ZHU Licheng, et al. Design of 3WDZ-6 self-propelled cotton top cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 86–89. (in Chinese)
- [5] 何磊,刘向新,周亚立,等. 垂直升降式单体仿形棉花打顶机[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 62–67. HE Lei, LIU Xiangxin, ZHOU Yali, et al. Verticallift type single profiling cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 62–67. (in Chinese)
- [6] 李海涛,王壮壮,刘平义,等. 一种农作物激光打顶方法: 201611000534. X[P]. 2017-03-22.
- [7] 夏博,胡俊强,王宇,等. 一种基于激光烧蚀的棉花打顶机: 202211650749. 1[P]. 2023-06-02.
- [8] 齐海坤,王赛,徐东永,等. 不同棉区棉花 DPC 化学封顶技术研究[J]. 棉花学报, 2020, 32(5): 425–437. QI Haikun, WANG Sai, XU Dongyong, et al. Cotton chemical topping by applying DPC in different cotton-growing regions[J]. Cotton Science, 2020, 32(5): 425–437. (in Chinese)
- [9] BOURLAND F M, OOSTERHUIS D M, TUGWELL N P. Concept for monitoring the growth and development of cotton plants using main-stem node counts[J]. Journal of Production Agriculture, 1992(5): 532–538.
- [10] MCCONNELL J S, GLOVER R E, VORIES E D, et al. Nitrogen fertilization and plant development of cotton as determined by nodes above white flower[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18(5): 1027–1036.
- [11] 杨成勋,张旺峰,徐守振,等. 喷洒化学打顶剂对棉花冠层结构及群体光合生产的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1672–1684. YANG Chengxun, ZHANG Wangfeng, XU Shouzhen, et al. Effects of spraying chemical topping agents on canopy structure and canopy photosynthetic production in cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(9): 1672–1684. (in Chinese)
- [12] GRAVALOS I, ZIAKAS N, LOUTRIDIS S, et al. A mechatronic system for automated topping and suckering of tobacco plants[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 104986.
- [13] TUFAIL M, IQBALL J, TIWANA M I, et al. Identification of tobacco crop based on machine learning for a precision agricultural sprayer[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23814–23825.
- [14] ZHENG Shenyu, ZHAO Xueguan, ZHANG Xinwei, et al. Design of an intermittent herbicide spray system for open-field cabbage and plant protection effect experiments[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 286.
- [15] DAMMER K H. Real-time variable-rate herbicide application for weed control in carrots[J]. Weed Research, 2016, 56(3): 237–246.
- [16] ROCHA F C, OLIVEIRA NETO A M, BOTTEGA E L, et al. Weed mapping using techniques of precision agriculture[J]. Planta Daninha, 2015(33): 157–164.

- [17] 刘俊奇. 棉花株顶识别系统的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
LIU Junqi. The research of automatic recognition of cotton's top[D]. Shihezi: Shihezi University, 2009. (in Chinese)
- [18] 沈晓晨. 棉花打顶机棉株高度识别技术的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
SHEN Xiaochen. The height of the cotton plant identification technology for cotton top-cutting machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese)
- [19] 刘海涛. 基于深度学习的棉花顶芽识别系统研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
LIU Haitao. Research on cotton top buds recognition system based on deep learning[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [20] RAYKAR V C, SAHA A. Data split strategies for evolving predictive models[C] // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, Springer, 2015: 3 – 19.
- [21] 赵新龙, 顾臻奇, 李军. 基于 YOLO v5s 和改进 SORT 算法的黑水虻幼虫计数方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 339 – 346.
ZHAO Xinlong, GU Zhenqi, LI Jun. Larvae of black soldier fly counting based on YOLO v5s network and improved SORT algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 339 – 346. (in Chinese)
- [22] 卢伟, 邹明萱, 施浩楠, 等. 基于 YOLO v5 – TL 的褐菇采摘视觉识别-测量-定位技术[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 341 – 348.
LU Wei, ZOU Mingxuan, SHI Haonan, et al. Technology of visual identification – measuring – location for brown mushroom picking based on YOLO v5 – TL[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 341 – 348. (in Chinese)
- [23] 翟长远, 付豪, 郑康, 等. 基于深度学习的大田甘蓝在线识别模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 293 – 303.
ZHAI Changyuan, FU Hao, ZHENG Kang, et al. Establishment and experimental verification of deep learning model for on-line recognition of field cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 293 – 303. (in Chinese)
- [24] 马程宏. 田间作物对靶喷施机器人关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
MA Chenghong. Study on key technology of target spraying robot on crops in field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

(上接第 121 页)

- [22] 周海丽, 刘建刚, 俞高红, 等. 蔬菜移栽机斜齿轮-非圆齿轮行星轮系取苗机构研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 77 – 86.
ZHOU Haili, LIU Jian'gang, YU Gaohong, et al. Design and experiment of seedling picking mechanism for helical gear – no circular gear planetary gear system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 77 – 86. (in Chinese)
- [23] WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, TIAN Jinyuan, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.
- [24] 文永双, 张俊雄, 张宇, 等. 蔬菜穴盘苗插入顶出式取苗装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 96 – 104.
WEN Yongshuang, ZHANG Junxiong, ZHANG Yu, et al. Development of insertion and ejection type seedling taking device for vegetable plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(22): 96 – 104. (in Chinese)
- [25] 袁挺, 张宇, 尹金亮, 等. 蔬菜移栽机曲柄摇杆-导轨组合式取投苗装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 116 – 124.
YUAN Ting, ZHANG Yu, YIN Jinliang, et al. Study on seedling taking and throwing device based on combined structure of crank rocker and guide rail for vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 116 – 124. (in Chinese)
- [26] 胡建平, 刘育彤, 刘伟, 等. 蔬菜自动移栽机顶夹拔组合式取苗装置试验研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 110 – 117, 184.
HU Jianping, LIU Yutong, LIU Wei, et al. Experiment on combined seedling picking device with top clamping and pulling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.1): 110 – 117, 184. (in Chinese)
- [27] 田素博, 赵晨希, 胡熙, 等. 蔬菜移栽机自动喂苗装置关键部件设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(5): 586 – 592.
TIAN Subo, ZHAO Chenxi, HU Xi, et al. Design and experiment on automatic feeding-seedling device of vegetable transplanter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(5): 586 – 592. (in Chinese)
- [28] 田素博, 谢天, 王鹤锦, 等. 蔬菜移栽机可调式喂苗装置设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(3): 464 – 472.
TIAN Subo, XIE Tian, WANG Hejin, et al. Design and experiment of adjustable seedling-feeding device for vegetable transplanting machine[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(3): 464 – 472. (in Chinese)
- [29] 计东, 胡熙, 哲旋瑞, 等. 双排移栽机械手联动式高速移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 126 – 133.
JI Dong, HU Xi, ZHE Xuanrui, et al. Design and experiment of double row transplanting manipulator linkage high speed transplanting device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 126 – 133. (in Chinese)
- [30] NY/T 1924—2010 油菜移栽机质量评价技术规范[S]. 2010.