

基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验

权龙哲 张景禹 姜 伟 李恒达 杨春杰 张溪麟
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对株间机械除草时末端执行器存在损伤玉米根系风险的问题,提出了一种基于玉米根系保护的除草铲土上避苗除草模式,并设计了一套智能株间除草机器人系统。该机器人系统由机器人移动平台、除草装置、视觉检测系统和控制系统组成。其中视觉检测系统采用 YOLO V4 网络模型来检测玉米苗和杂草;除草装置是基于除草铲空间立体运动轨迹设计,使得除草铲可以完成土上和土下 2 种避苗除草作业模式。田间试验表明,在机器人移动平台前进速度为 1.2 km/h 时,玉米苗和杂草的检测率分别为 96.04% 和 92.57%,且 2 种除草模式的除草率均高于 81%。除草铲土上避苗除草模式的平均伤根率为 3.35%,相较于除草铲土下避苗除草模式降低了 36.40 个百分点。结果证明该除草机器人系统运行稳定,且除草铲土上避苗除草模式具有较优的玉米根系保护性能。

关键词: 玉米;株间除草;机器人移动平台;根系保护;目标检测;除草铲

中图分类号: S233.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)12-0115-09 **OSID:** 

Development and Experiment of Intra-row Weeding Robot System Based on Protection of Maize Root System

QUAN Longzhe ZHANG Jingyu JIANG Wei LI Hengda YANG Chunjie ZHANG Xilin
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the risk of end effector damage to the maize root system during mechanical intra-row weeding, a novel intra-row weeding mode based on the protection of the maize root system was proposed and an intelligent robot system for weeding was designed. The robot system consisted of a robot mobile platform, a weeding device, a visual system and a control system. Among them, maize seedlings and weeds were detected by the visual system using advanced YOLO V4 network model; the weeding device was based on the three-dimensional movement of weeding shovels, so that the weeding shovel can complete two operation models, including under and on the ground to avoid maize seedlings. Field experiments showed that when the robot mobile platform advanced at 1.2 km/h, the detection rates of maize seedlings and weeds were 96.04% and 92.57%, respectively, and the weeding rate of the two weeding modes were higher than 81%. The average root damage rate under the mode that weeding shovels placed on the ground to avoid maize seedlings was 3.35%, which was 36.40 percentage points lower than that of the mode that weeding shovels were always placed under the ground to avoid maize seedlings. The results proved that the weeding robot system was stable, and the weeding shovel avoiding seedlings and weeding on the soil had better protection performance of the maize root system.

Key words: maize; intra-row weeding; robot mobile platform; protection of root system; target detection; weeding shovel

0 引言

目前,机械除草是继化学药剂除草后的一种广泛被人们接受的除草方法^[1-2],具有重要的研究意义和广泛的应用前景。根据田间不同的杂草控制区

域,机械除草又通常分为行间除草和株间除草^[3-5]。行间杂草通过中耕除草的方式相对容易除去,但是株间杂草的控制相当困难,因为清除靠近农作物的杂草存在误伤农作物的高风险^[6-7]。目前,株间除草模式的优化和创新成为许多学者的研究关注

点^[8-11]。

关于株间机械除草的研究大多以伤苗率和除草率作为衡量除草性能的指标^[12-14],而对机械除草过程中末端执行器存在损伤作物根系的高风险问题关注较少。谭国强等^[15]设计的玉米地中耕次数对玉米产量影响的试验表明,免中耕和中耕次数少的玉米根系量都明显多于中耕次数多的。此外,试验还发现中耕后的玉米根系在垄体内分布不均匀,顺垄向的较多,横垄向的较少,而免中耕与此相反。因此,在设计机械除草结构和除草模式时,应该充分重视末端执行器可能伤害作物根系的问题。

机械除草过程中为了“多除草,少伤苗”,不但要改善除草机构或除草模式,同时对目标物体的精准检测也十分关键。传统的农作物检测方法有 RTK-GPS (Real time kinematic-global positioning system)、激光、超声波和光谱等^[16-19],而且上述方法都只是单一检测农作物目标,对杂草则进行忽略。目前,以深度学习技术为基础的检测方法在农业中的应用越来越广泛,该技术具有强大的目标特征学习能力^[20],不但能够检测作物还能检测杂草,甚至给杂草分类。WU 等^[21]对苹果花进行检测,将使用的 YOLO (You only look once) V4 检测模型进行通道修剪,修剪后的参数量减少了 96.74%,模型占用内存减少了 231.51 MB,但是平均准确率均值 (Mean average precision, mAP) 仅降低了 0.24%。TIAN 等^[22]对苹果进行检测时,将 YOLO V3 低分辨率的特征层引入 DenseNet 以增加特征的传输量和复用率。QUAN 等^[23]以 VGG19 为主干网络改进了 Faster R-CNN,完成对复杂田间环境下不同生长阶段的玉米幼苗的检测,准确率达 97.71%。

本文依据东北地区玉米垄作的种植方式以及苗期株间除草的作业要求,并且充分考虑到机械除草过程中末端执行器损伤作物根系风险的问题,设计一种基于玉米根系保护的株间除草机器人系统。该除草机器人根据土上避苗除草模式进行株间除草作业,同时能够降低除草装置末端执行器损伤作物根系的风险,以期达到保护玉米根系的目的。

1 除草机器人系统组成和工作原理

1.1 机器人移动平台

机器人移动平台是除草装置的挂载体,是整个除草机器人系统正常工作的保证,其虚拟样机^[24]如图 1 所示。该机器人移动平台由车体、车轮、升降装置、挂载架等组成,车体中主要包括控制系统和供电系统。移动平台前轮为 2 个万向轮,后轮是驱动轮,由轮毂电机驱动,通过驱动轮差速实现机器人平台

转向;移动平台分为遥控和手动 2 种操控方式。机器人平台的轮距可调,以满足不同行距的除草作业需求。



图 1 机器人移动平台结构示意图

Fig. 1 Schematic of robot mobile platform

1. 控制箱 2. 轮距调节装置 3. 电池箱 4. 可升降挂载架 5. 后驱动轮 6. 平台升降装置 7. 前万向轮

机器人移动平台共搭载 3 块 60 V、60 A·h 锂电池,其中 2 块并联并分别固装在车体两侧的行走单元机箱内部,为轮毂电机供电。第 3 块为挂载装置供电,同时作为机器人平台的备用电源,保证平台 8 h 的续航作业需求。为了便于不同设备对电源电压的需求,平台上配备一台 2 000 W、60 V 转 220 V 的逆变器(锐帝 YT-2000PB 型)。该机器人移动平台其它技术参数如表 1 所示。

表 1 机器人移动平台主要参数

Tab. 1 Main technical indicators of robot mobile platform

参数	数值
平台行驶速度/(km·h ⁻¹)	1~6
轮距调节范围/m	2.0~2.5
平台宽度/m	2.2
平台长度/m	1.8
平台质量/kg	600
轮毂电机功率/kW	1.5×2
驱动轮减速比	81

1.2 除草系统构成

除草系统主要由视觉检测系统、控制系统和机械除草装置 3 部分组成,如图 2 所示。视觉检测系统包括图像获取、图像处理和信息输出,将提取到的信息传给控制系统。控制系统自我校正后对收到的信息进行编译并最终控制机械除草装置的伺服电机和步进电机转动,完成除草铲水平开合以及竖直方向升降运动。另外,当视觉检测系统检测到的杂草不满足除草条件时,则不发送信息给控制系统。

1.3 避苗除草原理

除草作业过程如图 3 所示,只有当株间有杂草且在作物保护区以外时,两侧除草铲同步进行下降与闭合运动,将杂草切断或夹住,配合移动平台的向前运动,使杂草发生移动,达到除草目的。除草铲闭合状态持续到下一株玉米苗前,然后迅速张开与上升恢复到初始位置,完成避苗并等待下一次除草指令。以上除草过程定义为土上避苗除草模式,运动

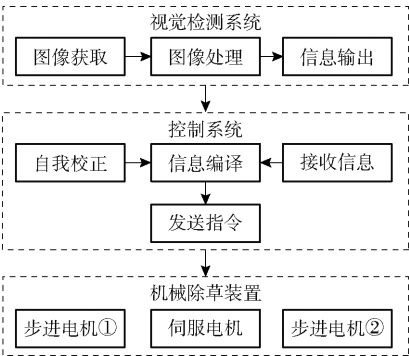


图 2 除草系统结构框图

Fig. 2 Structure diagram of weeding system

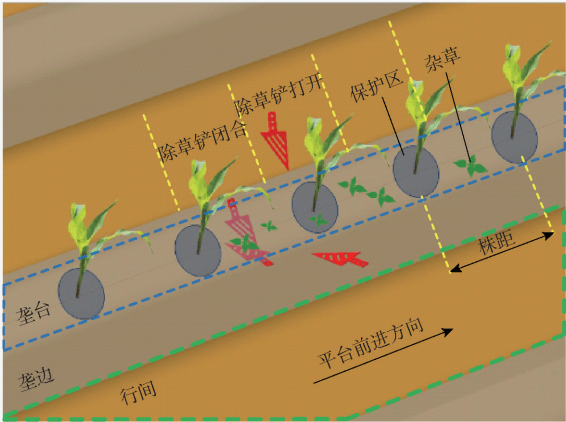


图 3 株间除草模式示意图

Fig. 3 Schematic of intra-row weeding mode

轨迹如图 4 中的蓝线所示,其中蓝实线为闭合状态(除草状态),蓝虚线为非完全闭合状态(避苗状态)。

当除草铲在作业过程中省去竖直方向的运动,且始终置于地表以下,则定义为土下避苗除草模式,其运动轨迹如图 4 中的黄线所示。其中黄实线为闭合状态(除草状态),黄虚线为非完全闭合状态(避苗状态)。

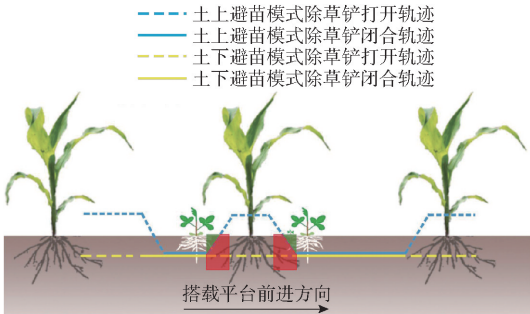


图 4 株间除草根系保护原理示意图

Fig. 4 Schematic of root protection principle of intra-row weeding

2 除草系统设计

2.1 除草装置设计

2.1.1 硬件选型

除草装置中控制除草铲水平运动的动力源采用

直流低压伺服电机,型号为 XK60A2A02080 - SCK。其供电电压 24 V DC,额定电流 7.5 A,额定扭矩 1.27 N·m,额定转速 5 000 r/min。根据电动机选取 DM - 806A 型驱动器,适用于驱动小功率直流伺服电动机,供电电压 24 ~ 50 V DC;最大连续电流达 30 A;具有位置控制模式、速度控制模式和电流(转矩)控制模式;支持 RS232 通信,具有温度保护,过流、过压、欠压保护等功能,可靠性高。

减速器为行星减速器,减速比为 16;直角齿轮箱为 1 根输入轴,2 根输出轴,减速比为 2;控制除草铲竖直方向运动的丝杠步进电机为 57BYGH 型混合式步进电机,步距角 1.8°,静力矩 1.6 N·m,相电流 3 A。

2.1.2 除草单体结构设计

玉米田株间除草装置简化模型如图 5 所示,该除草单体结构可以实现除草铲的空间运动和平面运动 2 种运动方式,完成土上避苗除草模式和土下避苗除草模式的除草作业。

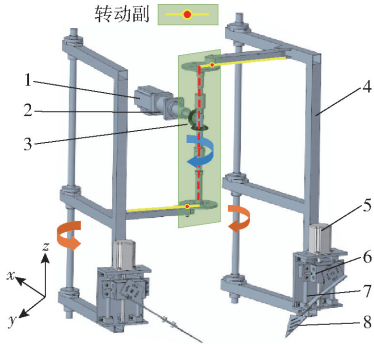


图 5 株间除草单体结构模型

Fig. 5 Intra-row weeding monomer structure model

1. 伺服电机 2. 减速器 3. 直角齿轮箱 4. 摆臂 5. 丝杠步进电机 6. 滑块 7. 光轴 8. 除草铲

除草铲空间立体运动包括水平方向和竖直方向运动。除草铲的竖直方向运动主要由丝杠步进电机、光轴与滑块组成的直线滑台模组完成;水平方向上的左右开合运动是由伺服电机连接减速器,通过直角齿轮箱将绕 x 轴的旋转运动转换成绕 z 轴的旋转运动,再通过曲柄四连杆机构实现摆臂的开合。摆臂上挂载直线滑台模组,当摆臂和直线滑台模组一起工作时,除草铲可以实现空间立体开合运动,达到土下除草土上避苗的效果,即土上避苗除草模式。

当除草铲在整个除草过程中被水平放置,且由直线滑台模组始终将其置于最底端时,则除草铲工作期间始终处于地表以下,仅能实现平面开合运动,达到土下除草土下避苗的效果,即土下避苗除草模式。

2.1.3 除草铲设计

由前期玉米田环境测量知,玉米根系在地表下 20 mm 处的辐射直径约为 60 mm,并参照了周福君

等^[10]、陈子文等^[25]提出的玉米苗保护区范围。如图 6 所示,本研究将除草铲单侧张开初始距离设计为 30 mm,调节范围 20~40 mm。此外,由于除草铲在作业过程中需要长期与土壤接触摩擦,因此在材料上选择耐磨性较好的 45 号钢并经表面热处理增强其硬度,厚度为 2.5 mm,入土深度约 20 mm。除草铲上有 3 个矩形孔,旨在通过减少土壤与除草铲之间的接触面积来减少二者间的阻力。

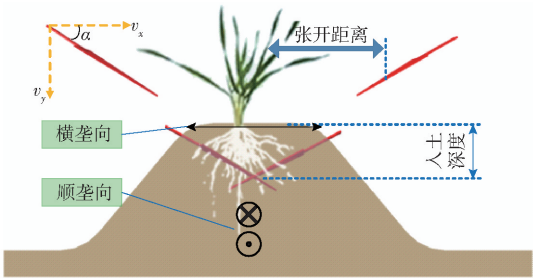


图 6 除草铲工作示意图

Fig. 6 Schematic of weeding shovel work

在除草铲的土下避苗除草模式下,由于只进行平面开合运动,故除草铲始终水平放置于地表下 20 mm 深度位置。在土上避苗除草模式下,除草铲倾斜向下放置,倾斜角由除草铲的水平 and 竖直方向运动速度的复合速度确定,其计算式为

$$\alpha = \arctan \frac{v_y}{v_x} \tag{1}$$

$$t = \frac{d}{v} \tag{2}$$

$$v_y = \frac{2L_s}{t} \tag{3}$$

$$v_x = \omega L_b \tag{4}$$

式中 d ——相邻两棵玉米苗的平均距离,m
 t ——机器人平台经过株间的时间,s
 v ——机器人平均前进速度,m/s
 v_y ——除草铲竖直方向平均速度,m/s
 v_x ——除草铲水平方向平均速度,m/s
 L_s ——丝杠步进电机的单程距离,m
 ω ——摆臂转动的平均角速度,rad/s
 L_b ——摆臂的长度,m
 α ——除草铲倾斜放置角,(°)

2.2 视觉系统设计

2.2.1 数据集制作

田间地面环境复杂,杂草形态丰富多样,一些杂草的形态和玉米苗有很大的相似之处。此外,田间的光照强度和自然风等外界因素变化多端。针对以上非结构化的田间复杂环境,制作一个好的田间苗草数据集需要考虑多种田间状况,所以图像采集工作特别重要。QUAN 等^[23]在采集玉米苗图像时,为

了获得丰富的数据集,提出了 3 种田间状况,即:多角度、全周期、多天气,最终获得的玉米秧苗检测率高达 97.71%。

本研究中,杂草和玉米苗图像采集地点为东北农业大学试验田,采集时间为 2020 年 6 月 14 日,采集时玉米苗处于 3~5 叶期。由于该除草机器人工作时,摄像头始终垂直于地面,所以在图像采集时也只设定了 90°一个拍摄角,满足除草时所需的视角要求。此外,为了降低光照变化造成的影响,选取当天 3 个时间段进行采集:08:30—10:30、13:30—15:30、17:00—18:00,共采集图像 800 幅,分辨率为 640 像素×480 像素。

如表 2 所示,通过对图像进行亮度、饱和度、噪声和模糊 4 种光度畸变以及翻转、缩放、平移 3 种几何畸变^[26]的数据增强方法最终将苗草图像扩展到 8 000 幅。采用 Labellmg 标记软件制作 PASCAL VOC 数据集格式的田间苗草数据集,其中 70% 为训练集,30% 为验证集。

表 2 数据增强后图像数量

Tab. 2 Number of images generated by data

augmentation methods					幅
数据增强方法	原始数据	亮度	饱和度	噪声	
图像	800	1 600	800	1 200	
数据增强方法	模糊	翻转	缩放	平移	共计
图像	1 600	800	800	400	8 000

2.2.2 检测网络训练

本试验需要实现在自然环境下对玉米苗和杂草 2 类目标的快速、精准检测,为了让视觉系统达到快速和鲁棒的检测效果^[27],选用在速度和精度上表现较好的 YOLO V4 模型。YOLO V4 的主干提取网络虽然深度多达 53 层,但通过引入 CSP (Center and scale prediction) 网络不但提高了卷积神经网络的学习能力,还加快了计算速度^[28]。深度卷积神经网络能够自适应地学习目标特征,实现端到端的目标检测,并且能够检测各种动态环境下的目标^[29]。

在玉米苗 3~5 叶期,图像中的杂草和玉米苗在尺寸上相差较大,故将输出张量 26×26 尺度去除,改为输出 13×13 和 52×52 2 种尺度的预测张量,其目的是提高整体模型的速度,使其能够更好地检测到玉米苗(大目标)和杂草(小目标)。基于 YOLO V4 的杂草和玉米苗检测流程^[30]如图 7 所示。

由于杂草目标尺寸较小,为了提升检测精度,所以选择输入尺寸为 416 像素×416 像素,初始学习率 0.001,动量系数设置为 0.9,分类数 2,迭代次数 20 000 次。在所有参数中,根据数据集中的图像特点和 GPU 的表现,当批量尺寸设置为 7 时,训练效

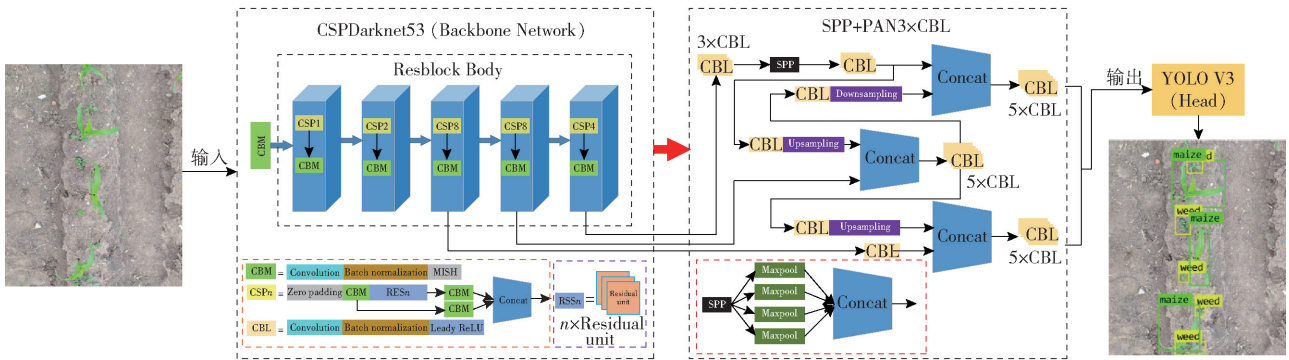


图 7 基于 YOLO V4 的杂草和玉米苗检测

Fig. 7 Maize seedlings and weeds detection based on YOLO V4

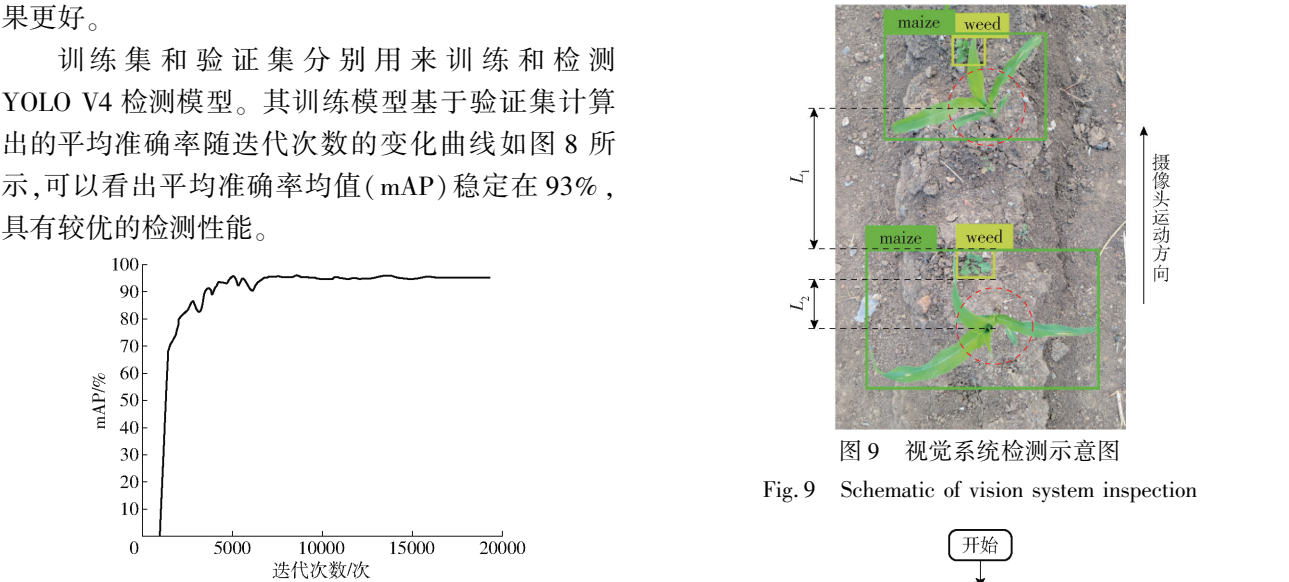


图 8 mAP 随迭代次数的变化曲线

Fig. 8 Change curve of mAP with iterations

2.2.3 检测信息提取

当除草机器人系统在田间工作时,摄像头实时获取垄上的玉米和杂草图像并传给便携式计算机,使用计算机中的检测模型进行实时处理。当视觉检测系统没有检测到株间杂草,则不向控制系统发送除草指令。如图 9 所示,当视觉检测系统检测到株间有杂草时,首先通过玉米苗的绿色边框计算出其中心点坐标,并以提前设置好的保护区直径画圆作为作物的虚拟保护区。当杂草的黄色边框上边界与下一棵玉米苗保护区中心点距离 L_1 和下边界与上一棵玉米苗的距离 L_2 都满足除草条件时,则向控制系统发送除草指令和距离 L_1 和 L_2 ,视觉系统检测流程如图 10 所示。

2.3 控制系统设计

2.3.1 硬件选型

控制系统采用 STM32F407 单片机作为主控芯片,该单片机是由 STMicroelectronic 公司开发的 32 位微处理器,其内核为 ARM 的 Cortex 架构,I/O 口众多,功能强大,满足本系统设计要求。角度传感器

型号为 ATK - MPU6050 V1.1,接口电压 3.3 V/5 V DC,通信方式遵循标准 IIC 通信协议,通信频率 400 kHz (Max)。

由上述整个除草系统的硬件配置可知:便携式计算机采用 220 V AC 供电;伺服电机和步进电机采用 24 V 供电;单片机采用 5 V 供电。本除草系统自身配备 24 V 锂电池,通过逆变器从机器人移动平台上的 48 V 电池获得 220 V AC 电源,通过降压模块

图 10 视觉系统检测流程图

Fig. 10 Flow chart of vision system inspection

从锂电池获得 5 V 电源,角度传感器直接从单片机上端子获得 5 V 电源。

2.3.2 控制策略

如图 11 所示,在除草作业开始之前,伺服电机和步进电机首先进行初始化。控制系统接收到视觉系统传递的除草指令和苗草距离信息后,将距离信息 L_2 编译为除草铲启动延时时间,将 L_1 编译为除草铲闭合状态持续时间。

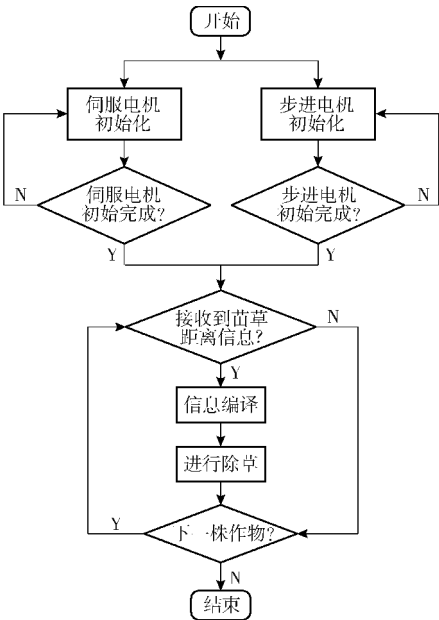


图 11 控制系统流程图

Fig. 11 Flow chart of control system

在机器人移动平台前进时,为了保证除草铲水平运动和竖直运动的同步性,控制系统应保证摆臂单向摆动时间等于除草铲竖直方向单程运动时间,满足

$$\frac{2\theta}{\omega} = \frac{2L_s}{v_y} \tag{5}$$

式中 θ ——摆臂摆动角, (°)

3 试验

3.1 田间试验环境

为了方便统计除草铲对玉米根系的伤害情况,如图 12 所示,对地表下的根系进行大致测量为:地表下 10 mm,根系辐射直径约为 40 mm;地表下 20 mm,根系辐射直径约为 60 mm;地表下 30 mm,根系辐射直径约为 90 mm。

为了检验整个除草系统的可行性和稳定性,试制了样机,并在东北农业大学试验田进行株间除草试验,如图 13 所示。试验田种植方式为垄作,垄距为 550 ~ 650 mm,株距为 250 ~ 300 mm;地块面积约 800 m²,长约 40 m,宽约 20 m;共计约 5 200 株玉米苗,处于 3 ~ 5 叶期。

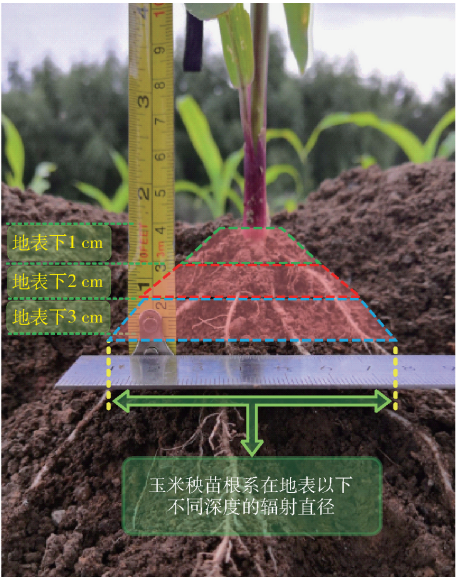


图 12 玉米幼苗根系分布侧视图

Fig. 12 Lateral view of root distribution of maize seedling



图 13 株间除草机器人样机田间试验

Fig. 13 Prototype of intra-row weeding robot test in field

3.2 视觉检测系统试验

视觉检测系统试验单独在田间进行,摄像头安装在机器人移动平台上,摄像头垂直于地面,高度与实际除草时保持一致。试验中采用的图像处理设备为便携式计算机,其配置为 Intel i7 7500u 2.7 GHz 处理器,GPU NVIDIA 显卡 GTX1060,16 GB 内存,满足基本检测要求。

在试验中,机器人移动平台分别以速度 1.0、1.2、1.5 km/h 在试验田中行走,每种速度下完成 3 垄的图像检测并进行统计,统计结果如表 3、4 所示。

表 3 玉米苗检测结果

Tab. 3 Detection results of maize seedlings

移动平台速度/ (km·h ⁻¹)	试验序号	实际玉米 苗数/株	检测玉米 苗数/株	平均检测 率/%
1.0	1	140	135	96.40
	2	135	130	
	3	141	136	
1.2	1	146	140	96.04
	2	143	137	
	3	140	135	
1.5	1	144	129	91.97
	2	150	140	
	3	140	126	

表 4 杂草检测结果

Tab.4 Detection results of weeds

移动平台速度/ (km·h ⁻¹)	试验 序号	实际杂草 数/株	检测杂草 数/株	平均检测 率/%
1.0	1	71	62	93.14
	2	124	117	
	3	89	87	
1.2	1	190	166	92.57
	2	82	80	
	3	111	103	
1.5	1	130	101	86.94
	2	99	86	
	3	80	77	

移动平台在速度 1.0 km/h 下,玉米苗和杂草的平均检测率都最高,而在速度 1.5 km/h 下检测率有所下降。造成以上结果的原因可能是随着机器人移动平台速度的提高,摄像头采集到的图像质量下降,视觉系统实时检测能力下降,导致某些玉米苗和杂草被漏检。

由表 3、4 看出,玉米苗检测结果稳定,杂草检测结果发生轻微波动,通过查看检测过程中的录屏发现造成该结果的原因可能是在俯视的角度下,小尺

寸杂草和玉米苗的叶子重叠^[31],导致杂草只有局部被“看”到或者完全“看”不到,增加了检测难度。

3.3 除草试验

除草试验共分 2 种除草模式进行,第 1 种是除草铲土下避苗除草模式,即除草铲始终在垄台地表下 20~30 mm 的平面内进行开合运动;第 2 种是除草铲土上避苗除草模式,除草铲倾斜放置,与水平面呈约 37°夹角,综合其水平和竖直方向运动实现空间立体开合运动。参照文献[5,7,16]对除草机器人作业速度设计标准,本研究设定在平台前进速度为 1.2 km/h 时,进行 2 种避苗除草模式试验,除草原则都是基于视觉系统检测到株间有杂草时才进行除草作业,否则不进行作业。

在每种除草模式下,基于玉米根系损伤最小化目的,田间试验按保护区直径共分为 3 组进行,直径分别设置为 40、60、80 mm,每组试验分别进行 3 次取平均值,以此来检验除草装备的稳定性和除草、避苗以及根系保护的效果。每次试验后统计伤苗率、除草率和伤根率,并计算出平均除草率、平均伤苗率和平均伤根率。除草率和伤苗率统计结果如表 5、6 所示。由表 5、6 可知,平均除草率均高于 81%,但

表 5 土下避苗除草模式下的除草率、伤苗率统计

Tab.5 Statistics of rate of weeding and maize seedlings injured under mode that weeding shovels were always placed under ground to avoid maize seedlings

保护区直径/ mm	试验序号	杂草数/株	玉米苗数/ 株	除草数/株	伤苗数/株	除草率/%	伤苗率/%	平均除草率/ %	平均伤苗 率/%
40	1	141	135	112	11	79.43	8.15	83.19	9.01
	2	91	130	78	11	85.71	8.46		
	3	122	144	103	15	84.43	10.42		
60	1	135	141	105	10	77.78	7.09	81.43	6.90
	2	160	133	131	8	81.88	6.02		
	3	78	145	66	11	84.62	7.59		
80	1	99	139	85	6	85.86	4.32	80.47	4.81
	2	129	140	102	8	79.07	5.71		
	3	170	136	130	6	76.47	4.41		

表 6 土上避苗除草模式下的除草率、伤苗率统计

Tab.6 Statistics of rate of weeding and maize seedlings injured under mode that weeding shovels were placed on ground to avoid maize seedlings

保护区直径/ mm	试验序号	杂草数/株	玉米苗数/ 株	除草数/株	伤苗数/株	除草率/%	伤苗率/%	平均除草 率/%	平均伤苗 率/%
40	1	89	140	75	10	84.27	7.14	84.76	8.66
	2	124	137	105	14	84.68	10.22		
	3	150	139	128	12	85.33	8.63		
60	1	180	137	148	12	82.22	8.76	82.93	7.85
	2	92	144	77	10	83.7	6.94		
	3	111	140	92	11	82.88	7.86		
80	1	57	137	46	8	80.70	5.84	82.47	5.49
	2	80	145	70	8	87.50	5.52		
	3	101	137	80	7	79.21	5.11		

随着保护区直径设计逐渐减小,株间可除草区域对应增大,可除杂草数量增多,除草能力增强,除草率增加。此外,玉米苗保护区减小,给除草系统避苗带来更大挑战,伤苗率也有所增加,且以上结果在2种模式下都有体现。

玉米苗伤根率对比如表7所示,2种模式下的伤根率相差很大,其中保护区直径在40 mm时对比最为明显,土上避苗除草模式减少了约50个百分点。造成这一明显现象的原因可能是当保护区直径设置偏小时,清除距离玉米苗较近的杂草会使得末端执行器进入作物根系受损的高风险区域,如图3红色方块区域所示。以上关于伤根率的结果显示,土上避苗除草模式平均伤根率为3.35%,相较于土下避苗除草模式降低了36.40个百分点,十分有利于降低玉米根系受损风险,充分发挥了保护作物根系的作用。

表7 2种除草模式下的玉米苗伤根率
Tab.7 Root damage rate of maize seedlings

保护区直径/mm	伤根率/%	
	土上避苗模式	土下避苗模式
40	7.74	67.23
60	2.31	41.56
80	0	10.45

4 结论

(1)设计了包括视觉检测系统、控制系统和机

械除草装置在内的株间除草机器人系统,可在3~5叶期的玉米田内进行株间除草。该系统运行稳定,可完成苗草识别、定位和除草等一系列工序。

(2)提出了一种基于除草铲空间立体运动的株间土上避苗除草模式。为实现该运动模式设计了除草装置,通过一个伺服电机和四杆机构完成除草铲水平运动,通过2个丝杠步进电机完成除草铲垂直方向运动,综合以上2个方向的运动控制除草铲完成空间立体运动。在该运动下,玉米苗保护区变小,可除草区域增大,且除草铲避苗时处于地表以上,远离玉米苗根系。

(3)建立了基于YOLO V4模型的视觉系统来检测玉米苗和杂草,并通过修剪去除26像素×26像素尺度特征层,降低了单帧图像处理时间,提高了检测速度。在移动平台前进速度为1.2 km/h时玉米苗的检测率高达96.04%,杂草检测率高达92.57%,验证了苗草视觉检测系统的可行性。

(4)田间试验分别测试了土上避苗除草模式和土下避苗除草模式。在2种模式下,分别对比了不同玉米苗保护区直径下的除草率、伤苗率和伤根率。结果表明,在机器人移动平台前进速度为1.2 km/h时,除草率均高于81%,土上避苗除草模式的平均伤苗率和伤根率均低于土下避苗除草模式,其中伤根率为3.35%,平均降低了36.40个百分点,验证了土上避苗除草模式除草效果好,且具有较优的保护作物根系的性能。

参 考 文 献

[1] 伍同,曾山,赵润茂,等. 智能化作物株间机械除草技术分析与研究[J]. 农机化研究,2019,41(6):1-6,12.
WU Tong, ZENG Shan, ZHAO Runmao, et al. Analysis and study on intelligentized technologies of intra-row weeding mechanical control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(6): 1-6, 12. (in Chinese)

[2] 陈子文,张春龙,李楠,等. 智能高效株间锄草机器人研究进展与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(5):42-46.
CHEN Ziwen, ZHANG Chunlong, LI Nan, et al. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 42-46. (in Chinese)

[3] GAI J, TANG L, STEWARD B L. Automated crop plant detection based on the fusion of color and depth images for robotic weed control[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(1): 35-52.

[4] PANNACCI E, LATTANZI B, TEI F. Non-chemical weed management strategies in minor crops: a review[J]. Crop Protection, 2017, 96: 44-58.

[5] MELANDER B, LATTANZI B, PANNACCI E. Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage[J]. Crop Protection, 2015, 72: 1-8.

[6] NØRREMARK M, GRIEPENTROG H W, NIELSEN J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396-410.

[7] PÉREZ-RUIZ M, SLAUGHTER D C, FATHALLAH F A, et al. Co-robotic intra-row weed control system[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 45-55.

[8] 胡炼,罗锡文,严乙桢,等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(14):10-16.
HU Lian, LUO Xiwen, YAN Yi'an, et al. Development and experiment of intra-row mechanical weeding device based on trochoid motion of the claw tooth[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 10-16. (in Chinese)

[9] 马程宏,李南,王汉斌,等. 温室株间电驱锄草机控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):89-93.
MA Chenghong, LI Nan, WANG Hanbin, et al. Control system for electric drive intra-row weeding[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 89-93. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150113&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.013. (in Chinese)

[10] 周福君,王文明,李小利,等. 凸轮摇杆式摆动型玉米株间除草装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):77-85.
ZHOU Fujun, WANG Wenming, LI Xiaoli, et al. Design and experiment of cam rocker swing intra-row weeding device for maize

- [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 77–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.009. (in Chinese)
- [11] 陶桂香, 王金武, 周文琪, 等. 水田株间除草机械除草机理研究与关键部件设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 57–63. TAO Guixiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Herbicidal mechanism and key components design for paddy weeding device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 57–63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.009. (in Chinese)
- [12] 韩豹, 申建英, 李悦梅. 3ZCF-7700 型多功能中耕除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 124–129. HAN Bao, SHEN Jianying, LI Yuemei. Design and experiment on 3ZCF-7700 multi-functional weeding-cultivating machine [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 124–129. (in Chinese)
- [13] 黄小龙, 刘卫东, 张春龙, 等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 42–46. HUANG Xiaolong, LIU Weidong, ZHANG Chunlong, et al. Optimal design of rotating disc for intra-row weeding robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 42–46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120608&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.008. (in Chinese)
- [14] 张朋举, 张纹, 陈树人, 等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 55–59. ZHANG Pengju, ZHANG Wen, CHEN Shuren, et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 55–59. (in Chinese)
- [15] 谭国强, 杨香久, 刘建政, 等. 减少中耕次数及其理论的研究[J]. 黑龙江农业科学, 1986(5): 26–32.
- [16] PÉREZ-RUIZ M, SLAUGHTER D C, GLIEVER C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41–49.
- [17] CORDILL C, GRIFF T E. Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 247–252.
- [18] SABER M, LEE W S, BURKS T F, et al. Performance and evaluation of intra-row weeder ultrasonic plant detection system and pinch-roller weeding mechanism for vegetable crops [C] // 2015 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2015.
- [19] ÅSTRAND B, BAERVELDT A J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control [J]. Autonomous Robots, 2002, 13(1): 21–35.
- [20] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521(7553): 436–444.
- [21] WU Dihua, LV Shuaichao, JIANG Mei, et al. Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105742.
- [22] TIAN Yunong, YANG Guodong, WANG Zhe, et al. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157(3): 417–426.
- [23] QUAN Longzhe, FENG Huaiqu, LV Yingjie, et al. Maize seedling detection under different growth stages and complex field environments based on an improved Faster R-CNN [J]. Biosystems Engineering, 2019, 184(8): 1–23.
- [24] BAWDEN O, KULK J, RUSSELL R, et al. Robot for weed species plant-specific management [J]. Journal of Field Robotics, 2017, 34(6): 1179–1199.
- [25] 陈子文, 李南, 孙哲, 等. 行星刷式株间锄草机械手优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 94–99. CHEN Ziwen, LI Nan, SUN Zhe, et al. Optimization and experiment of intra-row brush weeding manipulator based on planetary gear train [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 94–99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150913&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.013. (in Chinese)
- [26] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [J]. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [27] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 等. 气电混合驱动全天候苹果收获机器人设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 21–28, 36. ZHAO Dean, WU Rendi, LIU Xiaoyang, et al. Design and experiment of apple harvesting robot based on gas-electric hybrid drive [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 21–28, 36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002003&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.003. (in Chinese)
- [28] WANG C Y, LIAO H Y, WU Y H, et al. CSPNet: a new backbone that can enhance learning capability of CNN [C] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2020: 390–391.
- [29] CHENG Zhibin, ZHANG Fuquan. Flower end-to-end detection based on YOLOv4 using a mobile device [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020(2): 1–9.
- [30] ZHU Qinfeng, ZHENG Huifeng, WANG Yuebing, et al. Study on the evaluation method of sound phase cloud maps based on an improved YOLOv4 algorithm [J]. Sensors, 2020, 20(15): 4314.
- [31] 刘芳, 刘玉坤, 林森, 等. 基于改进型 YOLO 的复杂环境下番茄果实快速识别方法[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 229–237. LIU Fang, LIU Yukun, LIN Sen, et al. Recognition method for tomatoes under complex environments based on improved YOLO [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 229–237. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200624&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.024. (in Chinese)