doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.003

旱地株间除草机器人设计与试验

周海丽[1,2]　马华涛[1]　俞高红[1,3]　王　旭[1]　徐家盛[1]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.全省农业智能感知与机器人重点实验室,杭州 310018;
3.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018)

摘要:针对株间机械除草机器人株距适应性差、幼苗损伤率高等问题,本文设计一种基于视觉引导的智能株间除草机器人,由移动底盘、除草部件、视觉识别系统及控制系统构成。其中,除草机构采用非圆齿轮行星轮系传动,通过偏心轨迹规划实现避苗除草;视觉系统基于 Otsu 自适应阈值分割算法,建立基于面积阈值的作物-杂草识别定位;控制系统通过作物视觉识别结果控制除草机构驱动电机启停,实现株间作业轨迹控制。试验结果表明,机器人平均检测率为 93.99%;当底盘前进速度为 0.4 m/s 时,不同工况下除草率不小于 92.23%,整体平均除草率为 93.70%,平均伤苗率为 3.90%。试验结果验证了机器人对不同株距株间除草的适应性。

关键词:除草机器人;旱地;移动底盘;作物识别

中图分类号:S224.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)12-0034-10　　**OSID**:

Design and Test of Interplant Weeding Robot in Dryland

ZHOU Haili[1,2]　MA Huatao[1]　YU Gaohong[1,3]　WANG Xu[1]　XU Jiasheng[1]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Province Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Due to the different distribution locations of farmland weeds, the overall can be divided into two categories: inter-row weeds, inter-plant weeding, in which inter-plant weeding is close to the crop, and the weeding operation is intermittent, so the key problem of mechanical weeding is to solve the complexity of inter-plant weeds. In order to solve the problems of poor plant spacing adaptability and high seedling damage rate of interplant mechanical weeding robot, an intelligent interplant weeding robot system was proposed based on visual guidance. The system consisted of a moving chassis, weeding parts, a visual identity system and a control system. Among them, the weeding mechanism adopted non-circular gear planetary gear train transmission, and realized seedling avoidance and weeding through eccentric trajectory planning. Based on the Otsu adaptive threshold segmentation algorithm, the vision system established crop - weed identification and positioning based on area threshold. The system used visual recognition results to control the movement trajectory of the weeding mechanism and the inter-plant operation time. The experiments showed that the robot's average recognition rate reached 93.99%; when the chassis moved at a speed of 0.4 m/s, the weeding rate was not less than 92.23% under different working conditions, with an overall average weeding rate of 93.70%, and the average seedling injury rate was 3.90%. The experimental results verified the adaptability of the robot for weeding between multiple crops.

Key words: weeding robot; dry land; mobile chassis; crop recognition

0　引言

田间杂草是农业生态系统的一部分,依据其空间分布特征可划分为行间杂草和株间杂草[1-3]。其中,株间杂草因与作物混生的生物学特性,导致传统机械除草作业存在显著的作物损伤风险[4-5],此外,

收稿日期:2025-03-25　修回日期:2025-08-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001800)和国家自然科学基金项目(32201676)

作者简介:周海丽(1989—),女,副教授,博士,主要从事农业种植机械和农业机器人研究,E-mail:zhouhl@zstu.edu.cn

通信作者:俞高红(1975—),男,教授,博士生导师,主要从事移栽装备设计和机构运动学与动力学研究,E-mail:yugh@zstu.edu.cn

不同作物株距不同，即使同一作物，由于缺苗漏苗等原因，株距也不均匀，适应株距变化的株间精准除草技术成为杂草管理的难点。

采用除草机器人实现株间避苗除草是当前研究热点[6]。根据避苗方式可分为：机械仿形避苗[8]、传感器引导避苗[9]和视觉识别避苗[10]。机械仿形避苗一般通过除草机构设计实现固定株距避苗，胡炼等[11]设计的爪齿余摆式株间除草装置，通过控制爪齿除草模式和避苗模式实现株间除草避苗作业，伤苗率不超过 8%；李伟杰[12]设计的非圆齿轮行星轮系除草机构利用非圆齿轮传动实现固定株距的株间除草作业，除草率达到 92% 以上；孙硕[13]设计的水平圆盘式除草机构利用水平除草圆盘绕轴水平旋转，通过圆盘锄齿对垄上土壤进行击碎和梳理，将刚萌芽以及地表幼小杂草连根挑出地表或掩埋，达到苗间除草目的。有学者采用传感器引导避苗，王奇等[14]设计了一种自动避苗控制系统，通过光电传感器检测稻苗位置，根据植株监测瞬时前进速度，实时调节电动直线推杆运行延时和运行速度，控制株间除草齿张开设定间距，以躲避秧苗，配合行间除草装置作业，除草率可达 94%。近年来，视觉识别被越来越多应用于除草机中，Hillside Cultivator 公司[15]利用人工辅助视觉检测系统，控制 2 个圆盘垂直齿除草刀的开合实现株间除草，适用于小规模农作物种植模式；Garford 公司[16]基于机器视觉系统采集信息，并实时控制横动机构以对准除草刀位置，通过旋转的末端除草器执行除草作业，可清除农作物茎 8 mm 外区域的杂草，适用于大多数株距和行距的作物，其中植物叶子与下一株需明显分开。基于机器视觉的智能除草，视觉识别准确性和实时性、除草刀轨迹控制精度和响应速度是关键，现有研究多关注静态数据集苗草识别精度[17]，部分学者研究动态作业识别精度，并探索除草刀控制方法以提高作业精度。QUAN 等[18]采用 YOLO v3 检测玉米苗草，发现相机移动速度超过 0.5 m/s 时，杂草去除率显著降低，伤苗率急剧上升；并提出梯形速度分布优化除草盘转速。张景禹[19]采用 YOLO v4 实现玉米苗草检测，采用 S 形加减速度曲线控制步进电机驱动除草铲开闭，当机器前进速度为 0.26 m/s、保护区直径为 69 mm 时性能最佳，除草率、伤苗率和伤根率分别为 82.75%、3.08% 和 5.96%。华勇[20]利用视觉检测框中心定位的方法确定花生植株位置坐标，并基于模糊 PID 控制算法对除草装置对行位置进行控制，当机器移动速度为 0.3 m/s 时，除草铲避苗打开距离误差小于 3 mm，可实现花生株间精准避苗作业。王天健[21]基于 YOLO v5s 开展甘蓝苗草视觉识别与定位点修正算法，并提出基于保护半径与延迟补偿的除草刀视觉伺服控制策略，当作业速度为 0.4 m/s 时，护苗成功率 92.8%。在已有研究中，除草机构运动方式，主要有间歇摆动式除草刀和连续回转式除草盘。前者通过视觉检测信号触发除草刀摆动避苗，该过程易引发土壤飞溅导致伤苗，且间歇摆动的运动特性存在响应滞后与轨迹控制精度不足问题；后者受限于机械结构固有惯性，在株距变化时难以实现精准的株间位置匹配。

针对现有株间机械除草机器人对作物不同株距适应性不足、伤苗率高等问题，本文设计一种融合非圆齿轮行星除草机构与机器视觉的智能除草机器人。通过非圆齿轮变传动比特性，构建除草刀连续避苗作业轨迹，使刀具全程在地表下作业，且回转齿轮驱动具有较高的运动平稳性和高速适应性；配套的机器视觉系统一方面通过实时作物识别引导除草机构避苗作业，另一方面基于动态株距测量结果，精确控制除草刀在株间区域的滞停时间，以适应不同株距株间精准除草。

1　整机结构及工作原理

智能除草机器人整机示意图如图 1 所示。移动底盘包括车轮、驱动电源等部件；底盘选择轮毂电机驱动，利用车轮差速进行转向；移动平台使用遥控手柄进行操控。除草部件布置在底盘中间，由伺服电机、齿轮箱、除草刀等组成。视觉识别系统采用相机进行作物幼苗识别，并根据幼苗位置计算相邻幼苗实际株距；控制系统根据视觉系统反馈的株距信息控制除草部件伺服电机。具体而言，在设定株距下，若机器静置，则除草机构为“8”字形静轨迹，若机器前进，则除草机构形成绕株避苗除草动轨迹；当识别的株距大于设定株距时，除草部件伺服电机将在除草刀运转至株间位置时停转，此时，除草刀滞停在株间且随机器前进去除株间杂草，直至识别到除草刀接近下一株作物时，伺服电机继续转动进行绕株避苗除草。

2　株间除草机构设计

2.1　除草轨迹规划

参考旱地蔬菜种植农艺要求，可知旱地蔬菜作物种植株距多为 250 ~ 450 mm[22]，本文选择除草机构设定株距 250 mm。参考株距为 250 mm 的甘蓝，根据幼苗根系直径（30 ~ 40 mm），确定作物保护区直径为 60 mm。以刀具作业区尽可能覆盖设定株距的株间区域为前提，确定刀具外廓尺寸为 70 mm，在此前提下，根据非圆齿轮特性[23]，开展行星轮系除

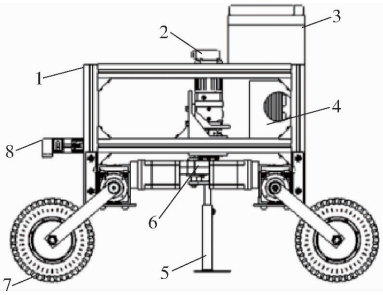


图 1 旱地株间除草机构结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of interplant weeding mechanism in dry land

1. 平台车架 2. 伺服电机 3. 驱动电源 4. 电控箱 5. 除草刀 6. 齿轮箱 7. 轮毂电机 8. 相机

草机构轨迹规划,如图 2 所示。除草刀中心静轨迹为“8”字形,在静轨迹基础上添加水平前进位移得到可绕植株作业的动轨迹,机器前进速度和除草机构转速关系为

$$v = cnh \tag{1}$$

式中 v——机器前进速度,mm/s

c——机构转 1 周除草数量,株/r

n——除草机构转速,r/s

h——株距,mm

c 取 1 株/r。根据除草机构静轨迹可得点 P 动轨迹坐标为

$$\begin{cases} P_{dx}(\varphi_1) = P_x(\varphi_1) + \dfrac{v\varphi_1}{2\pi n} \\ P_{dy}(\varphi_1) = P_y(\varphi_1) \end{cases} \tag{2}$$

式中 φ_1——太阳轮角位移,rad

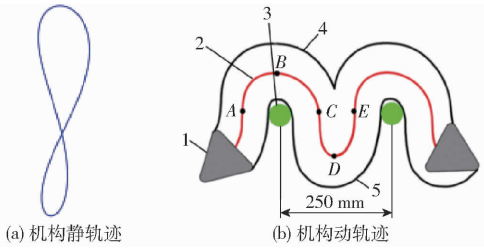


图 2 机构理论静轨迹与理论动轨迹示意图

Fig. 2 Schematics of theoretical static trajectory and theoretical dynamic trajectory of mechanism

1. 除草刀 2. 除草刀中心轨迹 3. 作物保护区 4. 除草刀外侧覆盖范围 5. 除草刀内侧覆盖范围

由图 2b 可知,$A-B-C$ 阶段对应大环扣的避苗阶段,此时除草机构在避开作物的前提下绕植株运动,同时去除作物周围杂草;$C-D-E$ 阶段为小环扣株间除草阶段,实现作物株间全覆盖除草作业。机器前进时,行星轮系行星架每旋转 1 周即完成 1 次除草作业。

2.2 行星轮系设计

如果不考虑非圆齿轮组,可将行星轮系简化为 1 个平面 2R 开链杆组[24],如图 3 所示。其中,杆 L1 表示除草机构行星架,其旋转中心标记为 A_0;杆 L2 表示连接除草刀连杆,其旋转中心记为 A_c。通过在杆 L2 上确定点 $P_i(x_i, y_i)$ 以及直线 P_iQ_i 的方位角 θ_i,即可确定连杆所在平面 π_i 的位置。

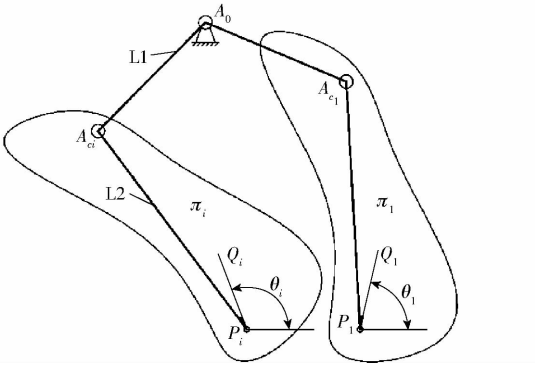


图 3 平面 2R 开链杆组运动示意图

Fig. 3 Motion diagram of planar 2R open chain

2R 开链杆组其他机构参数为

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{(x_{c1}-x_0)^2 + (y_{c1}-y_0)^2} \\ l_2 = \sqrt{(x_{c1}-x_1)^2 + (y_{c1}-y_1)^2} \\ \alpha_1 = \arctan\dfrac{y_{c1}-y_0}{x_{c1}-x_0} \\ \alpha_2 = \arctan\dfrac{y_{c1}-y_1}{x_{c1}-x_1} \\ \alpha_3 = \alpha_2 - \theta_1 \end{cases} \tag{3}$$

式中 l_1——杆 L1 长度,mm

l_2——杆 L2 长度,mm

α_1——杆 L1 与水平面初始夹角,rad

α_2——杆 L2 与水平面初始夹角,rad

α_3——直线 P_1Q_1 与杆 L2 夹角,rad

x_0——非圆齿轮旋转中心横坐标

y_0——非圆齿轮旋转中心纵坐标

将计算得到 Burmester 曲线坐标代入式(3),可得到 2R 开链杆组机构参数,这些参数共同构成了机构解域,在该解域中,选择 1 组合适的机构参数作为非圆齿轮行星轮系机构设计参数。

行星轮系运作时,中间轮与行星轮除自转,还绕太阳轮旋转中心点公转,在计算齿轮传动比时,给太阳轮添加 1 个与行星架角速度 ω_H 相等但方向相反的转速,整个轮系就可看作 1 个定轴轮系。在转化后轮系模型中,各部件角速度信息如表 1 所示。其中,ω_2 为中间轮绝对角速度(包括公转和自转),ω_3 为行星轮绝对角速度。

在转化后轮系模型中,用数值法求解轮系总传动比时,可将太阳轮转动 1 周的角度平均分为 360 份,行星轮和太阳轮之间总传动比为[25]

$$i_{31}^{H}=\frac{\omega_3^H}{\omega_1^H}=\frac{\omega_3-\omega_H}{\omega_1-\omega_H}=\frac{\omega_{31}}{-\omega_H}=-\dot{\varphi}_{31} \tag{4}$$

表 1　转化轮系中各部分零件角速度

Tab. 1　Angular velocity of each component in planetary gear train

构件	原角速度	转化轮系角速度
太阳轮	ω_1	$\omega_1^H=\omega_1-\omega_H=-\omega_H$
行星架	ω_H	$\omega_H^H=\omega_H-\omega_H=0$
中间轮	ω_2	$\omega_2^H=\omega_2-\omega_H=\omega_{21}$
行星轮	ω_3	$\omega_3^H=\omega_3-\omega_H=\omega_{31}$

根据式(4)可知，只需得到太阳轮每转过 1°时，行星轮对应转过的角度，就能计算非圆齿轮行星轮系总传动比。为了简化后文表述，统一将 i_{31}^H 简写为 i_{31}。

根据开链 2R 杆组机构参数，可确定太阳轮在每个位置相对于初始安装角转过的角度 $\varphi_{1i}(i=1,2,3,4)$，以及行星轮在每个位置相对于初始安装角转过的角度 $\varphi_{31i}(i=1,2,3,4)$。然后，使用三次样条插值法，以 φ_{1i} 为横坐标、φ_{31i} 为纵坐标进行插值。因为太阳轮旋转 1 周后行星轮也刚好旋转 1 周，所以插值起点和终点坐标分别为(0°,0°)和(360°,360°)。插值后得到曲线表达式为

$$\varphi_{31}=\int_0^{\varphi_1}f_{31}(\varphi)\,\mathrm{d}\varphi=\int_0^{\varphi_1}i_{31}\,\mathrm{d}\varphi \tag{5}$$

式中　$f_{31}(\varphi)$——转化后轮系行星轮与太阳轮传动比

对式(5)进行求导，可求非圆齿轮行星轮系总传动比。在此基础上，将总传动比分解为两级子传动比。因为采用单级非圆齿轮进行不等速传动会影响到齿轮凹凸特性，导致齿轮节曲线局部曲率出现半径偏小，易使齿轮齿廓发生根切，所以需根据传动比分配原则[26]对两级非圆齿轮进行传动比分配。为了使两级非圆齿轮有相近的运动学与动力学性能，设定总传动比分配目标为：两级非圆齿轮传动比应有相近的幅值周期比，设太阳轮和中间轮之间传动比为 i_{12}，中间轮和行星轮之间传动比为 i_{23}，k 为传动比峰谷值调整系数，使非圆齿轮具有相近的幅值周期比，可进行传动比分配，即

$$\begin{cases}i_{31}^H=i_{12}i_{23}\\ i_{12}=k\sqrt{i_{31}^H}\\ i_{23}=\dfrac{\sqrt{i_{31}^H}}{k}\end{cases} \tag{6}$$

在已知子传动比条件下可对非圆齿轮节曲线进行求解[27]。以太阳轮和第 1 中间轮的啮合过程为例，太阳轮节曲线相关参数计算式为

$$\begin{cases}r_3=\dfrac{ai_{12}}{1+i_{12}}\\ \phi_3=\varphi_1\end{cases} \tag{7}$$

式中　a——齿轮中心距，mm

r_3——太阳轮极径，mm

ϕ_3——太阳轮极角，rad

同理可得第 1、第 2 中间轮和行星轮节曲线相关参数计算式为

$$\begin{cases}r_4=a-r_3\\ \phi_4=\int_0^{\phi_3}i_{12}\,\mathrm{d}\phi_3\\ r_5=\dfrac{ai_{23}}{1+i_{23}}\\ \phi_5=\phi_4\\ r_6=a-r_5\\ \phi_6=\int_0^{\phi_5}i_{23}\,\mathrm{d}\phi_5\end{cases} \tag{8}$$

式中　r_4——第 1 中间轮极径，mm

ϕ_4——第 1 中间轮极角，rad

r_5——第 2 中间轮极径，mm

ϕ_5——第 2 中间轮极角，rad

r_6——行星轮极径，mm

ϕ_6——行星轮极角，rad

将节曲线极坐标转换为直角坐标便于通过节曲线获得非圆齿轮齿廓，转换式为

$$\begin{cases}x=x_0+r\cos\phi\\ y=y_0+r\sin\phi\end{cases} \tag{9}$$

式中　r——极径，mm

ϕ——极角，rad

求解非圆齿轮节曲线后，利用课题组开发的基于 Matlab 的“非圆齿轮齿廓设计软件”(该软件支持同时设计 1 对共轭非圆齿轮的齿廓)，导入节曲线坐标(“.txt”格式)，得到齿轮节曲线如图 4 所示。

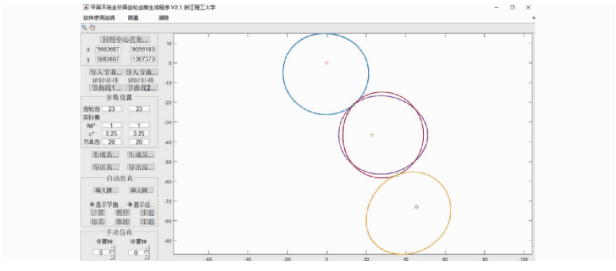


图 4　非圆齿轮节曲线导入示意图

Fig. 4　Schematic of introduction of non-circular gear joint curves

导入共轭非圆齿轮节曲线后，使用“生成齿廓”功能即可生成非圆齿轮齿廓线，其中齿轮齿数为 23，齿顶高系数 h_a^* 为 1，顶隙系数 c^* 为 0.25。

机构示意图如图 5 所示，主要由太阳轮、中间轮、行星轮、除草刀连杆、除草刀组成，在工作过程中，太阳轮固连在机架上，通过行星架转动，将动力从两级齿轮副传递给除草刀连杆，使除草刀按照设定的轨迹运动。

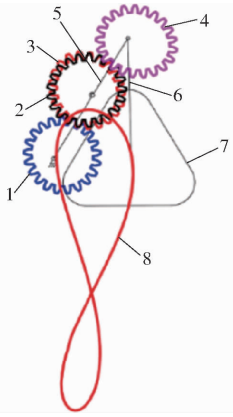


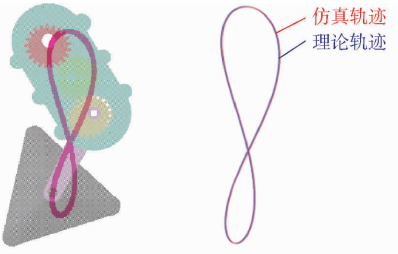
图 5 机构示意图

Fig. 5 Kinematic diagram of mechanism

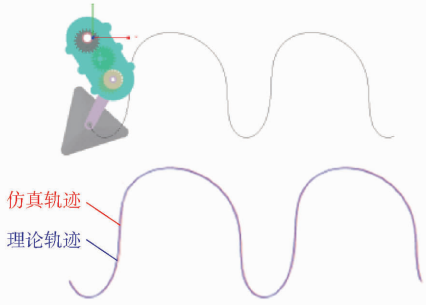
1. 太阳轮 2. 第 1 中间轮 3. 第 2 中间轮 4. 行星轮 5. 行星架 6. 除草刀连杆 7. 除草刀 8. 除草刀静轨迹

2.3 除草机构仿真

依据上述设计参数，开展除草机构结构设计，在 Solidworks 中构建除草机构三维模型，随后将模型导入 ADAMS 软件进行运动学分析。设定行星架转速为 1.6 r/s，机构前进速度为 0.4 m/s，仿真时长为 8 s，仿真步数为 720。仿真得到除草刀中心点运动轨迹如图 6 所示，仿真轨迹与理论轨迹一致性高，证明三维模型设计的合理性和正确性。



(a) 静轨迹



(b) 动轨迹

图 6 仿真轨迹与理论轨迹对比

Fig. 6 Comparison diagrams between simulated static trajectory and theoretical static trajectory

仿真中对除草刀在整个除草过程的轨迹进行叠加，可得除草刀作业覆盖区域，如图 7 所示，验证了除草机构对株间除草作业的有效性。

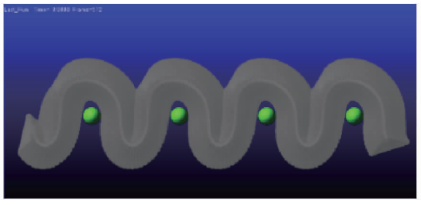


图 7 除草刀运动过程仿真

Fig. 7 Simulation of motion process of weeding knife

3 作物视觉识别

3.1 田间图像背景分割

根据作物 3 ~ 5 叶期田间图像可知，此阶段作物与杂草较为分明，因此，根据植物与土壤颜色差异，以及作物与杂草叶片大小差异，本文提出基于阈值分割的作物识别方法。

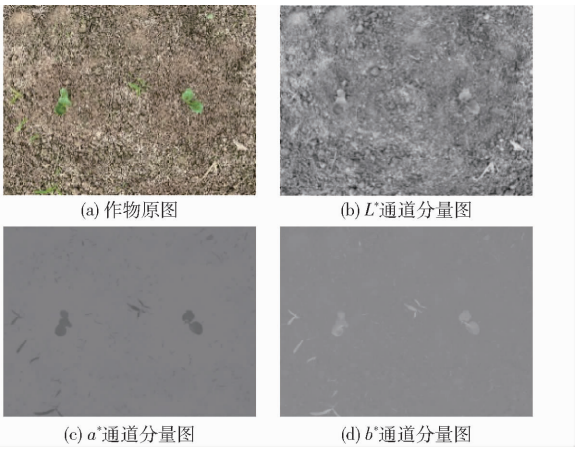
目前常用的色彩空间有 RGB、HSV 和 $L^*a^*b^*$ 等。陈树人等[28]对棉花和铁苋菜(杂草)R、G 和 B 标准差进行了研究，结果表明，当 R 与 B 标准差小于 5 时为铁苋菜，结果显示该方法正确率可达 82.1%；HAMUDA 等[29]研究了在不同光照条件下，利用 HSV 颜色空间分割花椰菜和杂草，不同环境下花椰菜正确识别率达 99.04%；GARCÍA-MATEOS 等[30]在比较 RGB、XYZ、YCrCb 及 Lab 等 13 种色彩空间对土壤与作物分割效果时，发现 $L^*a^*b^*$ 色彩空间中 a^* 通道在分割土壤与作物方面表现最优，准确率高达 99.2%，同时处理速度也相对较快。由于 $L^*a^*b^*$ 的明度分量 L^* 与颜色分量 a^* 和 b^* 相互独立，对光照强度变化具有较好的鲁棒性，故本文选用该方法。

以甘蓝为例，在田间拍摄得到甘蓝幼苗原始图像如图 8a 所示。首先利用 Python 中 OpenCV 工具库把 RGB 图像转换为 $L^*a^*b^*$ 色彩空间，随后针对 L^*、a^*、b^* 各分量进行单独分析，得到各分量图像如图 8 所示。可知，a^* 通道在区分作物目标与田间背景方面表现最优，故使用 a^* 通道进行除草作业时图像处理。

图像色彩空间转换后，采用计算效率较高的 Otsu 算法对 a^* 通道分量图的背景分割。在处理图像时，会遍历全部像素，通过特定方案确定 1 个最佳分割阈值 T，依据此阈值，图像像素被分为 2 类：像素大于或等于分割阈值 T 设为 255(表示白色)和小于分割阈值 T 设为 0(表示黑色)，即

$$Binary(x,y)=\begin{cases}255 & (f(i,j)\geqslant T)\\ 0 & (f(i,j)<T)\end{cases} \tag{10}$$

式中 $Binary(x,y)$——二值图在(x,y)处色度



(a) 作物原图　(b) L^*通道分量图　(c) a^*通道分量图　(d) b^*通道分量图

图 8　作物与杂草图像各分量图

Fig. 8　Crop and weed component plots

Otsu 分割算法处理后前景为纯黑。为了提升视觉效果，对背景与前景进行颜色反转处理，结果如图 9 所示。可知，Otsu 算法可准确地分离作物与杂草目标。



图 9　阈值分割结果

Fig. 9　Threshold segmentation result

3.2　作物识别与定位

由于作物占据较大面积而杂草占据的面积相对较小，通过设定合适的面积阈值区分作物与杂草。即将图像每个连通区域加以标记，随后剔除面积区域较小的部分，剩下部分即为作物。通过标记算法得出感兴趣区域(ROIs)，完成相关区域标记后，可以根据 ROIs 面积、中心位置以及形状特征等相关特征定位作物目标的位置信息。由于图像中小面积杂草易与作物区分，为了提高处理效率，可将其作为杂质去除。

以甘蓝为例，分析作物与杂草像素面积，得出甘蓝像素面积为 18 000 ~ 25 000 像素，藜、蓼等常见田间杂草像素面积小于 12 000 像素，因此，选取 18 000 像素作为面积阈值。比较 ROIs 面积与阈值，在剔除小于阈值的 ROIs 后，对剩余的 ROIs 进行区域轮廓边界框绘制，完成作物识别以及作物边界轮廓绘制后，可得出作物大体位置信息。为进一步确定作物株间距离，计算图像中作物轮廓边界线质心，作为作物苗心位置加以标注，如图 10 所示。最后根据苗心位置坐标，计算相邻作物实际株间距离。

考虑到田间作业中由于自然光照存在阴影遮盖作物现象，如图 11 所示，在图像分割过程，阴影可能会产生错误片段。在对象检测算法中，阴影可能被错误地检测为对象，在阴影区域检测和去除中，基于 $L^*a^*b^*$ 等效图像的平均值进行阴影检测。



图 10　作物识别结果

Fig. 10　Crop identification results



图 11　阴影遮挡作物现象

Fig. 11　Shadow blocking crop phenomenon

对于阴影区域，主要特点是亮度较低，但在颜色成分上变化较小，于是通过计算图像每个像素在 $L^*a^*b^*$ 通道的均值完成阴影检测，根据计算得到的均值，判断 a^* 和 b^* 通道平均值之和是否小于等于给定的阈值 t，如果是：将满足条件的像素点归为阴影区域；否则，将 L^* 和 b^* 通道低于阈值 t 部分归类为阴影；阈值计算式为

$$t = (mean(L) - std(L))/3 \tag{11}$$

式中　$mean(L)$——每个通道平均值

$std(L)$ ——每个通道标准差

通过阴影区域和非阴影区域 $L^*a^*b^*$ 平均值计算颜色修正比率，即非阴影区域 $L^*a^*b^*$ 平均值除以阴影区域 $L^*a^*b^*$ 平均值，并利用该比率对阴影区域的色彩进行缩放实现阴影去除。

由于阴影区域不均匀照明，整个阴影区域的相同常数可能在阴影边缘附近创建过度照明区域。通过在过亮区域应用中值滤波克服。中值滤波器是一种常用的图像处理算法，用于去除图像中噪声，原理是将每个像素点周围的像素值排序，然后取中间值作为该像素点的值。这样可得 1 个边缘无过亮或过亮现象有所缓解的无阴影图像。图 12 为阴影条件下图像处理结果和相机识别效果。

视觉驱动除草机构运动控制策略如图 13 所示。当相机识别的作物株距大于设定株距时，将信息传给控制系统，根据株距信息控制伺服电机，使除草刀在大株距环境下完成 1 个周期的运动后保持在作物



(a) 分割效果 (b) 识别效果

图 12 阴影处理结果

Fig. 12 Shadow processing results

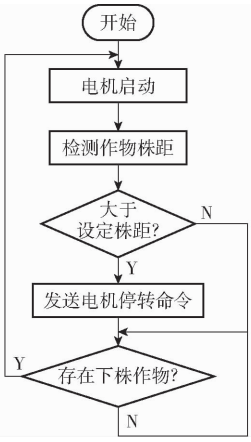


图 13 控制系统流程图

Fig. 13 Flowchart of control system

前方位置,沿行进方向直线运动,直至检测到下一株作物时再进行下一周期运转。

4 样机试验

4.1 试验条件

根据设计参数,搭建除草机器人样机,如图 14 所示。以 3 ~ 5 叶期甘蓝苗为目标作物,选择蓼科植物作为株间杂草(根系深度 15 ~ 40 mm),除草刀入土深度选为 15 mm。针对 3 种固定株距 250、350、450 mm 和混合株距 250 ~ 450 mm 的作业环境开展除草试验。其中,考虑到株距误差、缺苗等情况,混合株距试验中株距采用随机分布。

以除草率以及伤苗率作为作业性能指标[31],计算式为

$$Q_C = \left(1 - \frac{K_L}{K_C}\right) \times 100\% \tag{12}$$

$$Q_D = \frac{K_D}{K_E} \times 100\% \tag{13}$$

式中 Q_C——除草率,%

K_L——根部未被切断以及未被土壤完全覆盖杂草,株

K_C——作业前株间区域杂草数量,株

Q_D——伤苗率,%

K_D——作业后作物伤苗数量,株

K_E——作业前作物数量,株

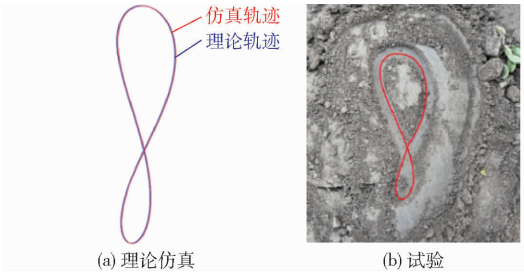


图 14 整车正面视角

Fig. 14 Frontal view of vehicle

4.2 除草机构空转试验

除草机器人除草试验前,需验证其实际除草轨迹。将除草机构安装在移动底盘上,通过伺服电机驱动齿轮箱壳体旋转,采用高速摄像技术逐帧标记除草刀中心点轨迹,绘制实际轨迹与理论、仿真轨迹,如图 15 所示。可知,实际轨迹与理论轨迹和仿真轨迹基本一致,证明除草机构设计的可行性。



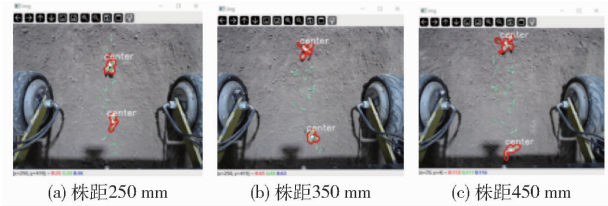
(a) 理论仿真 (b) 试验

图 15 除草静轨迹

Fig. 15 Weeding static trajectories

4.3 视觉识别试验

为了研究视觉识别在不同机器前进速度下效果,根据机器前进速度和除草机构转速关系,同步调整机器前进速度与除草机构转速,在确保不同前进速度下除草轨迹一致性前提下,设定前进速度 0.25、0.4、0.6 m/s,对应株距 250、350、450 mm,开展视觉识别试验,如图 16 所示,视觉识别能准确区分作物,并获得作物质心位置。



(a) 株距250 mm (b) 株距350 mm (c) 株距450 mm

图 16 作物识别效果示意图

Fig. 16 Schematics of crop recognition effect

图像检测精度如表 2 所示,前进速度 0.25、0.4、0.6 m/s 对应作物平均检测率为 96.28%、95.28%、90.42%,机器人平均检测率为 93.99%;

其中，检测率随前进速度升高略有下降，这是由于机器人移动速度变快时，摄像头识别到的图像质量下降，导致作物检测能力下降，出现漏检；考虑除草机器人作业精度，选择前进速度 0.4 m/s 作为除草性能试验作业参数。

表 2　检测结果

Tab. 2　Test result

前进速度/(m·s^{-1})	种植株距/mm	实际作物数/株	检测作物数/株	平均检测率/%
0.25	250	75	72	96.28
		68	65	
		72	70	
0.40	350	82	78	95.28
		78	74	
		73	70	
0.60	450	76	68	90.42
		84	78	
		80	71	
平均值				93.99

4.4　除草试验

在前进速度 0.4 m/s 时，对固定株距 250、350、450 mm 和混合株距 250 ~ 450 mm 种植场景分别进行除草作业试验，如图 17、18 所示。在固定株距情况下，机器人依靠除草机构可较好地完成作物株间除草作业，在大株距情况下，机器人按照指令在株间进行直线运动，体现出良好的避苗除草效果。除草不完全一方面是因为作物保护区内的杂草被漏除，另一方面是因为部分杂草被整株带起导致根系未被完全切断。主要原因是移动底盘按固定轨迹行进时，部分作物与作物行偏离过大，使得作物与除草刀具发生干涉。后续可在除草机构与移动底盘之间增加滑动导轨，同时识别算法添加作物行中心线计算，当作物偏离中心线位置时，控制除草机构横向移动，使得除草机构始终保持在作物中心位置。此外，小株距作业时，除草刀旋转过程打到的土块溅起会砸到作物，导致伤苗，后续可进一步优化刀杆结构，降低对土壤的扰动。



(a) 株距250 mm　(b) 株距350 mm　(c) 株距450 mm

图 17　固定轨迹除草前后效果

Fig. 17　Comparison of fixed trajectory before and after weeding



(a) 除草前　(b) 除草后

图 18　混合株距除草前后效果

Fig. 18　Comparison of mixed plant spacing before and after weeding

表 3 为除草试验除草率和伤苗率，底盘以速度 0.4 m/s 前进时，不同工况下除草率均不小于 92.23%，机器平均除草率为 93.70%，平均伤苗率为 3.90%。

本文设计的除草机器人基本满足除草要求，性能略优于部分同类蔬菜株间除草机器人，如马中洋[34]基于改进 U－Net 模型搭配摆动除草铲进行白菜株间除草，当前进速度为 0.36 m/s、株距为 510 mm 时，除草率为 86.36%，伤苗率为 3.72%；王天健[21]采用摆动式除草刀进行甘蓝株间除草，当前进速度为 0.4 m/s 且株距为 350 mm 时，伤苗率为 9.18%，但与部分研究仍存在一定差距，如王硕等[35]设计的凸轮摆杆式生菜株间除草装置，在温室内作业，当前

表 3　试验结果

Tab. 3　Test result

种植株距/mm	作物数/株	杂草数/株	除草率/%	伤苗率/%
250	23	106	94.34	8.70
	23	96	92.71	4.35
	22	94	93.62	4.55
350	22	98	94.90	9.09
	22	95	94.74	4.55
	21	90	93.33	0
450	20	86	94.19	5.00
	19	82	93.90	5.26
	19	80	95.00	0
250 ~ 450	19	103	92.23	5.26
	18	98	92.86	0
	18	94	92.55	0
平均值			93.70	3.90

进速度为0.56 m/s、株距为270～300 mm时,除草率为93.22%,伤苗率为2.87%,这是因为该机器人进行了性能指标优化求解,且设计的横移机构可实现对行调节,减小了作物行偏移引起的伤苗。

5 结论

(1)设计了一种基于视觉识别的行星轮系除草机器人,可有效清除幼苗期作物株间杂草,并能适应多种株距下除草作业,其除草率高、伤苗率低,作业性能稳定。

(2)规划了适应多种株距的避苗除草轨迹,采用人机交互方法得到行星轮系除草机构参数,虚拟样机仿真和试验结果表明,试验轨迹、理论轨迹和仿真轨迹基本一致,证明了该除草机构设计的可行性。

(3)建立视觉识别模块,通过Otsu算法对图像进行阈值分割处理,再通过设定合适的面积阈值来对作物与杂草进行区分,当底盘前进速度为0.4 m/s时,作物平均检测率为93.99%,证明了作物识别系统的可行性。

(4)针对株距250、350、450 mm和混合株距250～450 mm进行了株间避苗除草试验,除草机器人平均除草率为93.70%,平均伤苗率为3.90%,适应多种株距除草作业,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 郑和, 李紫琪, 单以才, 等. 农田机械除草技术与装备研究现状与发展趋势[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(2): 285－295.
ZHENG He, LI Ziqi, SHAN Yicai, et al. Current status and development trends of agricultural machinery weeding technologies and equipment[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(2): 285－295. (in Chinese)

[2] KWINDA M, SIEBERT S J, VAN COLLER H, et al. Identifying plant functional traits of weeds in fields planted with glyphosate-tolerant maize for preferable weed management practices[J]. Agriculture, 2024, 14(2): 223.

[3] MEMON M S, CHEN S, SHEN B, et al. Automatic visual recognition, detection and classification of weeds in cotton fields based on machine vision[J]. Crop Protection, 2025, 187: 106966.

[4] PAUL S, NATH B C, HUDA M D, et al. Assessment of mechanical weeders in paddy fields: a study on operational effectiveness in bangladesh[J]. Heliyon, 2025, 15(4): 135－147.

[5] FOGLIATTO S, MILAN M, DE PALO F, et al. Effectiveness of mechanical weed control on Italian flint varieties of maize[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2019, 34(5): 447－459.

[6] 李世柱,黄文明,王海翔,等.机械除草技术在农业“双减”政策下推广应用研究[J].农业工程,2025,15(5):1－9.
LI Shizhu, HUANG Wenming, WANG Haixiang, et al. Promotion and application of mechanical weeding technology under “double reduction” policy in agriculture[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(5): 1－9. (in Chinese)

[7] 张馨悦,王庆杰,王超,等.旱田智能化机械除草技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2025,56(4):22－41,71.
ZHANG Xinyue, WANG Qingjie, WANG Chao, et al. Research progress on intelligent mechanical weeding technology and equipment in dry field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 22－41, 71. (in Chinese)

[8] 叶圣豪. 大豆株间除草装置的设计与试验研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2024.
YE Shenghao. Design and experimental study of intra-plant herbicidal devices for soybeans[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. (in Chinese)

[9] 顾炳龙. 玉米株间避苗除草技术及其配套装置研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
GU Binglong. Research on technology and devices for intra-row weeding avoiding seedling between maize(*Zea mays* L.) plants[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)

[10] 肖立同,王熙.基于改进YOLO算法的玉米苗间杂草检测模型研究[J].农机化研究,2025,47(8):10－16.
XIAO Litong, WANG Xi. Interseedling weed detection model of maize based on improved YOLO algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 10－16. (in Chinese)

[11] 胡炼, 林潮兴, 杨伟伟, 等. 株间除草装置的除草和避苗状态切换控制系统设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(3): 305－309.
HU Lian, LIN Chaoxing, YANG Weiwei, et al. Design of switch controlling system between the state of weeding and avoiding for intra-row weed mechanical control device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(3): 305－309. (in Chinese)

[12] 李伟杰. 非圆齿轮行星轮系株间除草机构的设计与试验[D].杭州: 浙江理工大学, 2021.
LI Weijie. Design and test of an intra-row weeding mechanism for planetary gear train with non-circular gears[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)

[13] 孙硕. 玉米苗间松土除草机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
SUN Shuo. Design and experimental study on intra-row weeding machine in maize field[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[14] 王奇, 周文琪, 唐汉, 等. 弧齿往复式稻田株间自动避苗除草装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 53－61.
WANG Qi, ZHOU Wenqi, TANG Han, et al. Design and experiment of arc-tooth reciprocating motion type seedling avoided

weeding control device for intertillage paddy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 53 – 61. (in Chinese)
[15] E-COWEEDER. Hillside Cultivator Company, LLC[EB/OL]. http://www.hillsidecultivator.com/?page_id=39, 2020.
[16] GARFORD. Robocrop InRow weeder[EB/OL]. https://garford.com/products/robocrop-inrow-weeder, 2020.
[17] WANG A, ZHANG W, WEI X. A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 226 – 240.
[18] QUAN L, JIANG W, LI H, et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 13 – 31.
[19] 张景禹. 垄作玉米智能株间机械除草装置设计与试验[D]. 哈尔滨：东北农业大学, 2021.
ZHANG Jingyu. Design and experiment on intelligent intra-row mechanical weeding device of the ripple maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[20] 华勇. 基于机器视觉的花生株间除草装置控制系统研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2024.
HUA Yong. Research on the control system of peanut intra-row weeding device based on machine vision[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024. (in Chinese)
[21] 王天健. 甘蓝除草机器人视觉识别与伺服控制关键技术研究[D]. 苏州：苏州大学, 2023.
WANG Tianjian. Research on key technologies of vision recognition and servo-control for cabbage weeding robot[D]. Suzhou: Suzhou University, 2023. (in Chinese)
[22] 鲍李旭, 俞高红, 赵雄, 等. 青菜高密度移栽机植苗机构的设计与试验[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(1): 100 – 111.
BAO Lixu, YU Gaohong, ZHAO Xiong, et al. Design and experiment of a planting mechanism of high density transplanters for brassica chinensis[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2024, 51(1): 100 – 111. (in Chinese)
[23] 马行潇, 张城, 赵雄, 等. 基于混合运动学条件的行星轮系式高密度栽植机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026,57(5):241 – 248.
MA Xingxiao, ZHANG Cheng, ZHAO Xiong, et al. Optimization design and experiment of planetary gear train high-density planting mechanism based on hybrid kinematic conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(5):241 – 248. (in Chinese)
[24] YE J, ZHAO X, WANG Y, et al. A novel planar motion generation method based on the synthesis of planetary gear train with noncircular gears[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(10): 4939 – 4949.
[25] 孙良, 徐亚丹, 黄恒敏, 等. 基于节曲线凸性判别的行星轮系移栽机构解析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 83 – 92.
SUN Liang, XU Yadan, HUANG Hengmin, et al. Solution and analysis of transplanting mechanism with planetary gear train based on convexity of pitch curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 83 – 92. (in Chinese)
[26] 赵雄, 王川, 杨茂祥, 等. 非圆齿轮行星轮系自动取苗机构逆向设计分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 30 – 36.
ZHAO Xiong, WANG Chuan, YANG Maoxiang, et al. Reverse design and analysis of automatic seedling pick-up mechanism with non-circular gear planetary train[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 30 – 36. (in Chinese)
[27] 王磊, 吴启帅, 俞高红, 等. 小株距非圆齿轮行星轮系植苗机构设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(11):294 – 305.
WANG Lei, WU Qishuai, YU Gaohong, et al. Design and experiment of small plant-spacing non-circular planetary gear train planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 294 – 305. (in Chinese)
[28] 陈树人, 沈宝国, 毛罕平, 等. 基于颜色特征的棉田中铁苋菜识别技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 149 – 152.
CHEN Shuren, SHEN Baoguo, MAO Hanping, et al. Herb detection from cotton field based on color feature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 149 – 152. (in Chinese)
[29] HAMUDA E, GINLEY B M, GLAVIN M, et al. Automatic crop detection under field conditions using the HSV colour space and morphological operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 133: 97 – 107.
[30] GARCÍA-MATEOS G, HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ J L, ESCARABAJAL-HENAREJOS D, et al. Study and comparison of color models for automatic image analysis inirrigation management applications[J]. Agricultural Water Management, 2015, 151: 158 – 166.
[31] WANG J, LIU Z, YANG M, et al. A combined paddy field inter-row weeding wheel based on display dynamics simulation increasing weed mortality[J]. Agriculture, 2024, 14(3): 444.
[32] YE S, XUE X, SI S, et al. Design and testing of an elastic comb reciprocating a soybean plant-to-plant seedling avoidance and weeding device[J]. Agriculture, 2023, 13(11): 2157.
[33] JIAO J, HU L, CHEN G, et al. Development and experimentation of intra-row weeding device for organic rice[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 146.
[34] 马中洋. 基于改进 U – Net 模型的白菜株间避苗除草装置设计与试验[D]. 长春：吉林大学, 2023.
MA Zhongyang. Design and experiment of intra-row seedling avoidable weeding control device based on an improved U – Net model for Chinese cabbage[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
[35] 王硕,苏道毕力格,王子蒙,等. 凸轮摆杆式生菜株间除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 34 – 44.
WANG Shuo, SU Daobilige, WANG Zimeng, et al. Design and experiments of the cam swing rod intra-row weeding device for lettuce farm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 34 – 44. (in Chinese)