doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.002

田间激光除草机器人对靶控制系统设计与试验

钟辉宇[1,2]　陈耀阳[1]　李　杰[1,2]　张馨悦[1,2]　李　钰[1]　王庆杰[1,2]　李　慧[3]

(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;
3. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 杂草与作物竞争养分会影响农作物产量,传统化学除草虽高效但易导致环境污染和抗药性问题。为实现绿色、高精度的非接触除草作业,本文设计了一种基于视觉感知与路径控制的激光除草机器人对靶控制系统。系统由深度相机、振镜及高功率二氧化碳激光器等组成,能够完成杂草识别、空间定位与激光除草作业。基于 Teensy 3.2 型微控制器的振镜与激光一体化控制方案,结合 XY2-100 通讯协议和 TTL 触发机制,无需额外控制卡即可实现振镜控制与激光精确开关控制。建立了结合手工测量与修正优化的相机振镜外参标定方法,并提出基于几何反解的姿态误差补偿算法,实现了在不同姿态条件下的激光瞄准自动修正和激发,并进行了验证试验。结果表明,在不同高度和倾斜角下系统平均瞄准误差均小于 1 cm,激光除草命中率达 98.6%。确定最佳作业参数为:作业高度 80 cm、照射时间 0.5 s。该系统能够实现高精度、低能耗的自主除草,为激光除草技术在田间复杂环境中的应用提供了参考。

关键词: 激光除草机器人; 杂草识别; 振镜控制; 外参标定; 激光瞄准

中图分类号: S223　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)04-0010-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Target Control System for Field Laser Weeding Robot

ZHONG Huiyu[1,2]　CHEN Yaoyang[1]　LI Jie[1,2]　ZHANG Xinyue[1,2]　LI Yu[1]　WANG Qingjie[1,2]　LI Hui[3]

(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*
3. *Shandong Society for Agricultural Machinery*, *Ji'nan* 250100, *China*)

Abstract: Weeds compete with crops for nutrients and negatively affect agricultural yield. Traditional chemical weeding, though efficient, tends to cause environmental pollution and herbicide resistance. To achieve green, high-precision, and non-contact weeding operations, a target-oriented control system for a laser weeding robot was designed based on visual perception and path control. The system consisted of a depth camera, galvanometer scanner, and high-power CO_2 laser, enabling weed detection, spatial localization, and laser operation. A Teensy 3.2 microcontroller-based integrated control scheme for the galvanometer and laser was proposed, which combined with the XY2-100 communication protocol and TTL triggering mechanism, allowed precise galvanometer control and laser switching without the need for an additional control card. A camera-galvanometer extrinsic calibration method combining manual measurement and refinement optimization was established, and an attitude-error compensation algorithm based on geometric inverse solving was proposed to achieve automatic correction of aiming and firing under different pose conditions, followed by verification experiments. The results showed that the average aiming error of the system remained below 1 cm at different heights and tilt angles, and the laser weeding hit rate reached 98.6%. The optimal operating parameters were determined as a working height of 80 cm and a laser exposure time of 0.5 s. This system can enable high-precision, low-energy autonomous weeding and provide a reference for the application of laser weeding technology in complex field environments.

Key words: laser weeding robot; weed identification; galvo control; external parameter calibration; laser aiming

收稿日期: 2025-10-16　修回日期: 2025-11-10

基金项目: 山东省一体化项目(NJYTHSD-202306)和贵州省科技计划项目(黔科合重大专项字[2024]004)

作者简介: 钟辉宇(2001—),男,硕士生,主要从事农业机器人技术与装备研究,E-mail: zhonghuiyu@cau.edu.cn

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备研究,E-mail: wangqiingjie@cau.edu.cn

0　引言

杂草与作物争夺养分和光照[1]，严重影响农作物产量和品质[2]。传统化学除草虽高效，但长期使用导致环境污染和抗药性问题[3-4]。机械除草具有绿色环保优势，但容易出现伤苗及作业效率受限等问题[5-6]。激光除草技术利用高能量激光束灼烧杂草组织，具有非接触、高精度和环保等优势，是绿色农业的潜在替代方案[7-8]。然而，能量控制、视觉识别精度及动态瞄准误差仍制约其田间应用。

国外学者在激光除草原理与系统设计方面开展了系统研究。MARX 等[9]建立杂草热损伤模型并揭示功率-作用时间关系；RAKHMATULIN 等[10]设计低成本装置实现精确光斑定位；XIONG 等[11]提出静态激光除草机器人与快速路径规划算法；BLOOMER 等[12]指出激光除草在蔬菜与大田作物中兼具高效与环保优势；WU 等[13]提出了一种基于 3UPS－RPU 并联机构激光除草机器人；VARGAS 等[14]提出了一种高效动态除草方法；ZHAO 等[15]开发了基于 DIN－LW－YOLO 的草莓田激光除草机器人并完成田间试验验证。

国内研究起步较晚。潘雷等[16]开展 CO_2 激光除草能量参数试验；吴旺旺等[17-18]设计执行机构并在陆稻田完成验证；张良安等[19]优化四足式激光除草机器人结构；颜浩等[20]提出并设计一种 *XY* 移动平台、机械臂与蓝光激光器结合的蓝光激光除草机构。激光除草系统正由试验验证向智能集成发展，在复杂地形下识别鲁棒性、系统延迟与姿态误差补偿等方面仍需深入研究[21]。

本文以高精度对靶激光除草为目标，设计并搭建激光除草平台，完成杂草目标检测跟踪算法、振镜控制方法以及系统内外参标定修正等核心部件设计，通过试验验证机器人关键性能，以期为激光除草机器人研究提供参考。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

为实现杂草自动识别与精确激光除草作业，设计了一套基于视觉感知与智能控制的激光除草机器人系统。系统由感知模块、上位机控制模块、下位机控制模块、激光执行模块、电源模块与冷却模块组成，系统三维图如图 1 所示。

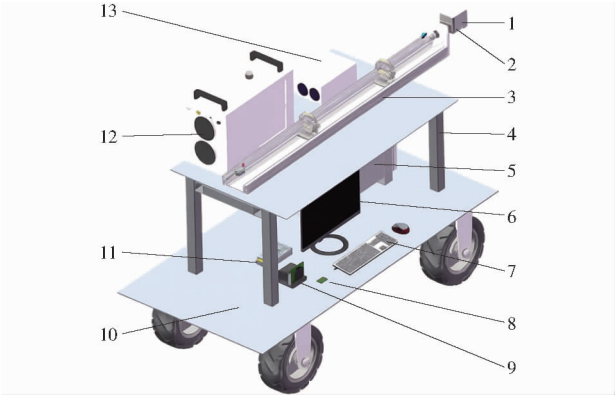

图 1　田间激光除草系统三维结构简图

Fig. 1　Three-dimensional structural diagram of field laser weeding system

1. 深度相机　2. 激光振镜　3. 激光器　4. 激光支架　5. 移动电源　6. 操作屏　7. 鼠标键盘　8. 下位机　9. 上位机　10. 移动底盘　11. 开关电源　12. 冷却水箱　13. 激光电源

系统硬件结构如图 2 所示，感知模块由 Intel RealSense D435i 型深度相机构成，通过 USB3.0 接口与上位机 Jetson AGX Orin 相连，用于采集作业区域彩色与深度图像。上位机作为系统核心控制单元，负责运行杂草识别算法与跟踪算法，实现杂草识别、定位与目标分配。检测到的杂草三维坐标经坐标变换计算后，通过 UART 通信协议发送至下位机。

下位机采用 Teensy 3.2 型微控制器，负责接收上位机发送的目标信息并生成执行指令。通过 XY2－100 通信协议向振镜控制器发送双轴控制码值，驱动 RC1001 型振镜实现激光光斑精确指向；同

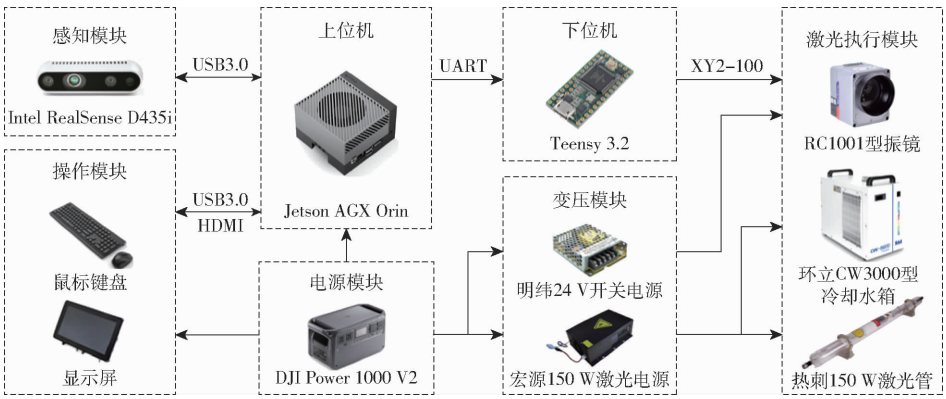

图 2　系统硬件整体结构图

Fig. 2　Overall structure diagram of system hardware

时通过 TTL 控制信号实现对激光器开关的实时控制。参照文献[22],激光器采用 150 W CO_2 激光管,由激光电源供电。为保证激光器在连续作业的稳定性和安全性,系统配置冷却水箱,形成封闭式循环水冷通道,实现激光管热量的高效散除。电源模块采用大疆移动电源,为上位机、下位机、激光电源与冷却系统提供独立稳压直流电。操作模块包括显示屏与鼠标键盘,用于系统状态监控与参数调试。

1.2 工作原理

激光除草机器人工作流程如图 3 所示。系统启动后,深度相机实时获取作业区域彩色与深度图像数据,并将其传输至上位机进行处理。上位机运行杂草检测算法对图像中杂草进行识别和定位,同时结合多目标跟踪算法实现跨帧数据关联,为每一株杂草目标分配唯一编号,从而为每一株杂草赋予稳定的 ID。

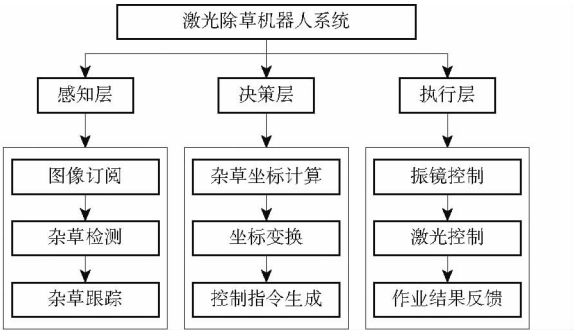

图 3 系统工作流程图

Fig. 3 System workflow chart

检测得到的杂草像素坐标结合深度信息计算其在相机坐标系下三维空间位置,随后通过相机标定参数完成相机坐标系向振镜坐标系的转换,实现空间目标与振镜控制坐标系的精准对应。在坐标变换完成后,系统根据目标杂草在振镜坐标系下的位置计算出控制码值及激光触发命令,并通过 UART 串口将指令发送至下位机控制板 Teensy 3.2。下位机接收指令后,根据 XY2 - 100 协议驱动振镜的双轴偏转,使激光光斑快速指向目标位置。当光斑稳定落在杂草中心区域时,Teensy 3.2 输出 TTL 电平信号控制激光器通断,实现对杂草的定点辐照。激光器在设定功率与照射时间内对杂草组织进行加热炭化,达到除草目的。作业结束后,系统自动记录执行状态并反馈至上位机,更新任务队列后进入下一目标识别与除草流程。

2 感知系统设计

2.1 杂草目标检测

采用基于 YOLO 11 框架的杂草检测模型。该模型在 YOLO 系列网络[23]的基础上优化特征提取与多尺度融合结构,引入轻量化骨干网络与高效解码器,在保证检测精度的同时显著提升了推理速度。YOLO 11 通过改进的特征金字塔结构实现深浅层特征的有效融合,增强了模型对小尺寸杂草的识别能力,适用于田间杂草体型小、遮挡多、光照变化大的复杂场景。模型训练采用迁移学习策略,在公开的 Weed25 杂草数据集[24]上进行预训练,以获取通用的杂草特征表示,随后在自采集的数据集上进行微调。其中包含阔叶型与窄叶型杂草样本,模型以“杂草”作为统一检测类别进行训练,以验证其在多形态目标下的识别泛化能力。自建数据集由 Intel RealSense D435i 型深度相机采集,共获得 960 幅杂草图像,按比例 8∶1∶1 划分为训练集、验证集与测试集。

训练过程使用 Adam 优化器,初始学习率 0.001,批次大小 32,经 100 轮迭代后收敛,训练损失值及平均精度均值(mAP)曲线如图 4 所示。由图 4 可知,YOLO 11 模型在验证集上 mAP 达到 94.2%,检测效果如图 5 所示。

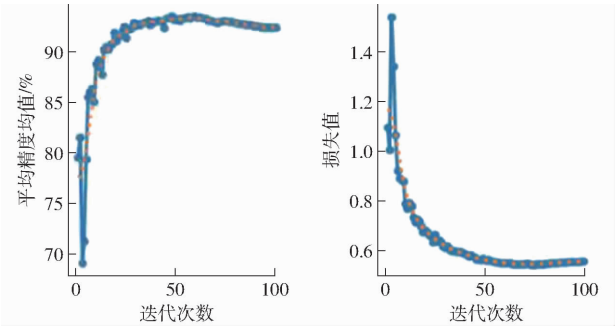

图 4 模型训练曲线

Fig. 4 Model training curves



图 5 模型检测效果

Fig. 5 Model detection effect

模型在 Jetson AGX Orin 上通过 tensorrt 以 FP32 部署后,端到端推理速度达到 46 f/s,可满足实时检测需求。检测输出包括杂草目标边界框、类别置信度及像素坐标信息,结合深度图可进一步计算其三维空间位置,为后续坐标变换与振镜控制提供可靠

数据。

2.2　杂草多目标跟踪

为避免相邻帧检测结果重复识别并提高作业连续性，系统采用 ByteTrack 多目标跟踪算法[25]实现杂草轨迹的跨帧关联。算法整体流程如图 6 所示，在每帧检测后，模型将检测框按置信度划分为高置信度与低置信度 2 类，并与上一帧跟踪轨迹进行匹配。匹配采用交并比（IoU）与中心距离联合度量方式，在高置信度区域优先执行匹配与轨迹更新。若匹配成功，则更新轨迹状态；若匹配失败，则判断为新目标或跟踪丢失。当轨迹连续若干帧未被检测结果匹配且置信度低于阈值时，该轨迹被判定为失效并从目标列表中删除。对于低置信度检测结果，系统采用二次匹配策略：首先与未匹配轨迹进行尝试匹配，若距离小于设定阈值则更新轨迹，否则创建新的轨迹以等待后续验证。最终系统为每株杂草目标分配唯一 ID，实现帧间目标稳定关联。在仿真平台中算法跟踪效果如图 7 所示。

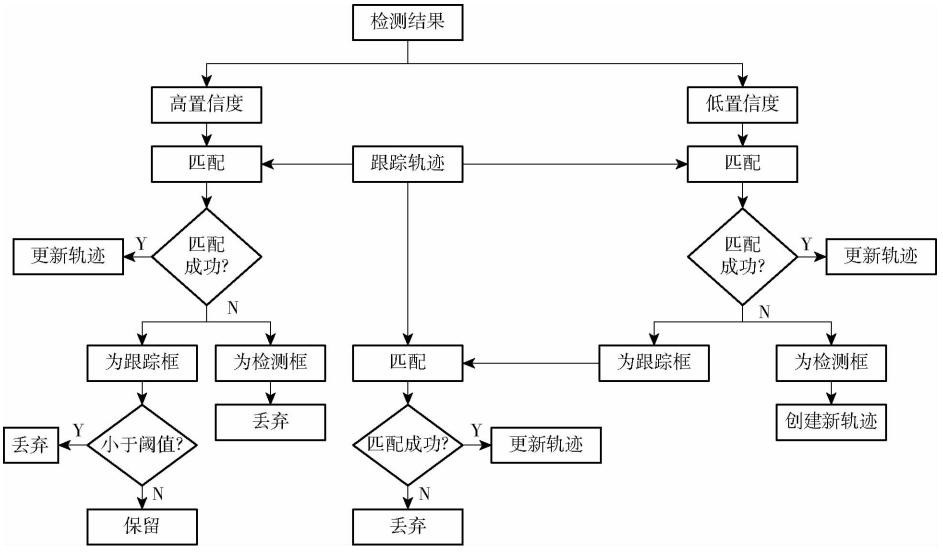

图 6　ByteTrack 流程图

Fig. 6　ByteTrack flowchart

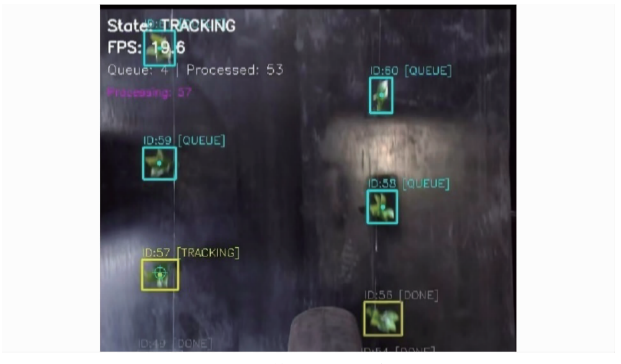

图 7　模型跟踪效果

Fig. 7　Model tracking effect

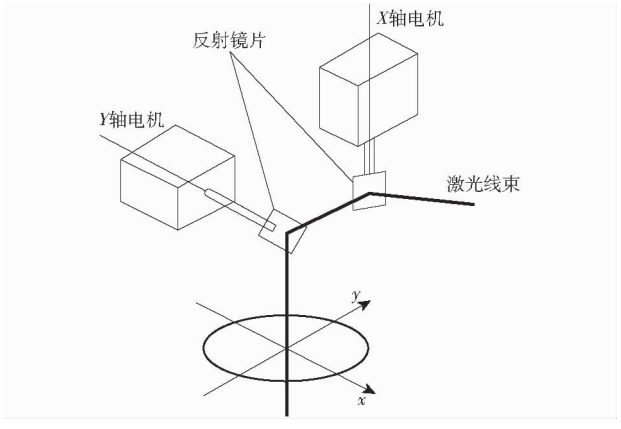

图 8　振镜工作原理

Fig. 8　Working principle of galvanometer

3　振镜与激光控制系统设计

3.1　振镜工作原理

振镜主要是为了实现激光光斑在二维平面内的高速偏转与精确定位。振镜结构及工作原理如图 8 所示，由二维反射镜片组件及驱动电机构成。激光束经激光振镜模块后，依次通过 X 轴和 Y 轴反射镜反射，实现光束在平面内的角度偏转。X、Y 轴电机分别带动反射镜绕垂直和水平轴微小转动，使入射激光在目标平面上产生相应位移，从而完成激光光斑空间扫描。

反射镜转角与光斑位移间的几何关系可表示为

$$x = f\tan(2\theta_x) \tag{1}$$

$$y = f\tan(2\theta_y) \tag{2}$$

式中　f——激光到目标平面等效焦距

θ_x、θ_y——X、Y 轴反射镜偏转角

当振镜镜面旋转角较小时，可得 $\tan(2\theta) \approx 2\theta$，此时光斑位移与镜面转角呈线性关系。系统工作时，激光线束经两级反射后在平面上形成双轴偏转运动，实现任意坐标点快速瞄准。为保证控制精度，

系统在标定阶段建立了码值与角度映射关系,并通过线性插值法实现非线性段修正,从而获得稳定的光斑指向精度。

3.2 基于 Teensy 3.2 的振镜与激光控制方法

振镜控制核心为 XY2 - 100 通信协议,该协议通常需要约 10 MHz 的时钟信号频率,以保证振镜在高速扫描时的角度响应连续和平滑。综合考虑信号时序精度与接口兼容性,系统选用 Teensy 3.2 型微控制器作为下位机控制单元。该控制器具备 72 MHz 主频与高精度定时器,可在毫秒级时间内稳定输出同步信号,满足振镜通信的实时性要求。振镜控制系统输出 4 路主要信号,分别为时钟信号、同步信号、X 通道信号与 Y 通道信号,信号最终以差分形式传输至振镜驱动模块。XY2 - 100 协议采用固定长度帧结构,每帧包含控制字、角度码值与奇偶校验位 3 部分,其中控制字用于标识帧类型与通道属性,角度码值表示目标偏转角,校验位用于检测数据完整性。

在坐标与实际偏转角映射关系中,XY2 - 100 协议将振镜最大张角 θ 均匀划分 65 536 个步长,当协议传输坐标值为 N 时,其实际偏转角 α 为

$$\alpha = \frac{N\theta}{65\,536} \tag{3}$$

由此可得最小角度分辨率为 $\theta/65\,536$。该离散化设计保证了光斑在微小角度变化下的高精度响应,为实现毫米级定位奠定基础。Teensy 3.2 型控制器与振镜驱动模块直接连接,分别输出 4 路信号。上位机通过 USB 与 Teensy 3.2 型建立串口通信,用于发送坐标指令与激光触发命令。软件部分采用定时中断机制实现信号同步与数据刷新,系统定时器周期性输出时钟脉冲,主循环解析上位机坐标帧并实时更新振镜角度,实现光斑高速偏转与稳定跟踪。

激光控制采用 TTL 电平信号实现启停。Teensy 控制板数字输出口直接连接激光电源触发端。当检测模块完成目标识别与跟踪,且振镜稳定对准杂草中心后,上位机向下位机发送打开激光指令,控制器输出高电平信号启动激光照射;照射持续时间和功率参数由上位机设定,并在定时中断机制下自动关闭。通过这种同步控制,激光发射与振镜瞄准过程实现时间配合与空间对准,确保除草作业精度与安全性。

4 激光坐标标定与姿态误差补偿算法

4.1 相机内参标定

为获得深度相机成像比例关系及像素坐标与空间坐标的映射参数,采用 Matlab Camera Calibrator 工具箱对 Intel RealSense D435i 型相机进行内参标定。标定板采用 12 × 9 棋盘格结构,方格边长 28 mm,采样 1 280 像素 ×720 像素图像,通过多角度采集标定板图像进行角点提取与参数优化。图 9 为标定过程采集的典型图像。

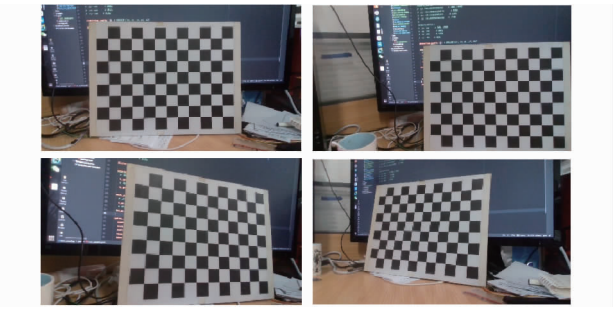

图 9 相机内参标定采集典型图像

Fig. 9 Camera's internal reference calibration collected typical images

经计算得到相机内参矩阵 $\boldsymbol{K}$ 为

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 f_x、f_y——像素坐标系下焦距

c_x、c_y——主点坐标

通过最小化重投影误差获得最优解,标定结果如表 1 所示。结果表明,平均重投影误差约为 0.24 像素,能够满足三维重建与坐标变换的精度要求。

表 1 深度相机内参标定参数

Tab. 1 Internal parameter calibration parameters of depth camera

参数	f_x	f_y	c_x	c_y
数值/像素	908.89	908.22	636.29	354.21

4.2 相机外参标定

采用手工粗测结合精细外参修正的两阶段方法建立相机坐标系与振镜坐标系的空间映射关系。依据安装位置与姿态进行手工粗测,获得初始外参。使用标定板进行精细修正,标定板由直径 5 cm 的黑色圆形标志点按 8 cm 圆心间距规则布设,相机固定于振镜下方俯视标定板,便于形成分布均匀的空间基准点阵。最终坐标映射采用 2 次变换叠加表示为

$$\boldsymbol{P}_g = \boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)}\left(\boldsymbol{R}_{gc}^{(0)}\boldsymbol{P}_c + \boldsymbol{t}_{gc}^{(0)}\right) + \boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{P}_g$——振镜坐标系下点坐标

$\boldsymbol{P}_c$——相机坐标系下三维点

$\boldsymbol{R}_{gc}^{(0)}$、$\boldsymbol{t}_{gc}^{(0)}$——初始外参

$\boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)}$、$\boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)}$——精细修正项

参数获取过程如下:①初始外参($\boldsymbol{R}_{gc}^{(0)}$,$\boldsymbol{t}_{gc}^{(0)}$)通过测量相机与振镜的相对位置与安装姿态获

得，用于提供可用的初始几何映射与自动瞄准能力。②修正外参（$\boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)}$，$\boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)}$）由自动人工两阶段数据采集求得，如图 10 所示：对选取的标定圆心，程序基于初始外参计算其振镜码值并控制激光指向圆心，记录由$\boldsymbol{P}_c$映射得到的预测落点 $\widetilde{\boldsymbol{P}}_g^i = \boldsymbol{R}_{gc}^{(0)}\boldsymbol{P}_c^i + \boldsymbol{t}_{gc}^{(0)}$；随后手动控制振镜使激光光斑与圆心完全重合，记录实测落点$\boldsymbol{P}_g^i$。以$\{\widetilde{\boldsymbol{P}}_g^i\}$与$\{\boldsymbol{P}_g^i\}$为 2 组对应点，构建最小二乘问题

$$f = \min_{\boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)},\boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)}} \sum_i \| \boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)}\widetilde{\boldsymbol{P}}_g^i + \boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)} - \boldsymbol{P}_g^i \|^2 \tag{6}$$

采用 SVD 求解刚体变换[26]得到（$\boldsymbol{R}_{gc}^{(\Delta)}$，$\boldsymbol{t}_{gc}^{(\Delta)}$）。由此可以测得准确的外参。

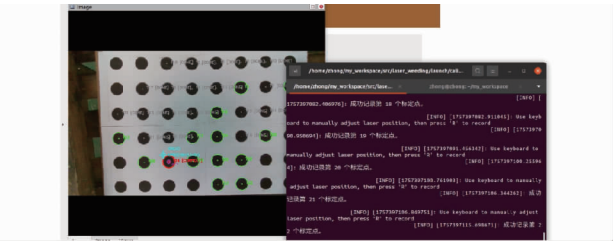

图 10　修正外参标定界面

Fig. 10　Fix external parameter calibration interface

4.3　姿态误差补偿算法

为保证系统在田间复杂地形条件下仍能准确指向目标，系统建立基于空间几何约束的姿态误差补偿模型。深度相机、振镜及激光器固定安装于机器人平台上，三者构成刚体，其空间相对位置关系在标定阶段确定并保持不变。当平台姿态因地形起伏产生变化时，相机与振镜间外参不变，系统可依据实时图像与深度信息完成几何反解，实现激光光斑的自适应补偿。相机检测到杂草后，得到像素坐标（x_p，y_p）。根据相机内参矩阵 $\boldsymbol{K}$，可将像素坐标转换为归一化成像坐标

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{K}^{-1}\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

结合深度图像得到深度z_w，可得目标在相机坐标系下三维坐标为

$$\boldsymbol{P}_c = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = z_w\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

相机与振镜间的空间关系由旋转矩阵$\boldsymbol{R}_{gc}$和平移向量$\boldsymbol{t}_{gc}$描述，目标点在振镜坐标系下坐标为

$$\boldsymbol{P}_g = \boldsymbol{R}_{gc}\boldsymbol{P}_c + \boldsymbol{t}_{gc} \tag{9}$$

其中

$$\boldsymbol{P}_g = \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{bmatrix}$$

在振镜坐标系中激光器光心位置为

$$\boldsymbol{P}_l = (X_l, Y_l, Z_l) \tag{10}$$

由几何关系可得目标方向与两反射镜转角对应关系

$$\theta_x = \arctan\frac{X_t - X_l}{Z_t - Z_l} \tag{11}$$

$$\theta_y = \arctan\frac{Y_t - Y_l}{Z_t - Z_l} \tag{12}$$

角度与振镜控制码值之间存在线性关系

$$C_x = \frac{2\theta_x}{\theta_{\max}}C_{\max} \tag{13}$$

$$C_y = \frac{2\theta_y}{\theta_{\max}}C_{\max} \tag{14}$$

式中　$\theta_{\max}$——振镜总扫描角

$C_{\max}$——码值最大幅值

当平台姿态变化时，相机观测方向随之改变，导致同一地面目标在像素平面中的投影位置（x_p，y_p）发生偏移。算法通过实时计算最新目标像素与深度信息，将相机观测点P_c动态投影至振镜角度空间，实现激光束实时重定向。由于相机与振镜的相对位姿固定，该过程能够自动抵消平台姿态引起的视角偏差，从而实现姿态误差几何自补偿。

5　试验

5.1　激光瞄准精度试验

试验在室内固定环境下，通过程序控制振镜驱动激光束，分别在高度 60、80、100 cm 下，依次瞄准标定板上的黑色圆形靶点中心，并采集光斑中心与靶点中心偏差 Δx、Δy。瞄准误差计算式为

$$e_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{15}$$

式中　Δx——中心之间水平偏差

Δy——中心之间竖直偏差

每组试验测量 30 个点，测量 3 次，得到误差分布直方图，如图 11 所示。由图 11 可知，不同高度下误差分布均接近正态形态，整体波动范围较小。从误差均值与方差可见，随着作业高度降低，系统定位精度略有提高，与成像视差减小及深度测量误差减弱有关。不同高度下误差差异均在 1 cm 范围内，说明本系统坐标变换与姿态补偿算法具有较好的稳健性。

5.2　姿态补偿有效性验证试验

试验中保持相机与振镜刚性安装不变，在不同高度将标定板分别倾斜 15°，使每个标定点高度都不一致。在每种状态下，系统自动执行与 5.1 节相同的扫描流程，逐点计算激光落点误差，测量结果如图 12 所示。

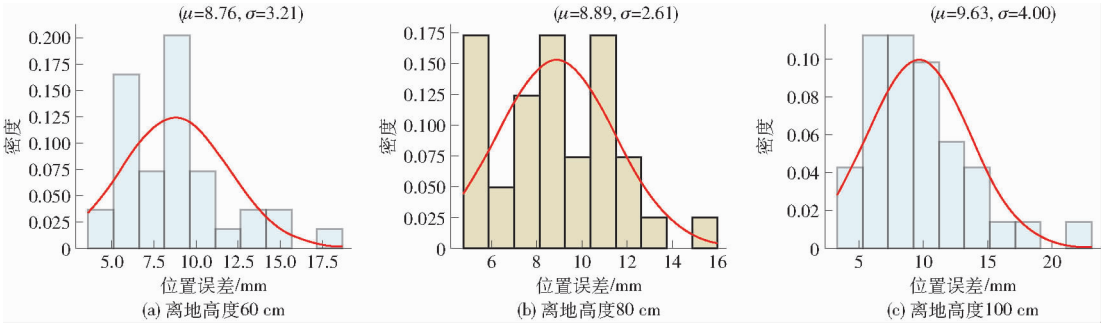

图 11 不同高度的瞄准误差直方图

Fig. 11 Aiming error histograms at different heights

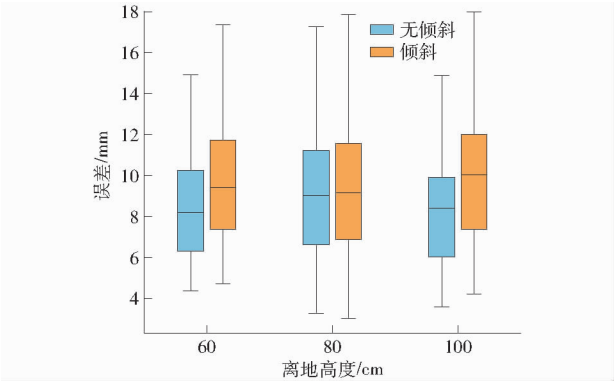

图 12 不同高度下倾斜与不倾斜标定板误差对比

Fig. 12 Box plots comparison of errors of inclined and non-inclined calibration plates at different heights

由图 12 可知,在标定板中每一个黑色圆形靶点中心高度都不一致情况下,不同高度上测量的平均瞄准误差变化量不超过 2 mm。表明所提出的几何反解补偿方法能够在平台姿态变化时实时更新激光指向,实现自动姿态补偿。

5.3 激光除草试验

为确定不同作业高度下激光作用规律,研究照射时间与除草效果的关系,当功率为 150 W 时,分别调整激光高度与照射时间,记录杂草是否被完全烧断,以获得各高度的最小有效照射时间t_{min},试验过程如图 13 所示。

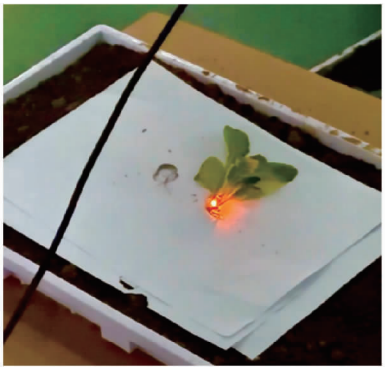

图 13 激光灼烧试验过程

Fig. 13 Diagram of laser burning test process

考虑到振镜最大扫描角为 ±22°,激光在不同高度下的覆盖范围不同,有效扫描宽度为

$$L = 2h\tan 22° \tag{16}$$

式中 h——振镜中心距离地面高度,mm

L——振镜有效扫描宽度,mm

作业面积为

$$A = L^2 \tag{17}$$

式中 A——振镜有效作业面积,mm^2

为同时评价作业效率与能量利用率,采用时间效率和面积效率 2 个指标,计算式为

$$U = \frac{A}{t_{min}} \tag{18}$$

式中 U——时间效率,m^2/s

$$\eta = \frac{A}{P\,t_{min}} \tag{19}$$

式中 P——单次除草能量,J

η——面积效率,$m^2/(J\cdot s)$

测试结果如表 2 所示。

表 2 激光除草试验结果对比

Tab. 2 Comparative results of laser weeding experiments

高度/cm	t_{min}/s	面积/m^2	P/J	U/($m^2\cdot s^{-1}$)	η/($m^2\cdot J^{-1}\cdot s^{-1}$)
60	0.3	0.235	45	0.783	0.005 22
80	0.5	0.418	75	0.836	0.005 57
100	0.8	0.653	120	0.816	0.005 44

由表 2 可知,随着高度增加,激光覆盖范围扩大但烧断时间延长。综合效率与能耗指标,80 cm 下 U 与 η 均达最优,说明此高度在能量利用和作业效率间实现了最佳平衡。

5.4 激光除草性能试验

试验装置如图 14 所示。试验在室内进行,杂草随机分布在长 2.1 m、宽 0.6 m 的试验区域内,总数为 47 株,为保证安全,试验采用红外激光射线替代激光射线,作业时间为 10、15、20 s,对应不同底盘行进速度。系统自动识别杂草并执行激光除草,记录错检、重检及漏检数量,计算命中率。试验效果与操作平台效果如图 15 所示。试验结果见表 3。

由表 3 可知,当作业时间较短时,漏检数量较



图 14　试验装置

Fig. 14　Test device diagram

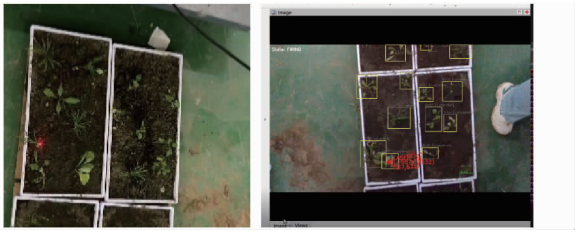

图 15　试验效果

Fig. 15　Test effect diagrams

多，命中率约为 55%，主要原因为底盘移动速度过快，部分杂草尚未进入有效作业区域即被跳过。随着作业时间延长，系统处理充分，漏检数量显著减少，命中率均有提升。结果表明，系统在作业时间 20 s 下可实现稳定识别，满足精确除草作业要求。

6　结论

（1）设计了一种基于视觉感知与振镜控制的激光除草机器人系统。系统由深度相机、RC1001 型振镜和高功率激光器组成，实现了杂草识别、空间定位与激光打击等功能。

（2）基于 Teensy 3.2 型微控制器实现了对振镜与激光一体化控制，采用 XY2－100 数字通信协议与 TTL 触发信号，实现高频、低延迟的激光控制。

（3）提出了相机到振镜外参标定及误差修正方法，通过手工测量与精细标定结合的方式，实现了毫米级空间对准精度，为姿态补偿算法提供了高精度几何基础。

（4）通过瞄准精度、除草参数及整机作业性能试验，验证了系统综合作业能力。结果表明，系统在不同高度与倾斜条件下均能保持稳定的指向精度，最优作业参数为：作业高度 80 cm、照射时间 0.5 s、功率 150 W，此时平均命中率高达 98.6%。

表 3　激光除草性能试验结果对比

Tab. 3　Comparison of performance test results for laser weeding

作业时间/s	错检数	重检数	漏检数	命中率/%
10	3	2	22	53.2
10	2	2	21	55.3
10	2	3	21	55.3
15	1	2	10	78.7
15	3	2	11	74.5
15	0	3	10	78.7
20	1	2	1	97.9
20	2	3	1	97.9
20	0	3	0	100

参　考　文　献

[1] 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.
ZHANG Xinyue, WANG Qingjie, WANG Chao, et al. Dryland intelligent mechanical weeding technologies and equipment: a review[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 22－41. (in Chinese)

[2] 白勇，王晓燕，胡光，等. 非化学方法在农田杂草防治中的应用[J]. 农业机械学报，2007，38(4)：191－196.
BAI Yong, WANG Xiaoyan, HU Guang, et al. Application of non-chemical methods in farmland weed control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 191－196. (in Chinese)

[3] 李江国，刘占良，张晋国，等. 国内外田间机械除草技术研究现状[J]. 农机化研究，2006，28(10)：14－16.
LI Jiangguo, LIU Zhanliang, ZHANG Jinguo, et al. Status of research on field mechanical weeding technologies at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(10): 14－16. (in Chinese)

[4] 陈子文，张春龙，李南，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)：1－8.
CHEN Ziwen, ZHANG Chunlong, LI Nan, et al. Progress and analysis of intelligent and efficient intra-row weeding robots[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 1－8. (in Chinese)

[5] 丁力，袁业超，李源源，等. 大豆行间驱拨组合式除草机设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(9)：344－354.
DING Li, YUAN Yechao, LI Yuanyuan, et al. Design and testing of combined soybean inter-row roundup weeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 344－354. (in Chinese)

[6] 张馨悦，王超，王庆杰，等. 玉米苗期行间除草二级对行装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：42－51.
ZHANG Xinyue, WANG Chao, WANG Qingjie, et al. Design and testing of a secondary row-to-row device for weed control in corn seedling rows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 42－51. (in Chinese)

[7] 傅雷扬，李绍稳，张乐，等. 田间除草机器人研究进展综述[J]. 机器人，2021，43(6)：751－768.

FU Leiyang, LI Shaowen, ZHANG Le, et al. A review of research progress on field weeding robots[J]. Robot, 2021, 43(6): 751 – 768. (in Chinese)

[8] 余忠义,王洪宇,何雄奎,等. 激光除草机器人关键技术与展望[J]. 智慧农业(中英文),2025,7(2):132 – 145.
YU Zhongyi, WANG Hongyu, HE Xiongkui, et al. Key technologies and prospects of laser weeding robots[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(2): 132 – 145. (in Chinese)

[9] MARX C, BARCIKOWSKI S, HUSTEDT M, et al. Design and application of a weed damage model for laser-based weed control [J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(2): 148 – 157.

[10] RAKHMATULIN I, ANDREASEN C. A concept of a compact and inexpensive device for controlling weeds with laser beams [J]. Agronomy, 2020, 10(10): 1616.

[11] XIONG Y, GE Y, LIANG Y, et al. Development of a prototype robot and fast path-planning algorithm for static laser weeding [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142(Part B): 494 – 503.

[12] BLOOMER D J, HARRINGTON K C, GHANIZADEH H, et al. Robots and shocks: emerging non-herbicide weed control options for vegetable and arable cropping[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2024, 67(1): 81 – 103.

[13] WU X, HE J, ZHAI D, et al. Kinematics and statics analysis of a novel 4-DOF parallel mechanism for laser weeding robot [J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2016, 50(3): 52 – 61.

[14] VARGAS F J I, WANE S, AREVALO-RAMIREZ T, et al. Dynamic weed control using selective laser application with object tracking and target scheduling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239(B): 111004.

[15] ZHAO P, CHEN J, LI J, et al. Design and testing of an autonomous laser weeding robot for strawberry fields based on DIN – LW – YOLO[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109808.

[16] 潘雷,陈树人,栗移新,等. CO_2 激光除草应用初步研究[J]. 农机化研究,2008,30(6):171 – 173.
PAN Lei, CHEN Shuren, LI Yixin, et al. Preliminary study on CO_2 laser application for weed control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(6): 171 – 173. (in Chinese)

[17] 吴旺旺. 激光除草机器人执行机构研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2014.
WU Wangwang. Study on actuators of laser weeding robot[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[18] 吴旺旺,戈振扬,于英杰,等. 激光除草技术在陆稻田间的应用研究[J]. 农业工程,2013,3(增刊 1):5 – 7.
WU Wangwang, GE Zhenyang, YU Yingjie, et al. Application of laser weeding technology in upland rice fields[J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(Supp. 1): 5 – 7. (in Chinese)

[19] 张良安,唐锴,赵永杰,等. 四足激光除草机器人腿部结构参数优化[J]. 农业工程学报,2020,36(2):7 – 15.
ZHANG Liang'an, TANG Kai, ZHAO Yongjie, et al. Optimization of leg structural parameters for a quadruped laser weeding robot[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 7 – 15. (in Chinese)

[20] 颜浩,谭彧,马伟,等. 基于往复运动和路径规划的蓝光激光除草机构研制[J]. 中国农机化学报,2025,46(9):175 – 181.
YAN Hao, TAN Yu, MA Wei, et al. Development of blue laser weeding mechanism based on reciprocating motion and path planning[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(9): 175 – 181. (in Chinese)

[21] 吴显斌,杜雅刚,隋新,等. 激光除草技术研究现状及发展趋势[J]. 中国农机装备,2025(6):20 – 23.
WU Xianbin, DU Yagang, SUI Xin, et al. Research status and development trend of laser weeding technology[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2025(6): 20 – 23. (in Chinese)

[22] SOSNOSKIE L M, BILL K, BUTLER-JONES A, et al. Deep learning-based laser weed control compared to conventional herbicide application across three vegetable production systems[J]. Pest Management Science, 2025, 81(8): 4922 – 4936.

[23] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016: 779 – 788.

[24] WANG P, TANG Y, LUO F, et al. Weed25: a deep learning dataset for weed identification[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1053329.

[25] ZHANG Y, SUN P, JIANG Y, et al. ByteTrack: multi-object tracking by associating every detection box[C]// European Conference on Computer Vision (ECCV). Cham: Springer, 2022: 1 – 21.

[26] ARUN K S, HUANG T S, BLOSTEIN S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5): 698 – 700.